CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.

AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO I

TOMO VI

INGENIERÍAS

DECLARACIÓN LEGAL

EDITORES:
Cristina E. Solano Sosa
María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Alexandra Monsetrrat Garcia

ISBN GENERAL 978-607-8821-42-6
Fecha de otorgamiento 18-09-2024

Tomo VI: Ingeniería ISBN 978-607-8821-48-8
Fecha de otorgamiento 18-09-2024

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores.

Temacilli EDITORIAL
Lagos de Moreno, Jalisco
http:/temacilli-editorial.com

D. R. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.
Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre
C. P. 37150 León, Guanajuato
México
Hecho en México

PREFACIO

En este compendio se presentan contribuciones de investigación y desarrollo tecnológico realizadas en diversas áreas de la ciencia, cuyo objetivo principal es contribuir a la difusión del quehacer científico y tecnológico que se realiza en México, así como promover el trabajo interdisciplinario entre miembros de diferentes disciplinas científicas.

Este trabajo está organizado en siete tomos los cuales corresponden a las siguientes áreas científicas: I) Biología y química, II) Ciencias sociales, III) Biotecnología y ciencias agropecuarias, IV) Físico matemáticas y ciencias de la tierra, V) Humanidades, ciencias de la conducta y divulgación científica, VI) Ingenierías, así como VII) Medicina y ciencias de la salud.

Octubre de 2024
León, Gto., México

Cristina E. Solano Sosa
María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Alexandra Monsetrrat García

TABLA DE CONTENIDO

ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE FENOLES Y TANINOS PROVENIENTES DEL AGUACATE 6

APRECIACIÓN OBJETIVA EN EL APRENDIZAJE MATEMÁTICO EN EL ÁREA DE INGENIERÍA 14

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE PRODUCCIÓN EN SUELAS VULCANIZADAS MEDIANTE HERRAMIENTAS VISUALES: EL RITMO DE TRABAJO BAJO EL ENFOQUE LEAN 24

NANOESTRUCTURAS DE ZNO/GOR SINTETIZADAS VÍA VERDE PARA LA DETECCIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO 35

ANÁLISIS CINÉTICO PRELIMINAR DE UNA LIXIVIACIÓN DIRECTA DE SULFURO DE ZINC (ZNS) ASISTIDO CON OZONO 41

REDISEÑO DE UNA PLUMA DE ACCESO AUTOMATIZADA 47

DESARROLLAR UN MÓDULO DIDÁCTICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AUTOMOTRICES CON APLICACIÓN AL PROGRAMA EDUCATIVO DE MECÁNICA ÁREA AUTOMOTRIZ 49

DISEÑO DE UN CAMPER AUTOMATICO PARA UNA CAMIONETA RANGER 54

MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR COMPORTAMIENTO ESPERADO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA DE DISTRIBUIDOR VIAL 66

APLICACIÓN DE LA REALIDAD AUMENTADA COMO UN RECURSO DIDÁCTICO PARA VISUALIZAR Y EXPLORAR MODELOS 3D 75

UTILIZACIÓN DE UN MODULO DE RADIO FRECUENCIA LORA EBYTE PARA EL CONTROL DE ENCENDIDO, APAGADO Y MONITOREO UN MOTOR ELECTRICO 82

SISTEMA OPTOELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURA DE CARGA USANDO IOT 92

CARACTERIZACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN TI-6AL-4V GRADO ELI RECUBIERTA CON PLASMA MEDIANTE PE-CVD 100

SENSOR DE FUERZA CON LAZO DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA 109

BIORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS POR BACTERIAS EXTRAÍDAS DE BIOSÓLIDOS DE AGUAS RESIDUALES 114

EXTRACCIÓN DE CELULOSA A PARTIR DE CÁSCARA DE PAPAYA 119

EFECTO DE LA ADICIÓN DE UN INHIBIDOR NATURAL ELABORADO A BASE DE HOJAS DE PIRUL SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE UN ACERO API 5L X65 EN AGUA CONGÉNITA 125

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN QUÍMICA DE PROTECTORES SOLARES COMERCIALES BASE ORGÁNICA E INORGÁNICA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE UV-VIS 133

ESTUDIO BIOMECÁNICO COMPARATIVO DEL LEVANTAMIENTO DE PESO MUERTO CON LA ESPALDA RECTA Y LA ESPALDA FLEXIONADA 141

GENERACIÓN DE BASES DE DATOS PARA ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES: COMPARATIVA Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN DE IMÁGENES CON LLUVIA 151

ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA MARCHA CON PESO EN ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS 161

USO DE LA MATRIZ DE FLEXIBILIDAD PARA LOCALIZAR EL DAÑO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES 172

TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ANÁLISIS INTELIGENTE DE LA ARTRITIS Y LA ARTROSIS 183

PULSERA ELECTRÓNICA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA CORPORAL 195

APLICACIÓN DE TÉCNICAS LEAN Y ERGONOMÍA EN EL PROCESO DE PRENSAS DE UNA EMPRESA DEDICADA A LA PRODUCCIÓN DE EVA 201

ANÁLISIS Y MEJORA DE PROCESO DE MONTADO EN CALZADO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS 212

CARRO DE CONTROL REMOTO MANIPULADO POR MEDIO DE COMANDOS DE VOZ 225

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE PROTOTIPO PARA IMPLANTACIÓN DE SEMILLAS 232

PRIMERA APROXIMACIÓN A PROTOTIPO PARA EVALUAR PROPIEDADES ELECTRICAS DE GRAFITO EXPUESTO A UV 248

ESTUDIO COMPARATIVO DE HUESO CORTICAL VS. MATERIAL COMPUESTO EN TENSIÓN Y COMPRESIÓN UTILIZANDO INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL 256

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS EMPLEANDO REDES NEURONALES 263

PREPARACIÓN DE ELASTÓMEROS CON FORMA RE-PROGRAMABLE A BASE DE CRISTALES LÍQUIDOS Y ENLACES DINÁMICOS DE PUENTE DISULFURO 271

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ASISTIDA POR FLUJO (FAC) DE UN MATERIAL BIMETÁLICO (ACERO API 5L X65-INCONEL 825) CON RESPECTO AL ACABADO SUPERFICIAL EN LA FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN 279

ESTUDIO DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DEL RÍO CATA, GUANAJUATO: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN 288

DESARROLLO DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE CONTAMINANTES ORIENTADO A MICROPLASTICOS 294

SEPARACIÓN DE PLÁSTICO Y ALUMINIO EN ENVASES DE DESHECHO TETRA BRIK EMPLEANDO UN PROCEDIMIENTO ECOLÓGICO 305

PRUEBA DE CONCEPTO DE LA APLICACIÓN DE REDES GENERATIVAS ADVERSARIAS CÍCLICAS (CYCLEGANS) EN EL AUMENTO DE BASE DE DATOS DE IMÁGENES LAPAROSCÓPICAS 311

ANÁLISIS DE SENTIMIENTOS EN LA EVALUACIÓN DE CURSOS: CALIFICACIÓN VS COMENTARIOS 318

MOTORIZACIÓN DE UN DRÓN TRICÓPTERO VTOL Y VUELO HORIZONTAL 323

AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA SBR PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL 332

CONTROL INALAMBRICO DE UN ROBOT MÓVIL UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE RADIOFRECUENCIA POR BLUETOOTH 342

EL SOFTWARE COMO SERVICIO EN LA NUBE (SAAS): INNOVACIONES Y DESAFÍOS CON ONSHAPE EN LA INGENIERÍA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES 347

EVALUACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LA INHIBICIÓN DE HONGOS TRICHOPHYTON EN POLÍMEROS ENRIQUECIDOS CON AGNPS 357

ANÁLISIS DE LA SINERGIA ENTRE LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN Y FOTOCATÁLISIS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES PRESENTES EN AGUA UTILIZANDO UN COMPÓSITO DE POLÍMERO-TIO_2 366

COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE LA MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO Y SU RELACIÓN CON LA COLOCACIÓN DEL MORTERO 378

INVESTIGACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MAPAS DE PRESIÓN PARA EL DISEÑO DE UN COJÍN ERGONÓMICO A TRAVÉS DE LA INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA: ESTUDIO PRELIMINAR 388

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE ZNS OBTENIDAS POR EL METODO DE PRECIPITACIÓN QUÍMICA, PARA SU POSIBLE APLICACIÓN COMO MATERIAL LUMINISCENTE 397

PRECIPITACIÓN DE CARBUROS EN UN ACERO RESISTENTE AL CALOR TRATADO TÉRMICAMENTE A 400 Y 500 °C 409

DEGRADACIÓN DEL COLORANTE NARANJA DE METILO EN SOLUCIÓN ACUOSA APLICANDO PROCESOS HETEROGÉNEOS Y HOMOGENEOS DE OXIDACIÓN 419

BIOGÁS: SUBPRODUCTO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE 427

SISTEMA DE DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LA APLICACIÓN DE PINTURA AUTOMOTRIZ, MEDIANTE EL PROCESO DIGITAL DE IMÁGENES 434

ADQUISICIÓN DE DATOS DE TURBOCOMPRESOR Y MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA 439

ESTUDIO DEL ROL DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS EN LA CORROSIÓN POR PICADURA EN UN ACERO GRADO TUBERIA API 5L X60 450

AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE FLUJO CONTINUO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE MICROPLASTICOS EN UN MEDIO ACUOSO 463

INVERSORES MULTINIVEL APLICADOS E ENERGÍAS RENOVABLES FOTOVOLTAICAS 470

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA COMUNIDAD ESTUDIANTIL DE LA UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE ENERGÍA Y MOVILIDAD 480

ÍNDICES DE DAÑO PARA LA NAVE DEL TEMPLO Y CLAUSTRO DEL EX CONVENTO DE SAN DIEGO EN MORELIA, MICHOACÁN 486

IMPORTANCIA DE DESARROLLAR HABILIDADES Y COMPETENCIAS EN AUTOCAD PARA SER COMPETITIVOS EN EL SECTOR INDUSTRIAL: CASO ITESI 495

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA RECONOCIMIENTO DE HERRAMIENTAS UTILIZANDO PROGRAMACIÓN DE DISPOSITIVOS MÓVILES 505

ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS QUE CONTRIBUYEN AL DESARROLLO DE COMPETENCIAS MATEMÁTICAS EN EL ÁREA DE INGENIERÍA 511

ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRECIPITACIÓN DE CARBUROS EN UN ACERO ASTM A387-G22 CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDA A TEMPERATURAS ENTRE 400, 500, 600 °C 518

DEGRADACIÓN DE IBUPROFENO MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR 524

MATERIALES DE CAMBIO DE FASE COMO ALMACENADORES DE ENERGÍA: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PCM-BIORGÁNICO 530

EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE EL ACABADO Y PROPIEDADES FÍSICAS Y ANTICORROSIVAS DE RECUBRIMIENTOS TIPO SIO2/PDMS 537

AUTOMATIZACIÓN DE TRITURADORA DE PLÁSTICO (PEAD) 543

PLANIFICACIÓN DE EVACUACIÓN ANTE RIESGOS VOLCÁNICOS EN TOLUCA: UN ENFOQUE BASADO EN REDES 551

LA ENSEÑANZA STEAM Y LA COMPRENSIÓN DE SÓLIDOS DE REVOLUCIÓN EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA EN METAL MECÁNICA 558

SISTEMA DE SEGMENTACIÓN AUTOMÁTICO DE MENINGIOMAS CEREBRALES BASADO EN IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL 562

CARACTERIZACIÓN DE BARRAS DE ACERO ASTM A36 A PARTIR DE TÉCNICAS DE IMPACTO ACÚSTICO 568

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE GRANOS DE CAFÉ RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA 573

ANÁLISIS A FLEXIÓN DE UNA TRABE DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO 590

PREDICCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL 596

EFECTO DE LA RELACIÓN MESÓGENO/ESPACIADOR/ENTRECRUZANTE EN LA PREPARACIÓN Y ALINEAMIENTO MOLECULAR PERMANENTE DE ELASTÓMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS 607

IMPLEMENTACIÓN DE MACHINE LEARNING PARA EL ANÁLISIS DE VIOLENCIA CONTRA LA MUJER EN LA PLATAFORMA MUJER SEGURA 614

COMPOSITOS MAGNETICOS PARA CONVERTIDORES CD-CD PARA ALTAS FRECUENCIAS 630

OPTIMIZACIÓN DE MONTAJE DE ORDENADORES PARA ANÁLISIS NUMÉRICO 640

CARACTERIZACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO CON FIBRAS DE CIGARRO MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS 649

ESTADO ESTRUCTURAL ACTUAL DE LAS CASAS ABANDONADAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN 656

MENTEFACTURA APLICADA A LA CONSTRUCCIÓN DE UN CANSAT 669

MECANISMO DE DIFUSIÓN DE BORO EN UNA SUPERFICIE FERROSA UTILIZANDO DINÁMICA MOLECULAR 678

PROTOTIPO NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL EPOC A TRÁVES DEL ALIENTO 685

EVALUACIÓN REOLÓGICA DE ASFALTO MODIFICADO CON ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO FUNCIONALIZADO CON ANHÍDRIDO MALEICO (SBS-G-MA) Y DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ÓXIDO DE GRAFENO (GO) 694

APLICACIÓN DE PROGRAMAS DE SIMULACION NUMERICA PARA EL ESTUDIO DE LA PRECIPITACION Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LAS SUPERALEACIONES INCONEL 713-C Y UDIMET 700 DESPUES DE SERVICIO EN TURBINAS DE AVIÓN 704

REDUCCIÓN DE LA VISCOSIDAD EN UN CRUDO PESADO CON CATALIZADORES BASE GRAFENO IMPREGNADO CON COBALTO Y MOLIBDENO 716

MATERIALES FOTOSENSIBLES CON VALOR AGREGADO AMBIENTAL PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN CELDAS SOLARES DE TERCERA GENERACIÓN 728

ANALISIS ESTADISTICO DE UN DISPOSITIVO PARA LA VALIDACIÓN DE LA MEDICION DEL MOVIMIENTO BRANQUIAL EN ABULONES MEDIANTE AL TECNICA DE DETECCIÓN SINCRONA 734

SISTEMA OPTOELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE MADURACIÓN EN NARANJAS USANDO REDES NEURONALES 741

DISEÑO DE UN BIO-REACTOR DE FIBRAS HUECAS INMERSAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA, PARA CUMPLIMIENTO DE LA NOM-003-SEMARNAT-1997 748

EXTRACCIÓN DE COLÁGENO DE CARNAZA BOVINA GENERADA APARTIR DEL PROCESO DE CURTIDO PARA IDENTIFICAR COLÁGENO TIPO I Y TIPO III 753

REQUIERIMIENTOS DE INFRAESTRUCTURA PARA UN GOBIERNO INTELIGENTE EN AMÉRICA LATINA 759

CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EXTREMO PARA DETERMINAR LA INUNDACIÓN COSTERA POR REBASE DE OLEAJE EN EL PUERTO DE VERACRUZ, VERACRUZ 769

COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE DOBLE FASE DP980 BAJO CONDICIONES DE CARGA CÍCLICA CONTROLADA POR DEFORMACIÓN 784

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS 794

IMPLEMENTACIÓN DE FALLAS EN UN INVERSOR DE CINCO NIVELES PUENTE H MEDIANTE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE SALIDA 801

IMPLEMENTACIÓN DE ASISTENCIA ELÉCTRICA A UNA BICICLETA 814

ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE FENOLES Y TANINOS PROVENIENTES DEL AGUACATE

Francisco Javier Pérez Ramírez[1,2], María de la Luz Delgadillo Torres[1], Miguel Ángel Vaca Hernández[1], Víctor Augusto Castellanos Escamilla[2], Mariana Bárcenas Castañeda[1]

[1] TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, [2]TecNM: Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

mbarcenas@tese.edu.mx.

RESUMEN

Se presenta un estudio computacional para determinar la eficiencia de inhibidores de corrosión de origen natural (fenoles y taninos) provenientes del aguacate como función de diferentes variables, utilizando la técnica computacional de dinámica molecular. Desde el punto de vista computacional, la eficiencia de los inhibidores se determina a través de la adsorción de las moléculas sobre la superficie metálica y la interacción de esta con el medio (electrolito), por lo tanto, se calcularon propiedades de las interacciones moleculares. Se construyeron y optimizaron las estructuras moleculares de las moléculas inhibidoras y la superficie metálica. Se desarrolló un modelo molecular y los scripts necesarios para realizar la dinámica molecular utilizando el programa GROMACS. Se reportan las estructuras y resultados de dinámica molecular, que demuestran la eficiencia de las moléculas como inhibidores de corrosión.

INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos han sido utilizados desde hace décadas en diversas áreas de la ciencia, tecnología y en general para cubrir necesidades de la vida diaria. Por su amplio uso, estos materiales se encuentran expuestos a diversas condiciones climáticas o condiciones de operación que pueden disminuir su periodo de vida útil. En específico, para aplicaciones de interés industrial (como base de herramientas, instrumentos, equipos, equipos, etc.), los materiales metálicos suelen estar en contacto con medios capaces de degradar sus propiedades superficiales y dar paso al fenómeno de la corrosión, el cual causa daño superficial y en ocasiones falla del material, provocando pérdidas económicas y en casos extremos hasta pérdidas humanas. Para contrarrestar los daños provocados por la corrosión, se han desarrollado técnicas, productos y procedimientos para controlar este fenómeno.

El desarrollo y uso de moléculas que inhiban o controlen la corrosión ha sido un tema de interés en las últimas décadas. Estas moléculas son compuestos de origen químico generalmente, que por sus características estructurales tienden a adsorberse sobre la superficie metálica y evitar en la mayor medida de lo posible se desarrollen las reacciones de oxido reducción que dan pie a la corrosión. La función de una molécula inhibidora es generar una capa protectora sobre la superficie y retardar la velocidad de corrosión, incrementando el tiempo de vida de los materiales. Los inhibidores pueden ser orgánicos, inorgánicos, naturales o sintéticos, su selección depende fuertemente del medio en el cual estarán inmersos y sus condiciones de operación.

Es bien sabido que muchas moléculas orgánicas tienen la capacidad de adsorberse sobre una superficie metálica, inhibiendo de esta forma el proceso de corrosión. A partir de este hecho, a lo largo de las décadas recientes se han desarrollado muchas moléculas inhibidoras de origen sintético con alta eficiencia para controlar la corrosión en superficies metálicas, sin embargo, se ha demostrado que algunas pueden ser toxicas (Marzorati et al., 2019). Lo anterior, limita su uso en aplicaciones como la industria alimenticia o farmacéutica. Lo anterior, ha establecido una necesidad de desarrollar componentes inhibidores que satisfagan las necesidades industriales, dando paso al uso de biomoléculas o moléculas de origen natural. Aunado a lo anterior, las políticas federales y sociales implementadas requieren materiales que sean amigables con el ambiente, por lo tanto, en la última década se han investigado moléculas inhibidoras de origen natural (Alrefaee et al., 2021; Marzorati et al., 2019). Diversas investigaciones se han dirigido a estudiar la eficiencia de moléculas

inhibidoras de la corrosión, principalmente desde el punto de vista experimental (Rani et al., 2011; Chigondo y Chigondo, 2015, Abdallah et al., 2018; Khan et al., 2015; Alrefaee et al., 2021; Marzorati et al., 2019), demostrando que son seguros, biodegradables, ecológicamente aceptables y renovables. Estudios han demostrado que el mecanismo de acción de estos inhibidores depende de la estructura del ingrediente activo (Chigondo y Chigondo, 2015), además de la naturaleza del metal, el medio de prueba, presencia de aditivos, temperatura, concentración de inhibidor, entre otros.

Las moléculas inhibidoras orgánicas presentan buena efectividad debido a su contenido de nitrógeno, oxigeno, átomos de sulfuro y enlaces múltiples en sus moléculas que facilitan su adsorción en la superficie metálica (Lgaz et al.,2018). De aquí, que los extractos de plantas, frutos y semillas son una alternativa para la obtención de moléculas inhibidoras de la corrosión; por lo que estos han sido probados en medios ácidos y alcalinos.

Se ha demostrado que la presencia de taninos, fenoles en general, alcaloides y flavonoides en los extractos naturales son los responsables de inhibir el proceso de corrosión. En este sentido, el aguacate, por su contenido (fenoles), ha demostrado ser una alternativa para obtener inhibidores de origen natural (Mu'azu et al., 2022). En este sentido, múltiples estudios se han realizado sobre el uso y eficiencia del aguacate como inhibidor de corrosión, sin embargo, no se ha establecido el mecanismo de acción de las moléculas inhibidoras con respecto a variables de interés industrial para su aplicación, como la temperatura, el pH, etc., que pueden limitar su actividad y por lo tanto su aplicabilidad y eficiencia (Sotelo-Mazon et al., 2020; Vorobyova et al., 2023; Gusti et al., 2019; Mu'azu et al., 2022).

Desde el punto de vista computacional, la eficiencia de los inhibidores se determinada a través de la adsorción de las moléculas sobre la superficie metálica y la interacción de esta con el medio (electrolito). En este sentido las herramientas de simulación molecular (Monte Carlo y Dinámica Molecular) representan una alternativa potencial para describir el proceso de inhibición del a corrosión (Verma et al., 2018). Diversos estudios demostraron que la simulación molecular permite proveer información solida acerca de las interacciones, orientaciones y otras propiedades de las moléculas inhibidoras sobre la superficie metálica, permitiendo establecer predicciones de efectividad para controlar el proceso de corrosión (Verma et al., 2018). Aunado a lo anterior, los experimentos computacionales son factibles desde el punto de vista económico y ambiental, ya que no requieren de la compra de insumos y no producen desechos dañinos.

Por lo tanto, las herramientas de simulación molecular se han tomado como una alternativa útil para el desarrollo de experimentos computacionales que permitan determinar la eficiencia de las moléculas inhibidores a partir de estudios de adsorción (Nabilah-Haris et al., 2020; Verma et al., 2018; Saha et al., 2015). En este sentido, el presente trabajo tiene por objetivo describir desde el punto de vista computacional, la eficiencia de inhibidores de corrosión de origen natural utilizando la técnica de dinámica molecular. Se utiliza como molécula inhibidora modelo el ácido gálico, por su alta presencia en el aguacate (dentro de los grupos fenoles y taninos).

TEORÍA

Inhibidor de corrosión.

Se definen como sustancias que se agregan en bajas concentraciones en un medio corrosivo para controlar el fenómeno de la corrosión, a través de disminuir o impedir las reacciones oxido-reducción, disminuyendo la velocidad de corrosión. Las moléculas inhibidoras se adsorben (a través de un proceso físico o químico, en algunos casos una combinación de ambos) sobre la superficie metálica gracias a que en su conformación cuentan con un grupo hidrofílico. Su estructura molecular usualmente también contiene una parte hidrofóbica cuya función es formar una capa estérica que inhiba la interacción del electrolito con la superficie metálica (ver Figura 1). Los inhibidores son componentes con acción especifica, es decir, desarrollados para actuar sobre un metal y/o medio en específico (Tejeda-Benítez et al., 2014). Existen diversas clasificaciones de los inhibidores de

corrosión, de acuerdo con su origen se clasifican como sintéticos, naturales y residuos (Alrefaee et al., 2021; Tejeda-Benítez et al., 2014). Los inhibidores sintéticos incluyen a los compuestos orgánicos e inorgánicos, en su mayoría, estos son tóxicos y tienden a ser difíciles en su degradación, por lo que en la última década se les considera no amigables con el ambiente. Los residuos son por lo general desechos como lodos. Los inhibidores naturales son aquellos cuyo origen proviene de plantas, animales o minerales; estos han tomado gran relevancia debido a que son productos no tóxicos para el ambiente. De los inhibidores naturales, los extractos de plantas tienen un gran potencial para reemplazar a los inhibidores sintéticos (Alrefaee et al., 2021). La eficiencia de estas moléculas depende de la estructura de la sustancia activa, sin embargo, uno de los principales retos para su uso es su solubilidad limitada en electrolitos polares y su fácil descomposición por efecto de variables como la temperatura.

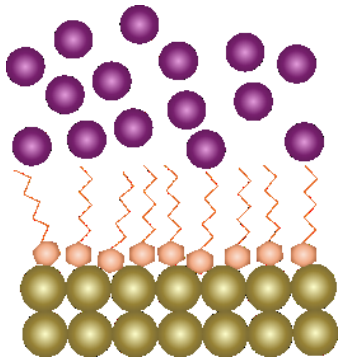


Figura 1. Representación esquemática del proceso de adsorción de una molécula inhibidora (moléculas color naranja) de corrosión sobre una superficie metálica (estructura color dorado) en presencia de un electrolito (moléculas color morado).

Dinámica Molecular.

La simulación molecular es una herramienta computacional numérica que permite estudiar y entender fenómenos físicos y químicos, con el objetivo de predecir, representar y modelar comportamientos de sistemas reales a condiciones que un experimento de laboratorio no puede abordar.

La simulación molecular abarca diversas técnicas computacionales, por ejemplo: Monte Carlo (MC), Dinámica Molecular (DM) y Dinámica browniana. El método de MC consiste en generar una serie de pasos con base en movimientos aleatorios que se aceptan o rechazan de acuerdo con una probabilidad. Las propiedades del sistema son el promedio de una serie de pasos de simulación. A diferencia de MC, DM, es un método dinámico, el cual se basa en resolver las ecuaciones de movimiento de Newton para el sistema de estudio (Frenkel, 2002), permitiendo obtener información de la trayectoria y propiedades de transporte.

La técnica de DM inicia con las macromoléculas que componen el sistema colocadas aleatoriamente en una caja de simulación de un determinado tamaño y forma (puede ser cubica, rectangular, esférica, etc.). Al inicio los componentes del sistema tienen una posición y velocidad inicial. Se calcula la energía potencial (es el producto de las fuerzas que actúan sobre cada átomo debido a los vecinos que lo rodean); posteriormente, se resuelves las ecuaciones de movimiento de Newton para calcular la aceleración de los átomos y la predicción de nuevas coordenadas para cada uno de ellos. Este proceso se repite para simular la trayectoria de cada átomo que compone el sistema y describe la configuración del sistema.

MÉTODOS

Se desarrollaron cálculos de dinámica molecular con base en el siguiente algoritmo:

I. Fijar parámetros de simulación: temperatura, densidad, tamaño de paso- tiempo, etc.
II. Colocar los componentes del sistema aleatoriamente en la caja de simulación especificando una posición inicial y velocidad.
III. Calcular la energía del sistema
IV. Calcular las fuerzas
V. Calcular la aceleración de las partículas
VI. Determinar la posición y velocidad de las partículas

La primera etapa (inicialización) consistió en construir la estructura metálica constituida por partículas de hierro con modelo cristalino Fe110. La estructura de hierro se generó utilizando el programa de visualización y construcción molecular AVOGADRO (Avogadro, 2022) con dimensiones de $\mathbf{30}$ Å en dirección x, y y z. Para la simulación DM se utilizó una caja cubica con condiciones de frontera en las 3 direcciones y dimensiones $\boldsymbol{L_x = L_y = L_z = 7.89}$.

La molécula de inhibidor modelo (ácido gálico) se construyó con el programa AVOGADRO (Avogadro, 2022) y se utilizó el generador de topología automatizado ATB (Malde et al., 2011; Stroet et al., 2018) como apoyo para la construcción de su topología.

La estructura de $\boldsymbol{Fe}$ se colocó en el centro de la caja de simulación rodeada por vacío, y se utilizó un campo de fuerza CHARMM. La topología del sistema se obtuvo utilizando la herramienta charmm-gui (Jo et al., 2008). Posteriormente se colocaron las partículas de ácido galico y finalmente se solvato el sistema con partículas de agua. Para el solvente se usó un campo de fuerza ITP3.

Posteriormente se colocaron las partículas de boro, ubicadas aleatoriamente en la caja de simulación. Se utilizó el generador de topología automatizado ATB (Malde et al., 2011; Stroet et al., 2018) como apoyo para la construcción de la topología del boro.

Se realizaron los cálculos de dinámica molecular utilizando el paquete GROMACS (GROMACS, s.f.), el cual es un paquete computacional de código abierto (licencia libre) para desarrollar cálculos de dinámica molecular, con licencia bajo los términos de Licencia Pública General Reducida (Lesser General Public License – LGPL) de GNU, versión 2.1. GROMACS posee la capacidad de simular las ecuaciones de movimiento de Newton para sistemas de gran tamaño (hasta millones de partículas).

La simulación del sistema de estudio se realizó siguiendo tres etapas, minimización de energía del sistema, con aproximadamente $5X10^3$ pasos de simulación, equilibrio del sistema con aproximadamente $1X10^6$ pasos de simulación y cálculo de propiedades con $3X10^6$ pasos de simulación ($\approx \boldsymbol{10ns}$).

RESULTADOS

El sistema de estudio se conforma por tres componentes: superficie metálica + inhibidor + electrolito, se consideró el ácido gálico como inhibidor natural modelo. Tal como se discutió en los antecedentes, los fenoles y taninos son compuestos que controlan el fenómeno de la corrosión de forma eficiente, el aguacate presenta un alto contenido de ambos. El ácido gálico, por su alto contenido, es representativo de la acción inhibitoria del aguacate.

Se construyó un modelo para describir las interacciones moleculares entre los componentes que integran el sistema de estudio: $\boldsymbol{Fe + C_7H_6O_5 + H_2O}$ (hierro + ácido gálico + agua) de acuerdo con los parámetros descritos en la sección de métodos. La molécula inhibidora se construyó en AVOGADRO (Avogadro, 2022) y se optimizó para obtener la estructura más estable (ver Figura 2). La estructura de hierro (Fe) con modelo cristalino 110 se colocó en el centro de la caja de simulación y su interacción se describió por el campo de fuerza CHARMM. Se desarrollaron los scripts con la topología de los componentes del sistema (extensión .top), posiciones iniciales de todas las moléculas del sistema con sus datos respectivos (extensión .gro), condiciones de simulación

(extensión .mdp) donde se especificó que las partículas de Fe no cambian de posición a través de restricciones, termostato utilizado, etc.

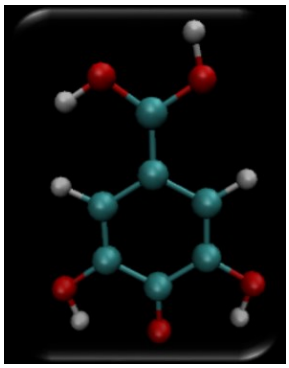


Figura 2. Estructura de la molécula inhibidora (ácido gálico).

El modelo se implementó en el paquete GROMACS y se desarrollaron cálculos de simulación. Para este estudio, se colocó la estructura metálica en el centro de la caja de simulación a vacío, posteriormente se ingresaron las moléculas inhibidoras en posiciones aleatorias y finalmente se solvato la caja de simulación con moléculas de agu estra en la Figura 3.

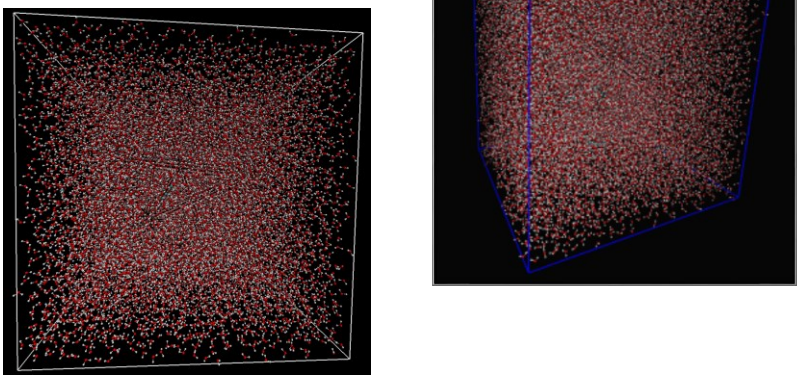


Figura 3. Imagen instantánea de caja de simulación del sistema $\boldsymbol{Fe + C_7H_6O_5 + H_2O}$.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos para el sistema de estudio. En los apartados a) y b), c) y d) se muestran imágenes instantáneas de las cajas de simulación, se eligió no colocar el solvente para apreciar el comportamiento del sistema con claridad. Como puede observarse, en los apartados a) y b) las partículas de la estructura metálica conservan su posición (no hay deformación del sólido), El 60% de las moléculas de inhibidor se adsorbieron sobre la superficie metálica de acuerdo con el alcance del potencial, mientras que las restantes se encuentran dispersas en el electrolito. La figura 4c y 4d es un acercamiento donde se muestra la adsorción del inhibidor sobre la superficie de $\boldsymbol{Fe}$,se puede observar la posición que toma la molécula inhibidora y el espacio que ocupa generando una especie de capa que evita el contacto del electrolito con el metal.

La Figura 5 reporta la energía potencial ($\boldsymbol{E_P}$) y la función de distribución radial ($\boldsymbol{g(r)}$) de la molécula inhibidora respectivamente para una temperatura de 25°C y un tiempo de 10 ns (10000ps). Las moléculas de ácido gálico presentan una energía potencial entre $\boldsymbol{-1.3525X10^6}$ y $\boldsymbol{-1.35X10^6}$, lo cual demuestra que estas tienden a adsorberse sobre la superficie metálica. Sin embargo, solo se observa un 60% de las moléculas adsorbidas. La función de distribución radial permite describir la variación de la densidad de las moléculas como función de la distancia tomando como referencia

una partícula del sistema. Como puede observarse en la figura 5, las moléculas de inhibidor adsorbidas están distribuidas a lo largo de la estructura metálica y aquellas que no se adsorbieron se encuentran en una posición distante de la superficie de $\boldsymbol{Fe}$. Esto se traduce en una baja tendencia a cubrir la superficie y forma una capa protectora para evitar el contacto del electrolito con el metal. La eficiencia de un inhibidor se mide por su capacidad de adsorción sobre la superficie metálica, para esta molécula se observa un porcentaje aceptable de adsorción, el cual puede incrementar si se aumenta la concentración de moléculas inhibidoras en el sistema.

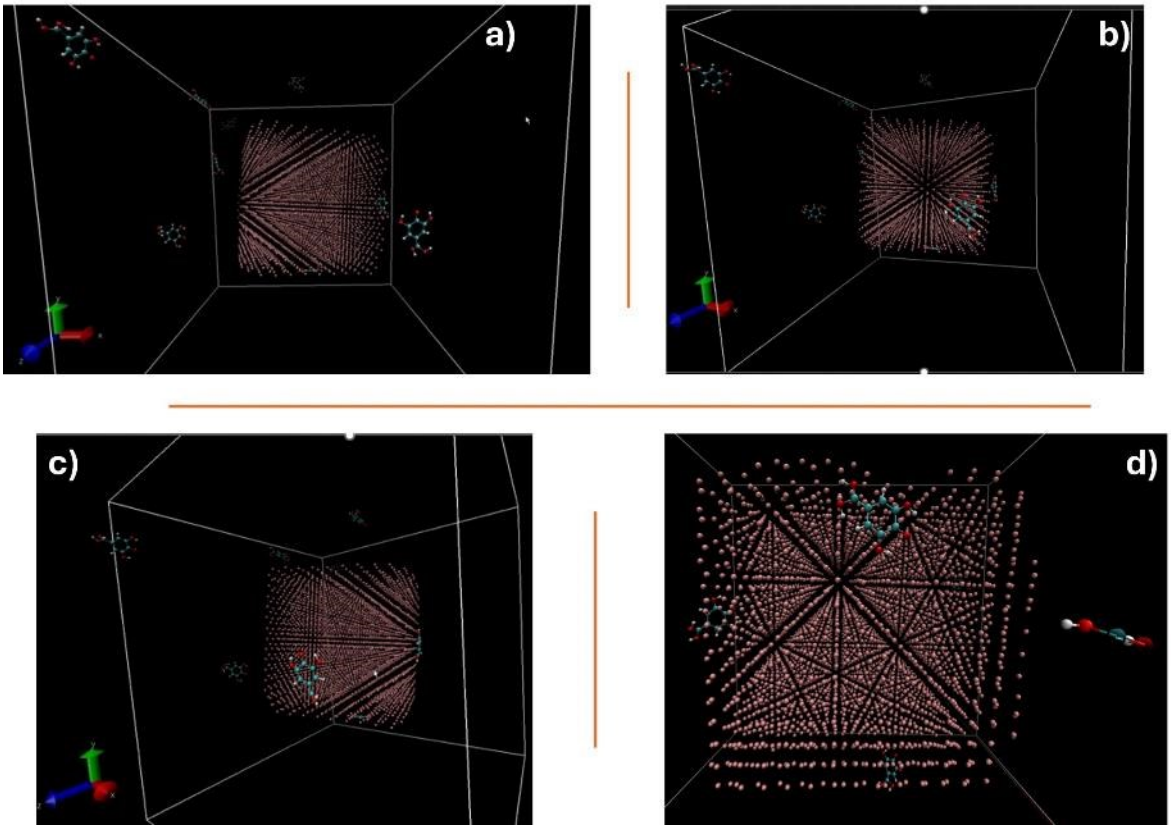


Figura 4. a), b) c) Imagen instantánea de estructura metálica + inhibidor ($\boldsymbol{Fe} + \boldsymbol{C_7H_6O_5}$) a $\boldsymbol{T = 25°C}$. d) Acercamiento de caja de simulación.

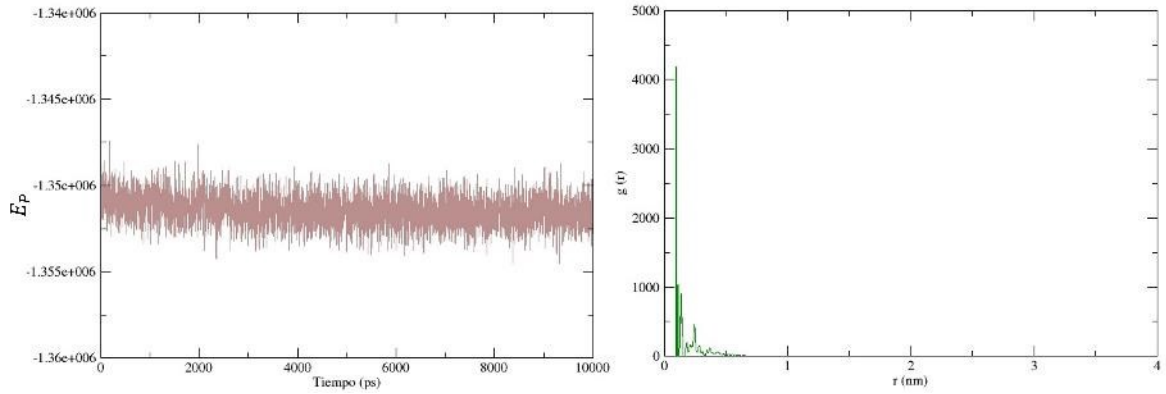


Figura 5. a) Energía potencial del inhibidor. b) Función de distribución radial del inhibidor.

CONCLUSIONES

Se desarrollo e implemento a la técnica de dinámica molecular un modelo para describir la eficiencia del ácido gálico como inhibidor en un sistema conformado por una superficie ferrosa y electrolito en el paquete GROMACS. Se realizo un estudio computacional para determinar la adsorción del inhibidor a temperatura de 25°C, como indicador de eficiencia para el control de la corrosión. Se estudió un sistema conformado por ácido gálico + superficie metálica + electrolito, siendo el ácido gálico seleccionado como molécula inhibidora modelo proveniente del aguacate. Los resultados de simulación muestran que la mayoría de las moléculas de inhibidor se adsorbieron sobre el metal, presentando un valor alto de energía, sin embargo, su distribución sobre la superficie, de acuerdo con los resultados de la g(r), no asegura formar una capa protectora para controlar la corrosión. Es recomendable incrementar la concentración de inhibidor y evaluar a la temperatura como variable de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.K. Malde, L. Zuo, M. Breeze, M. Stroet, D. Poger, P.C. Nair, C. Oostenbrink, A.E. Mark, “An Automated force field Topology Builder (ATB) and repository: version 1.0”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 7, 12, 2011, pp. 4026.
2. Avogadro: an open-source molecular builder and visualization tool. Version 1.97.0. http://avogadro.cc/.
3. B.E.A. Rani, B.B.J. Basu, “Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview”, *Int. J. Corr.* Vol. 2012, 2011, pp. 380217.
4. C. Verma, H. Lgaz, D.K. Verma, E.E. Ebenso, I. Bahadur, M.A. Quraishi, “Molecular dynamics and Monte Carlo simulations as powerful tools for study of interfacial adsoption behavior of corrosion inhibitors in aqueous phase: A review”, *J. Molecular Liquids, Vol.* 260, 2018, pp. 99.
5. D. Frenkel, B. Smit, “Understanding Molecular simulation. Computational Science Series” (Academic Press, New York, 2001) pp 63.
6. D. R. Gusti, I. Lestari, F. Farid, P. T. Sirait, “Protection of mild steel from corrosion using methanol extract of avocado (Persea americana mill) seeds in a solution of sulfuric acid”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 1282, 2019, pp. 012083.
7. GROMACS, s.f., recuperado de https://doi.org/10.5281/zenodo.11148638.
8. H. Lgaz, R. Salghi, A.C. Shubhalaxmi, S. Sodeh, K. Subrahmanya-Bhat, “Pyrazoline derivatives as possible corrosion inhibitors for mild steel in acidic media: a combined experimental and theoretical approach”, *Cogent Eng., Vol.* 5, 2018, pp. 144.
9. K. Mu’azu, M.M. Aliyu, A.T. Mohammed, S. Lasisi, R. Dahiru, I.Y. Suleiman, “Ethanol extract of avocado leaf as corrosion inhibitor for the protection of mild steel in acidic environment”, *J. Mater. Environ. Sci., Vol.* 13, 11, 2022, pp. 1343.
10. L.P. Tejeda-Benitez, P.J. Meza-Castellar, E.D. Altamiranda-Percy, M.J. Berrocal-Bravo, “Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión”, Informador Técnico, Vol. 78,2, 2014, pp. 155.
11. M. Chigondo, F. Chigondo, “Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview”, *J. Chem*. Vol. 2016, 2016, pp. 1.
12. M. Abdallah, H.M. Altass, B.A.A. Jahdaly, M.M. Salem, “Some natural aqueous extracts of plants as green inhibitor for carbon steel corrosion in 0.5M sulfuric acid”, *Green Chem. Lett. Rev.,* Vol. 11, 3, 2018, pp. 189.
13. M. Stroet, B. Caron, K. Visscher, D. Geerke, A.K. Malde A.E. Mark, “Automated Topology Builder version 3.0: Prediction of solvation free enthalpies in water and hexane”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 14, 11, 2018, pp. 5834.
14. N.I. Nabilah-Haris, S. Sobri, Y.A. Yusof, N.K. Kassim, “An overview of molecular Dynamic simulation for corrosion inhibition of ferrous metals”, *Metals, Vol.* 11, 1, 2021, pp. 46.
15. O. Sotelo-Mazon, S. Valdez, J. Porcayo-Calderon, J. Henao, C. Cuevas-Arteaga, C.A. Pobalno-Salas, L. Martinez-Gomez, “Evaluation of Corrosion Inhibition of 1018 Carbon Steel

using an Avocado Oil-Based Green Corrosion Inhibitor", *Prot. Met. Phys.Chem. Surf*., Vol. 56, 2020, pp. 427.
16. S. H. Alrefaee, K. Y. Rhee, Ch. Verma, M.A. Quaraishi, E.E. Ebenso, "Challenges and advantages of using plant extract as inhibitiors in modern corrosion inhibition systems: recent advancements", J. Mol. Liq., Vol. 321, 2021, pp. 114666.
17. S. Jo, T. Kim, V.G. Iyer, W. Im, "GHARMM-GUI: A web-based graphical user interface for CHARMM", J. Comput. Chem., Vol. 29, 2008, pp. 1859.
18. S. Marzorati, L. Verotta, S.P. Trasatti, "Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes", Molecules, Vol. 24, 1, 2019, pp. 48.
19. S. Saha, P. Ghosh, A. Hens, N.C. Murmu, P. Banerjee, "Density functional theory and moelcular dynamics simulation study on corrosion inhibition performance of mild Steel by mercapto-quinoline Schiff base corrosion inhibitor", *Physica E, Vol.* 66, 2015, pp. 332.
20. V. Vorobyova, M. Skiba, E. Gnatko, "Agri-food wastes extract as sustainable-green inhibitors corrosion of steel in sodium chloride solution: Aclose look at the mechanism of inhibiting action", South African *J. Chem. Eng., Vol.* 43, 2023, pp. 273.

APRECIACIÓN OBJETIVA EN EL APRENDIZAJE MATEMÁTICO EN EL ÁREA DE INGENIERÍA

María de la Luz Delgadillo Torres[1], Mariana Bárcenas Castañeda[1], Miguel Ángel Vaca Hernandez[1], Arturo Aguilar Pérez[2], Jacinto Cortés Pérez[2]

[1]TecNM/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
[2]UNAM/ Facultad de Estudios Superiores Aragón
ldelgadillo@tese.edu.mx

RESUMEN

A través de la historia, el conocimiento de las matemáticas ha jugado un papel relevante en todos los descubrimientos científicos hechos por el hombre y en la creación y mejoramiento de tecnología a través de la ingeniería. La adquisición de habilidades y competencias matemáticas es fundamental para lograr conocimientos específicos en el diseño, optimización y análisis de procesos que requieren la implementación de operaciones matemáticas; asimismo, este aprendizaje contribuye a la adquisición de discernimientos abstractos. En la formación de ingenieros, los docentes implementan estrategias digitales, grupales, individuales, cálculo mental y aprendizaje basado en problemas, para contribuir en la adquisición y fortalecimiento de competencias matemáticas. Por otro lado, para medir el índice de avance estudiantil y establecer estrategias de recuperación, los docentes deben efectuar la valoración del aprendizaje. En la presente investigación, por medio de la metodología cuantitativa, se establecieron los elementos que integran la evaluación objetiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje de matemáticas en el área de ingeniería. Utilizando una muestra de estudio integrada por 53 estudiantes del área de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE). Para el estudio cuantitativo, se construyó un cuestionario 34 preguntas referentes a la evaluación objetiva, validado estadísticamente mediante la determinación del Coeficiente Alfa de Cronbach. Asimismo, se calcularon las variables descriptivas de tendencia central y variabilidad. Los resultados estadísticos demuestran que, los rubros de examen, tarea y ejercicios en clase son los elementos primordiales en la valoración objetiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje matemático.

INTRODUCCIÓN

La adquisición de conocimientos matemáticos es fundamental para los estudiantes que se encuentran cursando cualquier ingeniería. El aprendizaje de las matemáticas permite desarrollar habilidades para identificar, interpretar, representar y modelar problemas que requieran el uso de operaciones matemáticas. Del mismo modo, el aprendizaje de cálculo contribuye a la adquisición de competencias implementadas para la ejecución de problemas complejos como funciones vectoriales, geometría del espacio, derivadas (básicas y parciales), integrales (básicas e iteradas) e interpretación de fenómenos físicos y a nivel ingenieril. Derivado de la complejidad de esta ciencia, los estudiantes universitarios pueden presentar dificultades cognitivas, pedagógicas, analíticas, reflexivas e interpretativas. Para disminuir dichos inconvenientes, los docentes implementan diversas estrategias educativas y digitales, que contribuyen en la adquisición de competencias específicas.

Cabe resaltar que, dentro de la dualidad enseñanza-aprendizaje la ponderación de los conocimientos alcanzados es indispensable, para efectuar la retroalimentación y definir los medios de recuperación académica estudiantil. En el presente trabajo para definir los elementos que integran la evaluación objetiva en la adquisición de saberes matemáticos se construyó un cuestionario *Google Drive*, el cual se validado estadísticamente por medio del cálculo del coeficiente Alfa de Cronbach. Consecutivamente, el instrumento autentificado se aplicó asincrónicamente a la muestra de estudio, integrada por estudiantes del área de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), institución perteneciente al Tecnológico Nacional de México (TecNM). Con los resultados del cuestionario se determinarán los estadísticos descriptivos de tendencia central y variabilidad, utilizando el software Minitab 19.

TEORÍA

1. Principios de la evaluación.

La evaluación del aprendizaje en la enseñanza presencial o en su modalidad a distancia, se considera cuatro principios primordiales: confiabilidad, validez, objetividad y autenticidad, los cuales se describen a continuación [Trelles et al., 2017; Quesada, 2006].

a) ***Confiabilidad.*** El diseño de los instrumentos valorativos debe concordar con el objetivo de la asignatura, contenido programático y debe reflejar el nivel de logro del educando. En la educación presencial, la adquisición de conocimientos del alumnado se aprecia en la participación grupal, individual, forma de comunicarse, entrega de tareas y elaboración de exámenes. En cambio, en la educación a distancia, la apreciación del avance se logra a través de las actividades y ejecución de los instrumentos valorativos.
b) ***Validez.*** Se refiere a que el instrumento de apreciación debe reflejar el dominio del tema; dicho de otro modo, que su estructura abarque la mayoría del contenido revisado en clase, expresado en algunas preguntas o actividades, lo cuales manifiesten los saberes (saber hacer y saber). En la educación a distancia, los instrumentos prueban su validez de constructo, contenido y aparente; por lo cual se diseñan al mismo tiempo que se estructura el curso completo. También, en la educación tradicional, de acuerdo con los escenarios educacionales, se ajustan los instrumentos a las necesidades académicas.
c) ***Objetividad.*** La valoración se debe efectuar sin favoritismos, perjuicio, corrupción y considerando atributos no establecidos en la evaluación. Para evitar juicios subjetivos, es importante utilizar instrumentos de tasación como las rubricas. En la educación en línea, se verifica la objetividad de los instrumentos de evaluación de conocimientos de acuerdo con los estándares de valoración.
d) ***Autenticidad.*** El instrumento de evaluación debe considerar ejemplos de situaciones semejantes a la realidad, en la cual, los estudiantes logren aplicar los conocimientos adquiridos. En el entorno virtual, el uso de simuladores contribuye a la autenticidad valorativa.

2. Instrumentos de evaluación del aprendizaje.

Los instrumentos de valoración del aprendizaje ampliamente utilizados se describen a continuación [Quesada, 2006].

a) ***Prueba objetiva.*** En la educación en línea, es ampliamente utilizada, en donde el educador utiliza instrumentos de un banco de reactivos, los cuales se califican automáticamente.
b) ***Preguntas intercaladas***. Consiste en la formulación de cuestionamientos para verificar el índice de comprensión. En la educación presencial, esta acción se efectúa de forma espontánea sin planearse. En la educación en línea, se ejecuta de forma planeada y con un propósito educativo.
c) ***Prueba adaptativa y autoadaptada.*** Se aplican a través de un equipo de cómputo. La prueba adaptativa se estructura de forma individual de acuerdo con las habilidades particulares de cada estudiante. En la prueba autoadaptativa, el estudiante elige el nivel de complejidad de los cuestionamientos. En la educación presencial son escasamente utilizadas; en cambio, en la educación a distancia se utilizan con mayor frecuencia, debido a las cualidades del diagnóstico personal.
d) ***Prueba de ensayo.*** En este tipo de prueba, el educando debe describir ampliamente los cuestionamientos propuestos, en el cual puede integrar conocimientos, experiencias y observaciones. Este instrumento se utiliza con mayor frecuencia en la educación tradicional y en la educación a distancia requiere la intervención del tutor o asesor del grupo.

e) ***Proyecto.*** Consiste en la elaboración de un informe o proyecto, el cual debe de cumplir diferentes características de extensión, formato y calidad de la redacción. En la educación tradicional y en modalidad a distancia es altamente utilizada.
f) ***Lista de verificación.*** Ayuda a llevar un registro de las habilidades que posee el estudiante. En la educación tradicional se emplea para valorar el avance en actividades prácticas. En la educación a distancia se implementa para la ejecución de la autoevaluación.
g) ***Escalas.*** Instrumento utilizado para verificar las cualidades de las actividades; se clasifica en numérica, gráfica y descriptiva. Se utiliza ampliamente en la educación online, como instrumento verificador.
h) ***Rúbricas.*** Es un instrumento que describe la calidad y escala de las actividades. Se utiliza constantemente en ambas modalidades educativas.
i) ***Portafolio.*** Como su nombre lo indica, es un instrumento que guarda las evidencias de la evaluación como: tareas, trabajos, exámenes, proyectos, por nombrar algunos. En educación presencial es una carpeta de evidencias y en educación online es un archivo electrónico.
j) ***Mapa conceptual.*** Es la representación esquemática de los conceptos más importantes, empleada como estrategia educativa y como elemento de apreciación. Se utiliza con frecuencia en la educación tradicional y a distancia.

3. Medios de evaluación.
La evaluación del aprendizaje en la enseñanza tradicional o en su modalidad a distancia, se efectúa por diferentes medios [Quesada, 2006].

a) ***Impresos.*** Se utiliza en la educación tradicional como medio de valoración de los conocimientos alcanzados.
b) ***Medios sincrónicos.*** Se refiere a los métodos de comunicación digital implementados como instrumento de apoyo en el aprendizaje como: chat, audioconferencias y videoconferencias. Este medio de evaluación es frecuentemente utilizado en la educación online.
c) ***Medios asincrónicos.*** Son medios en el cual la comunicación se presenta de forma diferida; por ejemplo, página web, foro de discusión y correo electrónico. Este tipo de valoración se utiliza comúnmente en la educación a distancia.

4. Importancia de los conocimientos matemáticos en ingeniería.
La matemática es una ciencia básica exacta comisionada para estudiar diferentes saberes como: aritmética, álgebra, cálculo, geometría, teoría de juegos, probabilidades y estadística; también se aplica en diferentes áreas del conocimiento como ingeniería, física, económica, arquitectura, informática, entre otras. Esta ciencia formal se encuentra estrechamente ligada con el desarrollo de habilidades matemáticas necesarias para adquirir conocimientos en el área de ingeniería; debido a que las asignaturas que integran la formación académica en este nivel, requieren el desarrollo de conocimientos matemáticos para estudiar funciones de varias variables, estudio de distribuciones de espacio vectorial, modelización aplicando ecuaciones diferenciales, programación de algoritmos lineales, optimizar recursos y procesos, ajustes de regresiones numéricas y programación lógica matemática [Melo, 2003].

Por otro lado, los ingenieros durante su formación profesional deben desarrollar las siguientes capacidades [Trejo et al., 2013]:

- Comprensión de conocimientos matemáticos y físicos, los cuales son básicos para todas las especialidades. Aunado a la práctica, instrumentación, aplicación de tecnologías y conocer fundamentos empresariales.
- Habilidad para utilizar información técnica y estadística; capacidad para implementar simuladores computacionales para resolver problemas técnicos, desarrollar proyectos

multidisciplinarios. Aplicar conocimientos de calidad en la producción y mantenimiento de productos y servicios. Capacidad para comunicarse efectivamente.

- Formación ética; la cual es fundamental para dirigirse en todo momento con respeto, responsabilidad y conciencia en los diferentes ámbitos sociales, ambientales y profesionales.

Como se puede apreciar, las habilidades en el estudio de la ingeniería se basan en gran medida en el conocimiento, manejo y aplicación de la matemática. A tenor de lo anterior, en la fase didáctica los estudiantes fortalecen las competencias matemáticas como: pensar matemáticamente, planear y resolver problemas propios, modelar, utilizar simbología, comunicación matemática y uso de nuevas tecnologías aplicadas a las matemáticas [Trejo et al., 2013].

5. Procedimientos estadísticos.

5.1. Alfa de Cronbach.

El método de consistencia interna es el más utilizado para estimar la fiabilidad de pruebas, escalas o test; cuando se implementan diferentes reactivos que midan el mismo atributo. El coeficiente Alfa de Cronbach es un modelo de consistencia interna, ampliamente utilizado para establecer la confiabilidad de las correlaciones entre las variables que conforman una escala de apreciación [Ledesma et al., 2002; González-Pazmiño, 2015]. La fiabilidad calculada dependerá del número y la covarianza entre los ítems; es decir, el coeficiente calcula la fiabilidad del test en función de dos términos: el número de ítems (longitud de la prueba) y la proporción de la varianza total de la prueba generada por la covarianza entre sus reactivos [Ledesma et al., 2002].

Las escalas del coeficiente para establecer el índice de confiabilidad son: 1= Confiabilidad perfecta, >0.9 Excelente, >0.8 Bueno, >0.7 Aceptable, >0.6 Cuestionable, >0.5 Pobre y <0.5 No es aceptable. Cabe resaltar que, la consistencia interna se considera aceptable cuando se obtiene un valor de Alfa de Cronbach dentro del intervalo de 0,7-1, en donde el resultado varía con base en la población analizada. Es decir, el valor mínimo aceptable es 0.7, lo cual indica que existe una elevada relación entre las preguntas; los valores menores a 0.7 presentan una relación débil [Tuapanta et al., 2017; Oviedo et al., 2005].

5.2. Variables descriptivas.

Las variables descriptivas se clasifican en: medida de tendencia central, de variabilidad y distribución de frecuencias [Quevedo, 2011].

5.2.1. Medidas de tendencia central.

Las medidas de tendencia central son parámetros estadísticos empleados para resumir un conjunto de valores, expresado en un solo término numérico. Asimismo, como su nombre lo indica, es el elemento ubicado en el centro del conjunto de valores; las medidas comúnmente utilizadas son: media, mediana y moda, las cuales se describen a continuación [Quevedo, 2011]:

a) **Media.** La media o promedio aritmético (μ), es la suma de todos los datos divididos entre el número de datos.
b) **Mediana.** Es el valor de la variable que se encuentra en la posición central, al ordenar los valores de acuerdo con su magnitud.
c) **Moda.** Es el valor que se repite con mayor frecuencia en la serie de datos.

5.2.2. Medidas de variabilidad.

Las medidas de variabilidad o dispersión son números que indican la movilidad entre la variable con respecto a otra. Los valores de variabilidad son utilizados para resumir en un valor único, la dispersión presente entre una serie de datos. Las medidas de variabilidad más comunes son: rango, desviación estándar y varianza [Quevedo, 2011].

a) **Rango.** Es la diferencia entre la variable de mayor valor y la de menor valor. Es decir; Máximo-Mínimo.
b) **Desviación estándar** (σ o S)**.** Medida de dispersión que indica la diferencia con respecto a la media. Específicamente, es la raíz cuadrada de la varianza.
c) **Varianza.** Se simboliza como σ^2 o S^2, se define como la media de las diferencias cuadradas de "n" elementos con respecto a su media aritmética.

PARTE EXPERIMENTAL

Inauguralmente, se construyo un cuestionario Google Drive, el cual está conformado por 34 preguntas en 6 secciones. Específicamente: 7 preguntas sobre el material didáctico (PA), 9 ítems de comunicación objetiva (PB), 5 cuestionamientos de retroalimentación objetiva y oportuna (PC), 5 interrogaciones sobre los tipos de problemas implementados en el curso (PD), 4 preguntas de método de evaluación (PE) y 4 preguntas sobre los factores que favorecen el aprendizaje (PF); utilizando una valoración máxima de 4 puntos y mínima de un punto. El instrumento antes de su aplicación fue validado estadísticamente, por medio del software Minitab-19, logrando una consistencia interna de 0.9 de Coeficiente Alfa de Cronbach. El cuestionario fue compartido asincrónicamente, con los resultados obtenidos se calcularon estadísticos descriptivos. El cuestionario fue respondido por 53 estudiantes del área de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE). La Figura 1 muestra el procedimiento experimental de forma concreta.

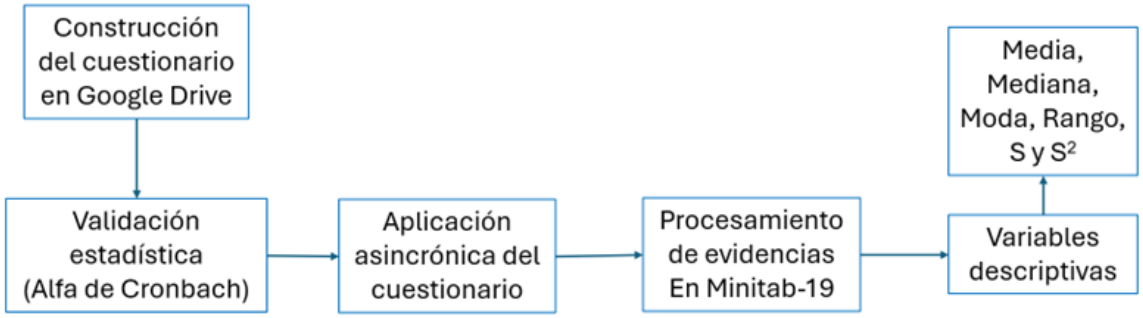


Figura 1. *Procedimiento experimental.*

RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en el cuestionario se calculó estadísticos (media mediana, moda, rango, desviación estándar y varianza) y porcentajes de valoración para cada pregunta, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Análisis estadístico descriptivo del cuestionario.*

Pregunta	Estadísticos						Valoración			
							Porcentaje (%)			
	Media	Mediana	Moda	Rango	σ	σ^2	*1*	*2*	*3*	*4*
PA-1	3.45	4	4	3	0.70	0.48	1.89	5.66	37.74	52.83
PA-2	3.60	4	4	3	0.60	0.36	1.89	0.00	33.96	64.15
PA-3	3.64	4	4	3	0.59	0.35	1.89	0.00	30.19	67.92

PA-4	3.66	4	4	3	0.62	0.38	1.89	1.89	24.53	71.70
PA-5	3.68	4	4	3	0.58	0.34	1.89	0.00	26.42	71.70
PA-6	3.53	4	4	3	0.67	0.45	1.89	3.77	33.96	60.38
PA-7	3.62	4	4	3	0.63	0.39	1.89	1.89	28.30	67.92
PB-1	3.58	4	4	1	0.50	0.25	0.00	0.00	41.51	58.49
PB-2	3.77	4	4	2	0.47	0.22	0.00	1.89	18.87	79.25
PB-3	3.70	4	4	1	0.46	0.21	0.00	0.00	30.19	69.81
PB-4	1.68	1	1	3	1.01	1.03	62.26	16.98	11.32	9.43
PB-5	1.40	1	1	3	0.86	0.74	79.25	7.55	7.55	5.66
PB-6	3.57	4	4	3	0.77	0.59	5.66	0.00	26.42	67.92
PB-7	3.49	4	4	3	0.75	0.56	1.89	9.43	26.42	62.26
PB-8	3.74	4	4	1	0.45	0.20	0.00	0.00	26.42	73.58
PB-9	3.74	4	4	2	0.49	0.24	0.00	1.89	22.64	75.47
PC-1	3.32	3	3	2	0.67	0.45	0.00	11.32	45.28	43.40
PC-2	3.43	4	4	2	0.67	0.44	0.00	9.43	37.74	52.83
PC-3	3.57	4	4	2	0.54	0.29	0.00	1.89	39.62	58.49
PC-4	3.47	4	4	2	0.64	0.41	0.00	7.55	37.74	54.72
PC-5	1.75	1	1	3	1.09	1.19	60.38	16.98	9.43	13.21
PD-1	3.40	4	4	3	0.88	0.78	7.55	3.77	30.19	58.49
PD-2	3.57	4	4	2	0.60	0.37	0.00	5.66	32.08	62.26
PD-3	3.75	4	4	1	0.43	0.19	0.00	0.00	24.53	75.47
PD-4	3.64	4	4	2	0.56	0.31	0.00	3.77	28.30	67.92
PD-5	3.68	4	4	2	0.55	0.30	0.00	3.77	24.53	71.70
PE-1	3.64	4	4	2	0.52	0.27	0.00	1.89	32.08	66.04
PE-2	3.34	4	4	3	0.96	0.92	7.55	11.32	20.75	60.38
PE-3	3.62	4	4	2	0.56	0.32	0.00	3.77	30.19	66.04
PE-4	3.66	4	4	2	0.52	0.27	0.00	1.89	30.19	67.92
PF-1	3.68	4	4	2	0.55	0.30	0.00	3.77	24.53	71.70
PF-2	3.57	4	4	2	0.54	0.29	0.00	1.89	39.62	58.49
PF-3	3.72	4	4	1	0.45	0.21	0.00	0.00	28.30	71.70
PF-4	3.70	4	4	2	0.54	0.29	0.00	3.77	22.64	73.58

En el mismo contexto, los resultados obtenidos son representados gráficamente, como: porcentajes obtenidos por cada valoración para cada cuestionamiento (ver Figura 2), mediadas de tendencia central (ver Figura 3) y medidas de variabilidad (ver Figura 4).

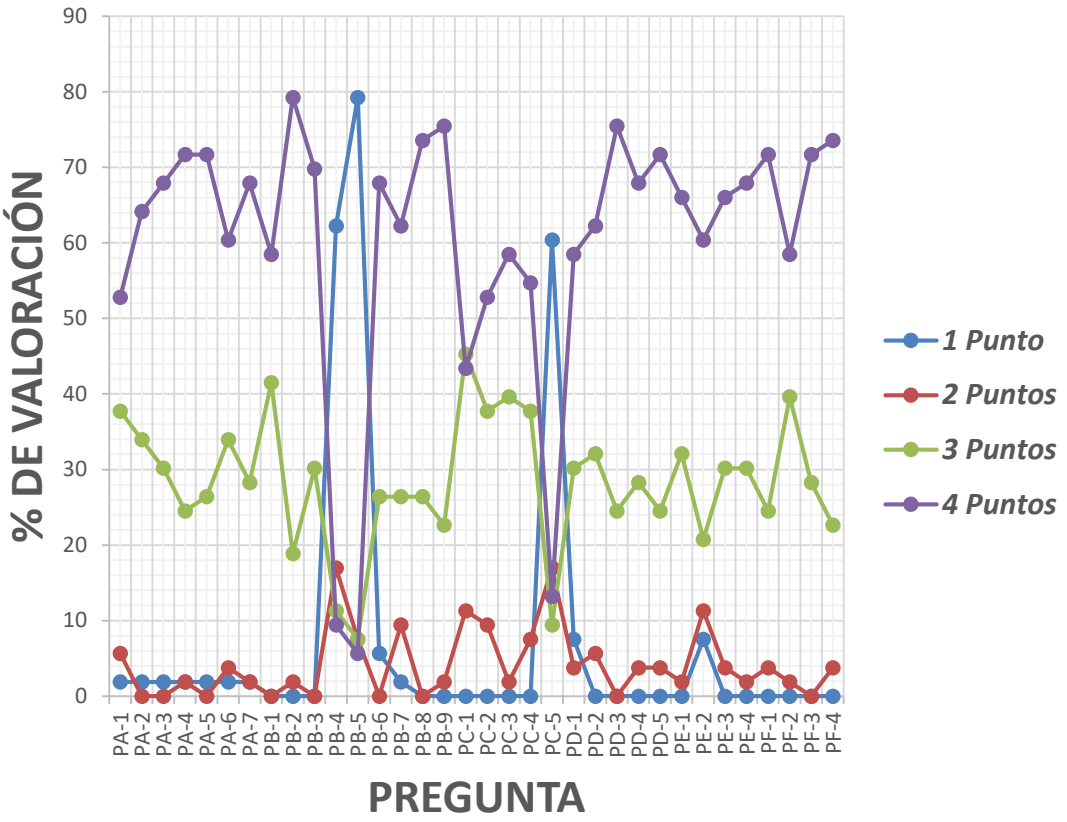


Figura 2. *Valoración porcentual.*

La Tabla 1 y la Figura 2, muestra los resultados de las respuestas de forma porcentual, en las cuales destaca que del 0 - 8% de los estudiantes asignaron la mínima valoración (1 punto) para 31 preguntas de las 34 que integran el formulario. De forma semejante del 0 – 8% de los alumnos, establecieron una valoración de 2 puntos (algunas veces) para 31 preguntas. Por otro lado, para la valoración de 3 puntos del 20 – 41% de los educandos considera que frecuentemente se requiere el uso de material de apoyo, asesorías, tipos de ejercicios y cualidades del docente que contribuyen en la adquisición de competencias matemáticas. En el mismo contexto del 52 -79% de los estudiantes asignaron la valoración máxima (4 puntos), para establecer que los elementos que contribuyen significativamente en la adquisición de conocimiento de cálculo vectorial son: tipos de materiales didácticos, comunicación efectiva, retroalimentación objetiva y oportuna, tipos de problemas usados en el curso y método de evaluación.

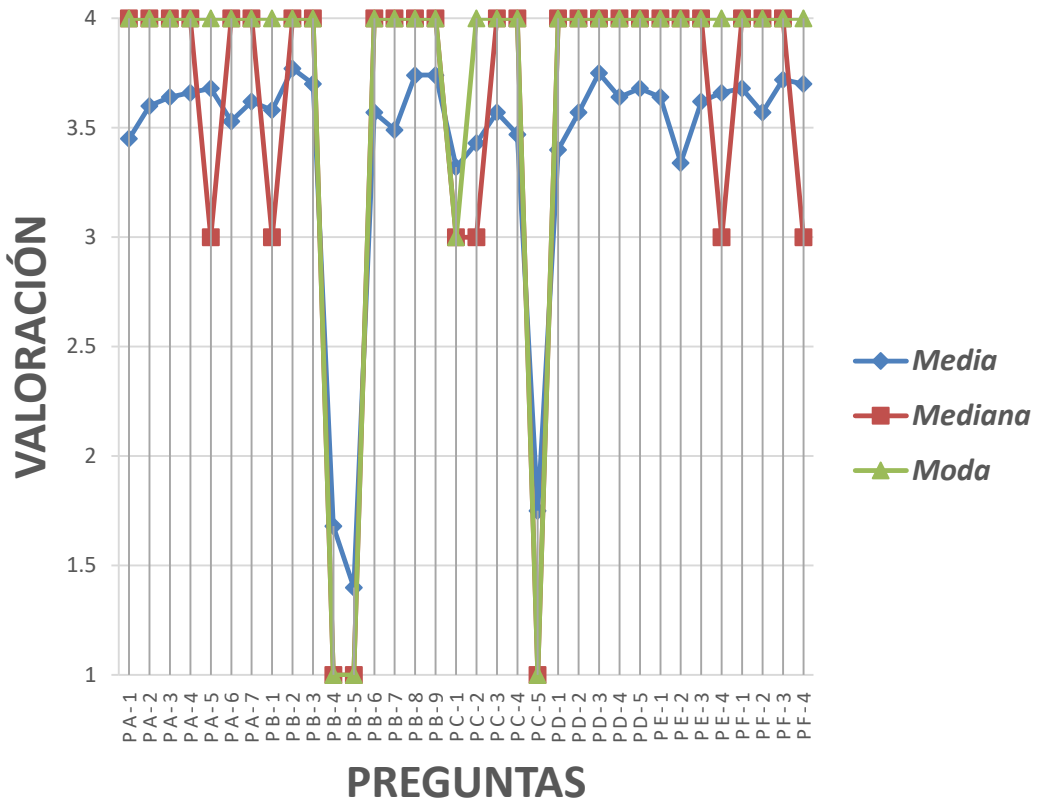


Figura 3. *Medidas de tendencia central.*

Por otro lado, los resultados de la Tabla 1 y Figura 3, referentes a los cálculos estadísticos de medidas de tendencia central. Muestra que, los valores obtenidos en la mediana indican que los educandos asignaron la valoración más alta (4 puntos) para 30 preguntas que integran el formulario, para la pregunta PC-1 (el profesor realiza retroalimentación de las tareas escritas enviadas) se asignó una mediana que indica una valoración de 3 puntos (frecuentemente) y para las preguntas PB-4 (el docente no permite el planteamiento de dudas durante su exposición, es decir no permite interrupciones), PB-5 (el docente no responde a los cuestionamientos presentados o evita las sesiones de preguntas y respuestas) y PC-5 (el docente no presenta alternativas para efectuar preguntas que requieren retroalimentación como asesorías, preguntas en clase y tareas) se asignó una valoración más baja (1 punto-nunca). Los resultados obtenidos con mayor frecuencia muestran una proliferación de la valoración más alta (4 puntos). Mientras que, los valores de la moda muestran un alto grado de satisfacción con los factores propuestos que favorecen la adquisición de aprendizajes matemáticos.

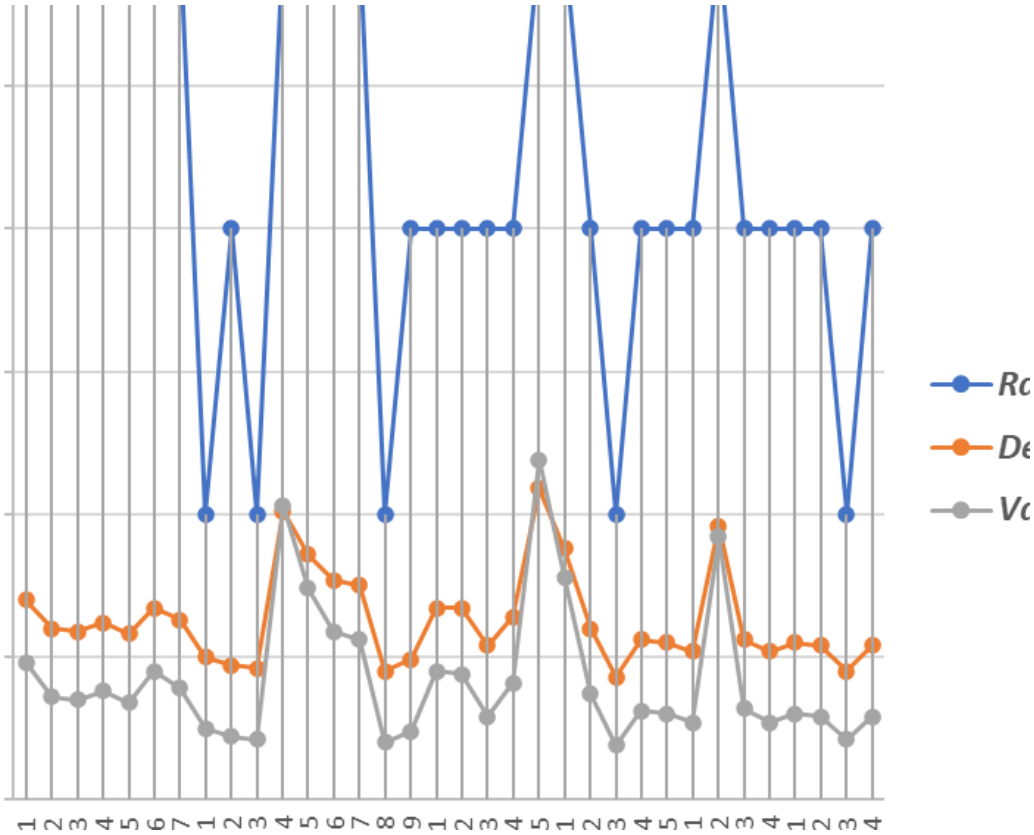


Figura 4. *Medidas de variabilidad.*

Con referencia a los resultados estadísticos de la amplitud, presentan un intervalo entre el valor máximo (4 puntos) y valor mínimo (1 puntos), el cual nos da una idea de la dispersión de los datos obteniendo valores de 3 puntos (Frecuentemente) en 14 reactivos del cuestionario, 2 puntos (algunas veces) para 15 preguntas y 1 punto (Nunca) para 5 preguntas. Los resultados de la desviación estándar que indica que tan disperso están los datos con respecto a la media, se encuentran entre un rango de 0.4 – 1, indicando que es un valor esperado, cercano a la media. En tanto que, la medida de variabilidad que describe el grado de homogeneidad del grupo de las observaciones presenta valores dentro del intervalo 0.2 – 1, lo cual indica valores de media confiable (ver Tabla 1 y Figura 4).

De forma general, la valoración estadística y porcentual de las respuestas referentes al método de evaluación (PE), indican que los estudiantes proporcionan una alta valoración (>60%) en examen, tarea y ejercicios colaborativos en clase, considerados como los elementos mínimos que debe integrar la evaluación objetiva en asignaturas de matemáticas.

CONCLUSIONES

La importancia del estudio del cálculo vectorial radica principalmente en la capacidad de análisis y síntesis en actividades de modelación matemática a través de un lenguaje sencillo, pero sin perder la profundidad del estudio que los temas requieren. Para dar una respuesta a los objetivos planteados fue necesaria la construcción de un cuestionario en Google Drive y con los resultados obtenidos se determinaron las variables descriptivas y de tendencia central permitiendo concluir que el tipo de materiales didácticos (audiovisual y escrito), comunicación efectiva (docente-educando), retroalimentación objetiva y oportuna (revisión de tareas, respuesta asesorías y dudas), tipos de problemas usados en el curso (presentación de ejercicio de mínima complejidad a máxima complejidad) y método de evaluación (consideración de la participación, tareas y examen); son

elementos que contribuyen al aprendizaje de cálculo vectorial. Lo anterior se debe a que 52-79% de estudiantes asignaron la puntuación máxima en la valoración y del 0–8% de estudiantes una mínima valoración (1 y 2 puntos). Por lo tanto, el método utilizado muestra que los alumnos requieren de diferentes materiales y estrategias didácticas para el correcto aprendizaje del cálculo vectorial. Asimismo, de acuerdo con los resultados estadísticos y porcentuales, el examen, la tarea y la solución de ejercicios, son elementos que se deben considerar en la valoración objetiva de conocimientos matemáticos a nivel ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

1. González A. y Pazmiño M. (2015). Cálculo e interpretación del Alfa de Cronbach para el caso de validación de la consistencia interna de un cuestionario, con dos posibles escalas tipo Likert. *SSOAR Open Access Repository*. 2(1), 62-67.
2. Ledesma R., Molina G. y Valero P. (2002). Análisis de consistencia interna mediante Alfa de Cronbach: un programa basado en gráficos dinámicos. *Psico-USF*, 7(2), 143-152.
3. Melo M. (2003). Las matemáticas en la ingeniería a través de la historia. *Ciencia e ingeniería neogranadina,* (13), 53-60.
4. Oviedo H. y Campo A. (2005). Aproximación del coeficiente alfa de Cronbach. *Revista colombiana de Psiquiatría*, XXXIV (4), 572-580.
5. Quesada R. (2006). Evaluación del aprendizaje en la educación a distancias “en línea”. *RED. Revista de Educación a Distancia,* 6. https://www.um.es/ead/red/M6
6. Quevedo F. (2011). Medidas de tendencia central y dispersión. Medware, 9(3), 1-6.
7. Trejo E., Camarena P. y Trejo N. (2013). Las matemáticas en la formación de un ingeniero: la matemática en contexto como propuesta metodológica. *REDU Revista de docencia Universitaria,* 11, 397-424.
8. Trelles, C., Bravo, F. y Barrazueta, J. (2017). ¿Cómo evaluar los aprendizajes en matemáticas? INNOVA Research Journal, 2(6). 35-51.
9. Tuapanta, D., Duque, V., y Mena, R. (2017). Alfa de Cronbach para validar un cuestionario de uso de TIC, en docentes universitarios. *Descubre*, 37-48.

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE PRODUCCIÓN EN SUELAS VULCANIZADAS MEDIANTE HERRAMIENTAS VISUALES: EL RITMO DE TRABAJO BAJO EL ENFOQUE LEAN

José Ramón Gómez Armenta, Carlos Emilio Ibarra Padilla, Armando Mares Castro y Marcela Palacios Ortega

[1]Institución Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón. Blvd. Del Valle # 2301, Guardarrayas, C.P. 36413, Purísima del Rincón, Guanajuato, México.
ramon.ga@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

En la industria del calzado, la producción de suelas vulcanizadas es un proceso crítico que requiere eficiencia y control para garantizar la calidad del producto final. Sin embargo, muchos fabricantes enfrentan desafíos en términos de control de producción, tiempos de ciclo y desperdicio. En este contexto, la aplicación de principios Lean junto con herramientas visuales y ritmo de trabajo puede ofrecer soluciones efectivas para mejorar el control de producción y optimizar el proceso de fabricación. Mediante el Análisis de Problemas Actuales, se identificaron los desafíos actuales en el proceso de producción de suelas vulcanizadas, como tiempos de ciclo inconsistentes, fluctuaciones en la calidad y falta de visibilidad en el estado del proceso. Asimismo, se desarrollaron herramientas visuales como los tableros de control, Kanban, andón y marcado para mejorar la visibilidad y el seguimiento del proceso de producción. Estas herramientas ayudaron a identificar fácilmente los problemas, a optimizar el flujo de trabajo y promover la comunicación efectiva entre los equipos. La Implementación de Ritmo de Trabajo utilizaremos el concepto de ritmo de trabajo para establecer un flujo de producción constante y balanceado. Mediante la estandarización de tiempos de ciclo, la asignación eficiente de recursos y la eliminación de cuellos de botella se logró mejorar la productividad y reducir los tiempos de espera. Un aspecto importante para desarrollar en el puesto de trabajo es el entrenamiento y empoderamiento de Empleados: Es crucial capacitar a los empleados en los nuevos procesos y herramientas Lean, así como proporcionarles entrenamiento para identificar y resolver problemas en tiempo real. Fomentaremos una cultura de mejora continua donde todos los miembros del equipo contribuyan activamente a la optimización del proceso de producción. Mediante estas aplicaciones de lean se estandarizaron de los puestos de trabajo mediante la incorporación de las herramientas señaladas para la estabilización de las estaciones de trabajo. Adicionalmente, con la metodología propuesta se redujeron los tiempos un 30% dentro de ellos con su estandarización y reducción de las mudas, se observó, además, que los operadores trabajan en forma ordenada y limpia para realizar sus actividades, desarrollando una cultura adecuada para el cumplimiento de las metas planteadas para la jornada laboral. Con lo anterior se logró un enfoque de calidad y reducción de los retrasos en la programación de producto en tiempo cumpliendo con la demanda del cliente. La implementación de herramientas visuales y ritmo de trabajo bajo el enfoque Lean puede mejorar de forma significativa el control de producción. Al proporcionar una mayor visibilidad, eficiencia y capacidad de respuesta, se orienta operarios a reducir el desperdicio y ser competitivos en un mercado en constante cambio. La adopción de este enfoque no solo mejora los resultados operativos, sino que también impulsa una cultura de mejora continua y compromiso entre los empleados, para el éxito a largo plazo en la industria del calzado.

Palabras clave: Trabajo estandarizado, Ayudas visuales, Poka yoke, Flexibilidad, Mejora continua

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las organizaciones se están centralizando en todos los recursos disponibles de las empresa, Es por esto, por lo que desean la mejora continua para promover la estandarización y optimización de los procesos de fabricación del caucho vulcanizado en el producto de suela, ya que es un medio muy olvidado en la integración de nuevas tecnologías en nuestra región, para poder transformar dicho producto, un factor importante en la producción de suela es la implementación en la gestión de producción integrando herramientas que planifiquen y realicen un proceso armónico dentro de dicha institución. Por lo tanto, la industria comercializadora donde se desarrolló este

proyecto de vulcanización, carece de dos componentes muy importantes, ya que las empresas en este ramo mercantil se encuentran obsoletas en el contexto de mejora continua para obtener sus productos, ya que para ofertar un producto conforme a las especificaciones del cliente se necesitan realizar muchas variables o atributos a considerar para su transformación de la materia prima entrante a producción, para la creación del producto que demanda el cliente final.
Por lo cual, estas empresas tienden a seguir técnicas básicas y obsoletas para producir una variedad de productos que contengan todos los atributos para complacer a su cliente, también ignorando las complejidades que impactan el medio ambiente.
Un claro ejemplo es el elevado stock de materia prima con lo que se aprevienen estas empresas, ya que es causado por factores como desperdicio de material, ya que dicha materia prima pierde su vida útil al ser transformada, asimismo generando mermas en los altos stock, también a su vez, generando artículos defectuosos y fuera de especificaciones referentes a la voz del cliente, esto también conlleva a la sobrecarga de trabajo, cancelaciones de pedidos, retrasos en la programación de los pedidos del cliente.
Lo cual conllevo al surgimiento de este proyecto por la necesidad de generar una metodología de ingeniería, que incluyera la estandarización y optimización del proceso de vulcanización de suela, para dicho desarrollo se implementaran herramientas como, estudio de tiempos y movimientos, que permitieran un análisis contextual del proceso, con el objetivo de observar, prevenir o eliminar efectos sobre la eficiencia de las estaciones de trabajo, hábitos productivos de los operadores y la armonización de los procesos internos de la producción.
Una vez ejecutadas estas herramientas, se continuará con el apoyo de la gestión visual y filosofías de lean Manufacturing, Kanban, 5'S, Andon, etc. Estas inclusiones están diseñadas para conseguir que se eliminen o prevengan los hábitos que afectan al sistema productivo y así facilitar las operaciones para realizar las actividades con forme a las estandarizaciones específicas que incorporan dichas herramientas, ya que estarán comunicándose e iterando con el proceso productivo.

TEORÍA

El contexto histórico de la suela vulcanizada El proceso de vulcanización del caucho fue descubierto por Charles Goodyear en 1839. Este avance revolucionario permitió la creación de productos de caucho más duraderos y resistentes, abriendo nuevas posibilidades en diversas industrias, incluido el calzado. El desarrollo y la innovación A lo largo de los años, el proceso de vulcanización ha evolucionado significativamente: Siglo XIX y XX: La vulcanización se estableció como una técnica estándar en la fabricación de calzado, particularmente en la producción de botas y zapatos industriales. Las zapatillas deportivas de lona con suelas vulcanizadas, como las icónicas Converse All Star, se convirtieron en un símbolo de la moda y la funcionalidad, pero tiene un trasfondo en la esclavitud. Finales del Siglo XX: Innovaciones en la química del caucho llevaron a la creación de compuestos de caucho más avanzados, mejorando aún más la durabilidad y el rendimiento de las suelas vulcanizadas. Estas innovaciones recientes avanzan a pasos gigantescos, la cual es la estandarización de los procedimientos adecuados para realizar un correcto manejo de inventarios dentro de la institución, ya que no se tenía un cierto régimen adecuado para manipulación de materia prima directa, y con ello se perdían las relaciones o eslabones adecuados con los clientes, por no entregar su producto a tiempo, que armonice el tiempo adecuado en el requerimiento que se puede en el momento justo, para que el proceso fluya de una manera más eficiente y eficaz dando como resultado la eficiencia y eficacia en la empresa para generar la productividad proyectada y requerida por la necesidad del cliente.

Innovaciones Recientes, en las últimas décadas, ha habido varios avances significativos en la tecnología de suelas vulcanizadas:

Nuevos Materiales: Se han desarrollado compuestos de caucho avanzados que ofrecen mejor resistencia al desgaste, mayor flexibilidad y mejores propiedades de tracción. La incorporación de materiales reciclados y sostenibles en la mezcla de caucho ha ganado popularidad, impulsada por la creciente preocupación por el medio ambiente.

Tecnología de Moldeo: Las técnicas de moldeo por inyección y compresión han mejorado, permitiendo una mayor precisión y eficiencia en la producción de suelas vulcanizadas. El uso de tecnologías de impresión 3D en el diseño y prototipado de suelas ha permitido una personalización y experimentación más rápidas y económicas.

Mejoras en el Proceso de Vulcanización: La optimización de los tiempos y temperaturas de vulcanización ha permitido producir suelas con mejores propiedades físicas y una mayor consistencia en la calidad. La investigación en nuevos agentes de vulcanización y aditivos ha llevado a una reducción de los tiempos de proceso y una menor emisión de compuestos volátiles orgánicos (VOC), haciendo el proceso más amigable con el medio ambiente.

Tendencias actuales mediante la sostenibilidad: El uso de caucho reciclado y materiales ecológicos está en aumento. Las empresas están invirtiendo en procesos de fabricación más sostenibles para reducir la huella de carbono. La certificación de productos como sostenibles se ha convertido en una prioridad, con estándares y regulaciones más estrictos.

Personalización: La demanda de calzado personalizado ha impulsado el desarrollo de suelas vulcanizadas que pueden adaptarse a necesidades específicas del consumidor, como el tipo de deporte, la forma del pie y las preferencias de diseño.

Integración Tecnológica: Se están explorando suelas vulcanizadas con capacidades tecnológicas integradas, como sensores para monitorear el rendimiento deportivo o la salud del usuario.

Investigación y Desarrollo Futuro La investigación en el campo de las suelas vulcanizadas continúa, con varias áreas de interés clave: Nanotecnología: El uso de nanomateriales para mejorar las propiedades del caucho, como la resistencia al desgaste y la capacidad de autolimpieza.

Biocompatibilidad: Desarrollo de suelas hechas de materiales biodegradables que mantengan la durabilidad y flexibilidad del caucho vulcanizado tradicional.

Optimización de Procesos: Investigación en métodos de vulcanización más eficientes energéticamente y con menor impacto ambiental.

PARTE EXPERIMENTAL

El campo de las suelas vulcanizadas ha recorrido un largo camino desde su invención en el siglo XIX. Las innovaciones en materiales, procesos y sostenibilidad continúan impulsando el desarrollo de suelas más avanzadas y ecológicas. Con una creciente demanda de personalización y sostenibilidad, la industria del calzado sigue evolucionando, adoptando nuevas tecnologías y métodos para mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. Dicho esto, las empresas del ahora y del mañana buscan la implementación de la mejora continua por medio de herramientas tecnológicas, con el fin de armonizar el proceso de producción. Es por esto la realización de este sistema de estandarización y optimización, basado sobre la metodología Lean Manufacturing, ya que espera la prevención de los 7 desperdicios, el cambio de mentalidad en los colaboradores, Calidad en el procedimiento de trasformación del producto terminado, satisfacción del cliente y así obtener las bases para la industrialización 4.0, con el fin de seguir revolucionando hacia una pyme más eficiente para la sociedad y el desarrollo sustentable.

RESULTADOS

En la industria del calzado, la producción de suelas vulcanizadas es un proceso crítico que requiere eficiencia y control para garantizar la calidad del producto final. Sin embargo, muchos fabricantes enfrentan desafíos en términos de control de producción, tiempos de ciclo y desperdicio. En este contexto, la aplicación de principios Lean junto con herramientas visuales y ritmo de trabajo puede

ofrecer soluciones efectivas para mejorar el control de producción y optimizar el proceso de fabricación.
A continuación, se presenta la metodología a implementar para generar la filosofía del pensamiento lean

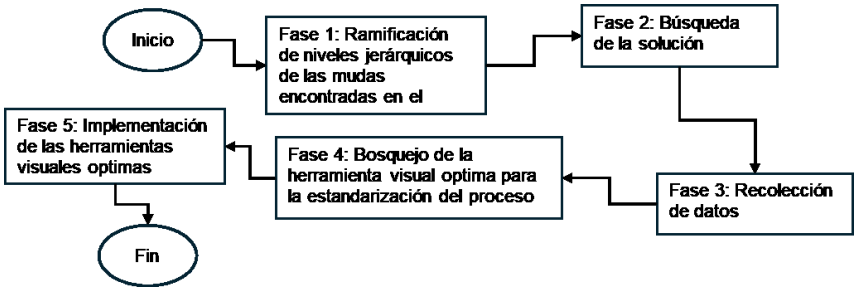


Figura 1. Cronograma de la metodología implementada. Fuente Elaboración Propia.

Fase 1: La primera fase consiste en la selección de las estaciones de trabajo a diagnosticar, utilizando la ramificación de niveles y basándonos en su importancia dentro del proceso. Una vez identificada el área de oportunidad a analizar, se procedió a la segunda etapa, donde se identificaron las contingencias que afectan las actividades del proceso mediante la indagación de los 7 desperdicios (mudas). Esto permitió determinar qué es lo que realmente se requiere eliminar o prevenir. Asimismo, se identificará el origen de la inestabilidad en la actividad asignada del proceso de fabricación mediante un diagrama de árbol de decisión. Una vez descubiertas las causas del desperdicio, se continuó con la tercera fase, donde se aplicó la metodología 5W+2H para cuestionar la causa recurrente que está perjudicando la estabilidad del proceso. Luego, se determinaron las herramientas visuales de mejora continua que sean factibles para prevenir las causas de los desperdicios incontrolables. Definida la ayuda visual para su implementación, se realizará la cuarta fase, la cual consiste en la recolección de los datos necesarios mediante técnicas lean para la elaboración de la gestión visual. Esto tiene como finalidad revisar la planificación del diseño, obtener la aprobación de la empresa y evaluar la viabilidad de compatibilidad con el operador, con el objetivo de ejecutar las herramientas visuales óptimas seleccionadas en la fase cinco. En la fase cuatro se realiza la recolección de datos. Una vez obtenidos los antecedentes para las herramientas visuales, se continuó con la fase cinco, la cual bosquejará la propuesta visual, tomando en cuenta el objetivo de prevención, los datos recopilados, la estandarización y la optimización del proceso. Para esto, esta etapa se dividió en dos pasos. En el primer paso, se procederá a optimizar las herramientas visuales en una sola, con el fin de que sean más eficientes. Posteriormente, se diseñará el bosquejo de la herramienta visual definitiva mediante el software de Microsoft Office. Logrado esto, se avanzará a la ejecución de la última fase, que consiste en la aprobación por parte de la empresa y la colocación de las herramientas visuales óptimas en sus espacios correspondientes. Ramificación de niveles genéricos del proceso de suela. En esta fase se determinó el orden de jerarquía de las estaciones de trabajo para orientar el flujo que se seguirá a partir del diagnóstico inicial. La ramificación de las categorías de las estaciones de trabajo (Figura 2) está basada en la obtención de la materia prima directa para la elaboración del producto, proporcionando una mejor visualización de las categorías de las estaciones de trabajo.

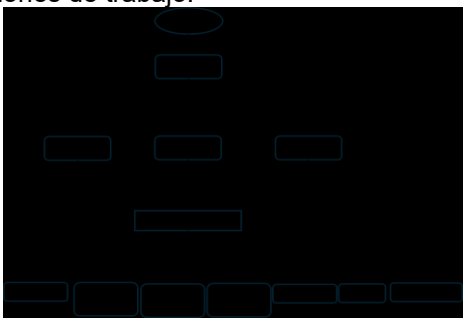


Figura 2. Ramificación de categorías para las estaciones de trabajo. Fuente Elaboración Propia.
Diagnóstico de las estaciones, para la distribución del diagnóstico inicial se desarrollaron dos etapas:

• Punto numero 1: analizar y canalizar en una lista, las diferentes mudas que se encuentran dentro de las estaciones del trabajo del proceso.

• Punto numero 2: Realizar un diagrama de árbol de decisión por medio de las mudas por medio de las identificadas en el proceso.

Se analizó el proceso de cada estación de trabajo de las de almacén de materia pima directa y de vulcanizado para la identificación del origen de las mudas(desperdicios).

Búsqueda de soluciones. Para identificar los desperdicios o mudas, se llevó a cabo un análisis de situación mediante la metodología 5W+2H, lo que garantiza la prevención del problema inicial. El análisis del origen del desperdicio se realizó mediante un diagrama de árbol de decisión. En la Figura 3 se muestra este diagrama para el área de vulcanizado.

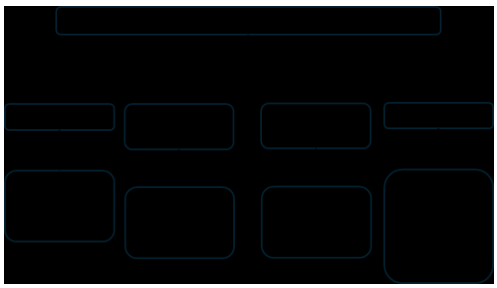


Figura 3. Clasificación de tipos de desperdicios. Fuente Elaboración Propia.

Unos de los problemas más identificados por departamento es el problema: Muda de espera en el proceso de producción.

A continuación, se muestra un ejemplo de esta metodología

- ¿Por qué los trabajadores están esperando?
  Porque las máquinas frecuentemente están inactivas debido a falta de material.

- ¿Por qué las máquinas con frecuencia tienen retrasos de material?
  Porque no se tiene un proceso estandarizado de producción de la materia prima directa de en todos los departamentos.

- ¿Por qué no se realiza la estandarización adecuada en los departamentos?
  Porque no hay un programa de desglose de materiales adecuado y no se tiene los tiempos adecuados para tener una estandarización entre ellos.

- ¿Por qué no hay un programa de tiempos establecidos?
  Porque la empresa prioriza la producción continua y no asigna tiempo ni recursos para la implementación del enfoque Lean.

- ¿Por qué la empresa prioriza la producción continua sin asignar tiempo ni recursos para del enfoque lean?
  Porque hay una falta de comprensión y experiencia en la implementación de Lean, y una percepción de que la inversión inicial no justificará los beneficios a corto plazo.

Solución Propuesta

- Establecimiento de un proceso estandarizado de producción de materia prima directa
- Desarrollo de un programa de desglose de materiales y tiempos estándar acción: implementar un programa detallado de desglose de materiales que incluya la cantidad necesaria y los tiempos estándar para cada proceso
- implementación del enfoque lean y filosofías de calidad total
- planificación de tiempos de inactividad programados para implementar lean
- monitoreo y ajuste continuo del programa de producción y mantenimiento plan de acción
- Comunicación y Cultura
- Compromiso de la Dirección: Asegurar el apoyo y compromiso de la alta dirección para destinar recursos y tiempo a la implementación de estas mejoras.
- Formación y Desarrollo: Ofrecer formación continua a los empleados sobre Lean y calidad total.
- Comunicación Transparente: Mantener una comunicación abierta y transparente sobre los objetivos, progresos y resultados esperados del proyecto.

Para recolectar datos, se emplearon herramientas de Lean Manufacturing con el objetivo de proporcionar datos estandarizados que permitieran la armonización en el proceso. La tarjeta roja utilizada en la estación de pesado de hules es la misma que se utilizará en esta estación. El objetivo de estandarización consiste en registrar información sobre la cancelación de materiales que afectan a la pasta. Antes de elaborar una carga, se debe verificar en estas tarjetas la existencia de los materiales necesarios para el proceso. En caso de que se presente la situación mencionada, el material será desechado de inmediato, tal como se muestra en la Figura 4.

TARJETA ROJA	
Nombre del trabajador:	
Departamento:	
Fecha:	
Hora:	
Motivo de la tarjeta roja:	
Acciones correctivas necesarias:	
Observaciones adicionales:	
Firma del supervisor:	
Firma del trabajador:	

Figura 4. Tarjeta roja de cancelación Bosquejo de las herramientas visuales y apoyo de tarjetas. Fuente Elaboración Propia.

Para elaborar las ayudas visuales en el proceso, se aplicó el siguiente procedimiento:

Implementación de las herramientas visuales y las tarjetas de producción. En esta fase, se diseñó un espacio común para que todos en la empresa puedan identificar las ayudas visuales en su departamento. Esto se hizo con el objetivo de promover la estandarización y el enfoque hacia la calidad dentro del proceso, lo que contribuye a disminuir los posibles desperdicios. A modo de ejemplo, se muestra la ayuda visual diseñada para el área de vulcanizado en las Figuras 5 y 6.

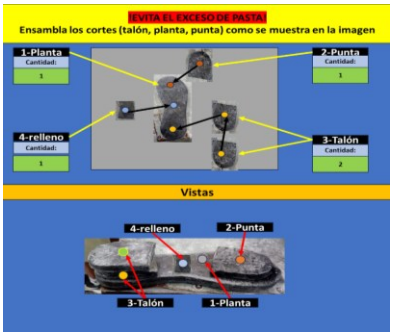


Figura 5. Estandarización del proceso de vulcanizado. Fuente Elaboración Propia.

Figura 6. Indicador de clave para abastecimiento de materia prima. Fuente Elaboración Propia.

Mediante la aplicación del Takt Time Se logro la estandarizar del proceso y la conformación de ayuda visuales en los departamos, a continuación, estos son los siguientes: Con la ayuda de la metodología Lean se determinó con la comparación durante y después de las estandarizaciones, lo cual es básicamente la frecuencia de compra del cliente o la demanda de este, al cual la empresa deberá ajustarse para evitar atrasos e incumplimientos en entregas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables para determinar el tiempo total y la demanda del cliente. Fuente Elaboración Propia.

Descripción	Tiempo	Unidad
Tiempo de vulcanizado en prensas	4	minutos/unidad
Horas de turno	11	Horas
Horas no productivas	1	Horas
Horas productivas	10	Horas
Tiempo neto disponible	600	Minutos por día
Demanda semanal	1500	Unidades semanales
Demanda diaria	300	Unidades diarias

Aplicación del Takt Time antes de las aplicaciones visuales con ayudas para reducir las mudas. El Takt Time se determina mediante la Ecuación 1.

$$Takt\ Tme = \frac{Tiempo\ de\ producción\ disponible}{Demanda\ del\ cleinte} \quad (1)$$

$$Takt\ Time = \frac{600\ Minutos\ disponibles}{286\ Pares\ diarios} = 2.1\ Min/par$$

$$Takt\ Time = 2.1\frac{Min}{par}x\ 60\ Seg = 126\ Seg/par$$

A continuación, se muestra los tiempos definidos por departamentos para realizar una carga de pasta de 60 kg para producir 286 pares al día de suela vulcanizada (Tabla 3).

Tabla 3. Tiempos de ciclo de los departamentos involucrados en la vulcanización de la suela. Fuente Elaboración Propia.

Proceso	Tiempo	Unidad
Químicas	62.83	Segundos
Hules	110	Segundos
Silicas	60	Segundos
Aceite	10	Segundos
Bambury	240	Segundos
Molino	20	Segundos
Suajado	160	Segundos
Vulcanizado	411.43	Segundos

Al calcular el Takt Time se obtiene un resultado de 126 segundos por par de suelas.

Como se puede observar, los resultados obtenidos con la metodología del ritmo de trabajo indican que tres departamentos están por encima de este ritmo debido a la falta de una metodología estandarizada adecuada para el puesto de trabajo. En la siguiente figura se muestran los tiempos de ciclo sin estandarización en la estación de trabajo, esto se ilustra en la Figura 7.

Figura 6. Indicador del ciclo de tiempo inicial entre departamentos. Fuente Elaboración Propia.

Se identificaron los departamentos con cuellos de botella, siendo específicamente las áreas de Banbury, Suajado y Vulcanizado. La falta de un procedimiento de calidad adecuado ha impedido mantener un proceso estable en estas áreas, limitando la capacidad de producir más unidades de pares de suela vulcanizada. Una vez incorporadas las herramientas de estandarización, como las ayudas visuales y la aplicación de las mudas en los procedimientos dentro de cada estación de

trabajo, los tiempos se redujeron significativamente en un 30% en todos los departamentos involucrados, dando como resultado los siguientes valores, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempos de ciclo con la disminución del 30% en cada departamento involucrado en la vulcanización de la suela. Fuente Elaboración Propia.

Proceso	Tiempo	Unidad
Químicas	43.981	Segundos
Hules	77	Segundos
Silicas	42	Segundos
Aceite	7	Segundos
Bambury	126	Segundos
Molino	20	Segundos
Suajado	84	Segundos
Vulcanizado	126	Segundos

La Figura 8 ilustra cómo la estandarización es importante en cualquier ramo o sector donde se encuentren procesos, ya que permite aplicar mejoras para obtener mejores resultados y estabilizar la producción. Esto facilita alcanzar metas específicas y cumplir con las expectativas del cliente. Las ayudas visuales, diagramas y visualizaciones contribuyen a mejorar las capacidades de producción, creando una autonomía en los procesos y su normalización.

Figura 7. Indicador de las mejoras del ciclo de tiempo entre departamentos. Fuente Elaboración Propia.

A continuación, se menciona por departamento las mejorar realizasdas mediante la filosofía del pensamiento Lean.

Bambury: Estos incluyen: la inactividad de ambas manos durante el proceso, pausas entre movimientos, movimientos innecesarios, cambio de herramientas entre manos, desplazamientos largos entre procesos, girar debido a la ubicación de partes, falta de realización de operaciones simultáneas cuando es posible, retrabajo debido a errores en el proceso, estiramiento y agachamiento debido a la ubicación de partes, y movimientos que no agregan valor como confirmaciones innecesarias o preparaciones repetidas.

Molino: Mejora implementada en un departamento mediante el uso de ayudas visuales para identificar químicos y pastas, logrando una correcta clasificación y estandarización en la incorporación de químicos y cabeceadas de carga de pasta. Además, se eliminaron desperdicios como la inactividad de ambas manos durante el proceso y el tiempo de espera entre movimientos.

Suajado: Gracias a las incorporaciones de ayudas visuales, se estandarizo el puesto de trabajo para corregir las anomalías dentro de este departamento ya que se elimaron los siguientes aspectos tales como fueron la localización de partes como son los suajes, pedir la cantidad necesaria de acuerdo a la programación para la obtención de pasta y la utilización adecuado del consumo de estearato, Agacharse debido a localizaciones bajas de partes o procesos y Movimiento que no agrega valor tales como movimientos de confirmación, movimientos repetidos, movimientos de preparación, etc

Vulcanizado: Reducción del tiempo de seguridad para vulcanizar la pasta de 6.85 minutos a 3.5 minutos. Acuerdo con el molinero para implementar aceleradores y reducir el tiempo de vulcanización. Estandarización del proceso de trabajo en el área o departamento de prensas. Incorporación de ayudas visuales para estandarizar el proceso de trabajo. Mejora del rendimiento mediante la planificación de producción con tarjetas de programación.

CONCLUSIONES

Una de las partes con mayor peso en este proyecto desarrollado en esta empresa fue la estandarización de los procedimientos con mayor cuello de botella, ya que pueden prevenir paros de producción, excesos de materia prima y clientes insatisfechos, es necesario controlar el inventario por medio de la estandarización y optimización a base de la demanda que se predice a futuro, con el fin de estar preparados para la próxima venta que será consumida en el instante que sea requerida. Por lo cual la estandarización y optimización en el proceso de fabricación de algún artículo es la seguridad de mantener la productividad y así prevenir perdidas en el concepto ambiental, económico y laboral.

La implementación de herramientas visuales y ritmo de trabajo bajo el enfoque Lean puede mejorar de forma significativa el control de producción. Al proporcionar una mayor visibilidad, eficiencia y capacidad de respuesta, se orienta operarios a reducir el desperdicio y ser competitivos en un mercado en constante cambio. La adopción de este enfoque no solo mejora los resultados operativos, sino que también impulsa una cultura de mejora continua y compromiso entre los empleados, para el éxito a largo plazo en la industria del calzado.

Además, la falta de control del inventario puede llevar a la cancelación de pedidos por parte de los clientes, lo que subraya la importancia de prever la demanda y gestionar los materiales de manera eficiente para cumplir con los plazos de entrega. Se determinó que antes de implementar sistemas de Lean Manufacturing o herramientas tecnológicas, el proceso debe estar completamente estandarizado para maximizar los beneficios tanto para la empresa como para los trabajadores.

Como aplicaciones futuras, se propone expandir la gestión visual y la metodología Kanban a otras áreas de la empresa para mejorar la eficiencia y productividad. Integrar tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos en tiempo real permitirá monitorear y optimizar continuamente los procesos. También se recomienda usar simulaciones digitales para probar nuevas estrategias antes de implementarlas. Fomentar una cultura de mejora continua a través de capacitación constante y empoderamiento de los empleados garantizará que las innovaciones y mejoras se mantengan a largo plazo. Estas propuestas buscan no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también crear un entorno laboral sostenible y adaptable a las demandas futuras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Giraldo Feo, A. J. (2018). Evaluación de la formulación para una suela de caucho traslúcido a partir de la vulcanización con peróxidos orgánicos para la empresa Croydon Colombia SA.
2. Llave, E. D. V. I. DATOS GENERALES DEL PROYECTO, DEL PROMOVENTE Y DEL RESPONSABLE DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.
3. De Diego, A. T., Sierra, N. M., & García, S. J. (2009). " Las claves del éxito de Toyota". LEAN, más que un conjunto de herramientas y técnicas.

4. Acosta-Vargas, P., Chicaiza, E., Acosta-Vargas, I., Salvador-Ullauri, L., & Gonzalez, M. (2020). Towards Industry Improvement in Manufacturing with DMAIC. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59194-6_28
5. Bermejo, M. (2011). El Kanban. Barcelona, España: UOC.
6. RUBBERS, O. V. C., & ZENGİN, Ö. A. (2022). ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY★ GRADUATE SCHOOL.
7. Portilla Mendoza, K. J., & Ramírez Polania, M. P. (2022). Revisión bibliográfica del proceso para la fabricación de suela para zapato de dama tipo tacón a partir del modelado e impresión 3D.
8. Campo, O. H., Doncel Lozano, A. X., Martinez Lasso, C. L., & Rodriguez Acosta, A. M. (2018). Propuesta de trade marketing para el lanzamiento de suelas biodegradables para distribuidores en el Restrepo. Cuadernos de Gestión, 9(2), 113-122.
9. Bonini, J. P., Godambe, S. A., Mangum, C. D., Heer, J., Black, S., Ranada, D., Berbano, A., & Stringer, K. (2020). Building an engaging toyota production system culture to drive winning performance for our patients, caregivers, hospitals, and communities. In Patient Safety and Quality Improvement in Healthcare: A Case-Based Approach. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55829-1_5
10. Robledo, I. F. J., & Pretel, D. El Árbol que Llora: el fenómeno de la esclavitud en las caucherías de la Casa Arana.
11. Castro, A. M. (2020). EXPERIMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN MULTIRESPUESTA EN LA CARACTERIZACIÓN DE HULE PARA SUELA DE CALZADO. Miscelánea Científica en México, 128.
12. De León, R. D., Pérez, E., Narro, R., & Elizondo, J. D. Tecnologías para la obtención de polibutadieno alto cis y su empleo como modificador de impacto en resinas estirenicas. COMITÉ EDITORIAL.

NANOESTRUCTURAS DE ZNO/GOR SINTETIZADAS VÍA VERDE PARA LA DETECCIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO

Ricardo José Malpica Guadarrama[1,2], Esther Torres Santillán[1], Marco Antonio Domínguez Aguilar[2] . Mayahuel Ortega Avilés[3], Selene Capula Colindres[1], Gerardo Terán[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional,[2]Instituto Mexicano del Petróleo,
[3]Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnología.
estorress@ipn.mx

RESUMEN

En este trabajo, se sintetizaron nanoestructuras de óxido de zinc con óxido soportadas sobre óxido de grafeno reducido (ZnO/GOr) por una ruta química verde empleando ácido cítrico como disolvente y extracto acuoso de eucalipto como reductor. Las nanoestructuras obtenidas se evaluaron en la detección de monóxido de carbono mediante un sensor químico resistivo en flujo estático. Las nanoestructuras de ZnO/GOr obtenidas se analizaron morfológicamente con microscopía electrónica de barrido (MEB), estructuralmente con la técnica difracción de rayos X (DRX) y; adicionalmente, se realizó un análisis químico estructural por espectroscopía infrarrojo con transformada de Fourier (IR-TF). La morfología superficial del nanocompuesto de ZnO/GOr muestra las nanopartículas de ZnO dispuestas uniformemente en la superficie de las láminas de óxido de grafeno. Los resultados de DRX indican que las nanopartículas de ZnO presentan la estructura de la wurtzita. Con los espectros IR-TF se identificaron biomoléculas de -OH, -CH_3 y C=O en las diferentes longitudes de onda. Se demuestra una mayor sensibilidad de detección de monóxido de carbono a una temperatura de 100°C y disminuye la sensibilidad drásticamente a temperaturas de 200°C y 300°C.

INTRODUCCIÓN

En los últimos días se ha incrementado el nivel de contaminación originado por la actividad humana, lo cual ha ocasionado la necesidad de un monitoreo de diferentes contaminantes, entre ellos el monóxido de carbono y el desarrollo de dispositivos con alta sensibilidad y selectividad para la detección han sido necesarios. El procesamiento de alimentos y el monitoreo de la calidad del aire en diferentes lugares como bibliotecas, cabinas de aviones son solo algunas de las vastas áreas que necesitan sensores confiables y eficientes [1]. En esta dirección, algunos dispositivos de sensado han sido diseñados para satisfacer las demandas de la sociedad moderna. Los sensores químico-resistivos emplean materiales que pueden detectar cambios eléctricos debido a la concentración de la especie detectada [2–4]**.** A lo largo de los años, los óxidos metálicos semiconductores y los polímeros, las nanopartículas metálicas y otros materiales también se han aplicado en el desarrollo de sensores quimiorresistivo [12-14]. Debido a su bajo costo de producción, fácil procesabilidad, versatilidad química y buenas propiedades eléctricas, varios óxidos metálicos, incluidos CdO [15], In2O3 [17], Fe2O3 [19], WO3 [21], SnO2 [23], CuO [26], TeO2 [28], MoO3 [29] y ZnO [31], se han explorado con éxito en sensores quimiorresistivos. El ZnO, un semiconductor de tipo n con banda prohibida directa a temperatura ambiente, presenta una alta movilidad de electrones, estabilidad térmica y buenas propiedades eléctricas para aplicaciones de detección de gases [33]. Además, el ZnO tiene moléculas de oxígeno adsorbidas en su superficie, que pueden formar especies ionizadas capaces de capturar electrones de la banda conductora del óxido, creando una capa de agotamiento en la superficie del óxido [35]. Además, con el fin de optimizar las propiedades del material para los sensores químicos, se ha explorado ampliamente el control y la creación de nuevas morfologías, formas y fases cristalográficas del ZnO a partir de diferentes síntesis químicas. Aunque algunos trabajos recientes han estudiado los sensores de ZnO, la mayoría de ellos refieren beneficios a la temperatura de operación empleada, sin embargo, el tipo específico de morfología o el método de transducción diferente de esta revisión [36]. Este trabajo presenta un estudio reciente sobre ZnO soportado sobre óxido de grafeno reducido para analizar su sensibilidad en los sensores quimiorresistivos

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis vía verde para obtener nanoestructuras ZnO/GOr

En un vaso de precipitados se colocó 1 g de GOr con 50 ml agua destilada y se llevó a ultrasonido durante 1 h, después colocar por goteo 25 ml de una solución de acetato de zinc al 0.1 M ajustando el pH entre 3 a 5 con unas gotas ácido ascórbico 0.1 N para su completa disolución, se agitó hasta lograr una temperatura entre 70°C-80°C; después se ajustó a un pH básico entre 9 y 10 con unas gotas de extracto acuoso de hojas de eucalipto y se agitó durante 1 hora, es entonces cuando empiezan a precipitar las nanopartículas de óxido de zinc formando la nanoestructura de ZnO/GOr. Se llevó a enfriamiento inmediato con hielo durante 15 minutos, para posteriormente decantar y centrifugar para separar el precipitado, lavando varias veces con agua destilada para después secarlo a 80°C en una estufa durante 24 horas.

Caracterización estructural y morfológica

La morfología, tamaño de partícula y dispersión de las nanoestructuras de ZnO/GOr y GOr fueron observadas con un microscopio electrónico de barrido (Quanta 250 marca FEI), y la estructura cristalina fue analizada con un equipo de difracción de rayos-X (Siemens D5000 con una radiación monocromática Cu-K α1).

Caracterización química estructural

El análisis para obtener la estructura química se realizó por medio de espectroscopía IR-TF para los nanomateriales de ZnO/GOr y GOr, utilizando el espectrómetro Spectrum Two IR-FT de Perkin Elmer con longitud de onda de 532 nm y ATR.

Evaluación en la detección de monóxido de carbono

Para este trabajo se empleó un sensor químico resistivo en flujo estático, para lo cual elaboró una tinta conductora mezclando las nanoestructuras 0.20 g de ZnO/GOr con 0.5 ml de nafión y se llevó a ultrasonido por 5 minutos para posteriormente colocar la tinta en un vidrio de

RESULTADOS

Análisis y resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En la Figura (1a) se muestra la micrografía de la muestra de ZnO/GOr sintetizada por una vía verde, en la superficie de la muestra se observan partículas aglomeradas amorfas y algunas de forma circular y trapezoidal con diferentes tamaños aproximadamente entre 1 a 5 micrómetros. La Figura (1b) muestra el análisis químico EDS donde se corrobora la presencia de zinc, cobre oxígeno y carbono en la muestra, se visualizan otros elementos como el Al, S y Si posiblemente por el extracto usado en el proceso de reducción en la síntesis verde. En el inserto de la figura 1b se muestran los mapeos del zinc y oxígeno en los cuales se puede observar una distribución homogénea de los elementos sobre la superficie del soporte.

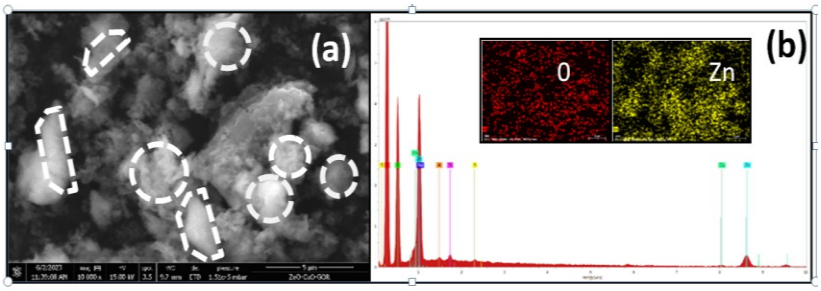


Figura 1. (a) Micrografía de la muestra ZnO/GOr, (b) análisis químico por EDS de la muestra ZnO-GOr con mapeo de la distribución del oxígeno y zinc sobre la superficie.

Análisis y resultados de la Difracción de rayos-X (DRX)

Debido la presencia de GOr, las vibraciones de dispersión y la forma espectral variaron mucho, lo que indica la formación de heteroestructuras de ZnO/GOr. Los patrones de difracción de rayos X de la Figura 2, proporcionan los picos DRX para el ZnO (◆) en 2 theta en 34.4◦, 36.3◦, 47.5◦, 56.6◦, 62.9◦, 66.4◦, 67.9◦, 69.1◦, 72.6◦, y 76◦ indicando la presencia de ZnO hexagonal según la (JCPDS 01–08-011) que corresponden a los planos (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), y (202). En la muestra ZnO/GOr hay ligeros movimientos de las señales del ZnO hacia la derecha indicando la formación de una heteroestructura con el soporte de óxido de grafeno, esto posiblemente debido a la mayor separación que tienen las hojas del grafeno con el oxígeno que se unido al zinc. El óxido de grafeno químicamente reducido GOr exhibe una estructura hexagonal con un pico de mayor intensidad en el ángulo 2θ en 26.55° la cual corresponde al plano de difracción (002) de acuerdo con la carta (ICSD 65-1528-1621).

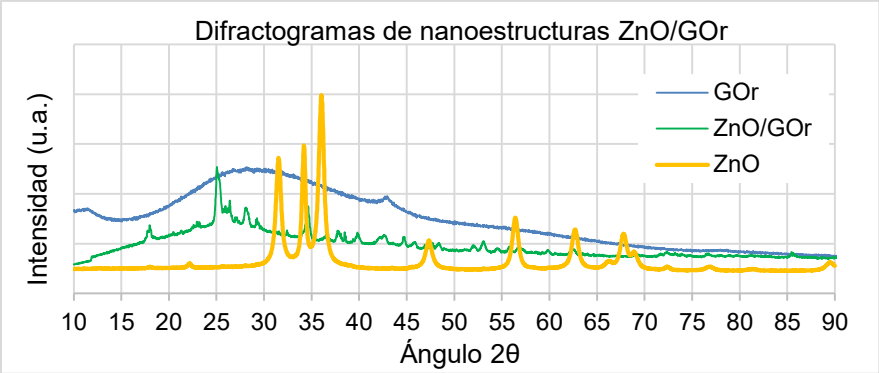


Figura 2. Difractogramas de las nanoestructuras GOr, ZnO/GOr y ZnO

Análisis y resultados de la espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (IR-TF)

En la Figura 3, se muestra la comparación de los espectros infrarrojos con transformada de Fourier, obtenidos de las muestras GOr,, ZnO/GOr obtenidos a través de la ruta verde. En los espectros encontramos distintas señales en las diferentes longitudes de onda, para la señal en 3307 cm^{-1} se localizan los grupos funcionales químicos hidroxilo (-OH), la muestra que presenta mayor intensidad es la del ZnO/GOr (ya que el Zinc es un agente reductor y se oxida más fácilmente captando más oxígeno en sus enlaces), dentro de la longitud de 1598-1395 cm^{-1} se encuentra la señal de los grupos (-C=O) y 904 (-CO) cm^{-1} los cuales se encuentran presentes en el extracto de eucalipto y actúan como agentes reductores y estabilizadores para la síntesis de las ZnO. De igual manera dentro de este espectro, la señal de 470 cm^{-1} nos confirma la presencia del enlace entre el zinc y el oxígeno. en el primero no se presenta una disminución de señales características de grupos funcionales, dentro del rango de 600 a 400 cm^{-1} se aprecian señales características de los enlaces Zn-O.

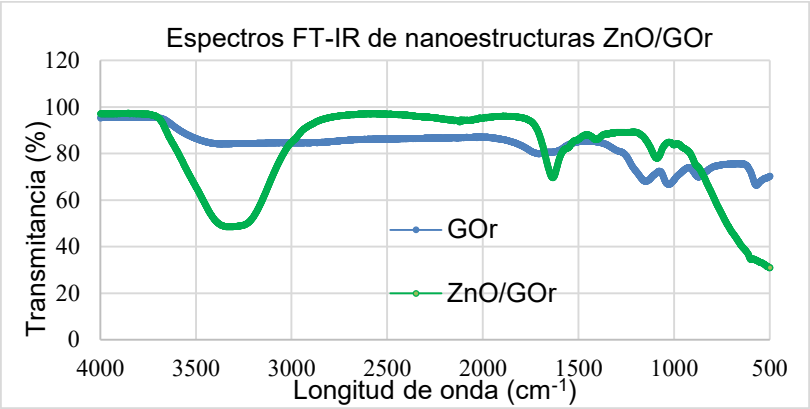


Figura 3. Espectros de infrarrojo de las muestras de ZnO/GOr y GOr sintetizado por vía química verde

Detección del monóxido de carbono

En la Figura 4, se muestran los resultados de la detección de monóxido de carbono que presenta el sensor químico resistivo usando las nanoestructuras ZnO/GOr, en donde se puede observar mayor sensibilidad a una temperatura de 100°C, disminuyendo la sensibilidad a 200°C y 300°C. Para la muestra con solo ZnO presenta una mínima sensibilidad y con el soporte GOr, no se presenta ninguna sensibilidad

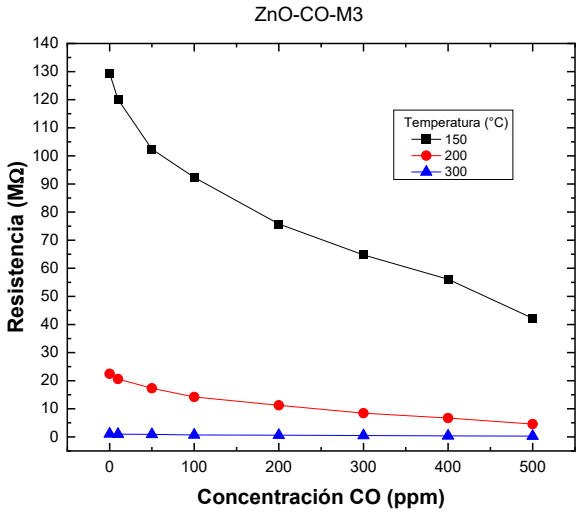


Figura 4. resultados en la detección de CO muestra ZnO/GOr

CONCLUSIONES

Se sintetizaron nanoestructuras de ZnO/GOr por una ruta verde El análisis MEB indica que una superficie con partículas aglomeradas de forma circular y trapezoide en algunos casos en diferentes tamaños, y por EDS se corrobora la presencia los elementos de zinc y oxígeno que se encuentran distribuidos homogéneamente en carbono (GOr). El análisis DRX muestra la formación de heteroestructuras con el soporte de GOr. Los difractogramas indican la presencia de ZnO estructura hexagonal. El análisis IR-TF demuestra la presencia de enlaces Zn-O en 470 cm^{-1}. La muestra que presenta una mayor sensibilidad al monóxido de carbono usando un sensor químico resistivo es la de ZnO/GOr a una temperatura de 100°C, a mayores temperaturas la sensibilidad disminuye

drásticamente. Se puede observar que el soporte permite incrementar la sensibilidad a la detección del monóxido de carbono.

AGRADECIMIENTOS
Este trabajo se realizó gracias a los recursos de los proyectos SIP 20241160 otorgado por el Instituto Politécnico Nacional.

BIBLIOGRAFÍA

1. Z. Li, J.R. Askim, K.S. Suslick, “The optoelectronic nose: colorimetric and fluorometric sensor arrays”, Chem. Rev., 2018.
2. G. Neri, “First fifty years of chemo resistive gas sensors”, Chemosensors Vol 3, 2015, pp. 1–20.
3. J.M. Rheaume, A.P. Pisano, “A review of recent progress in sensing of gas concentration by impedance change”, Ionics, 2011.
4. F.G. B˘ Anica, “Chemical Sensors and Biosensors”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2012.
5. H. Wohltjen, W.R. Barger, A.W. Snow, N.L. Jarvis, “A vapor-sensitive chemiresistor fabricated with planar microelectrodes and a Langmuir-Blodgett organic semiconductor film”, IEEE Trans. Electron. Devices, Vol 32, 1985, pp. 1170–1174.
6. T. Lin, X. Lv, Z. Hu, A. Xu, C. Feng, “Semiconductor metal oxides as chemoresistive sensors for detecting volatile organic compounds”, Sensors, Vol. 19, 2019, p. 233.
7. Y. Wang, A. Liu, Y. Han, T. Li, “Sensors based on conductive polymers and their composites: a review”, Polym. Int., Vol. 69, 2020, pp. 7–17.
8. R.A. Potyrailo, “Toward high value sensing: monolayer-protected metal nanoparticles in multivariable gas and vapor sensors”, Chem. Soc. Rev., Vol. 46, 2017, pp. 5311–5346.
9. U.T. Nakate, P. Patil, B. Ghule, Y.T. Nakate, S. Ekar, R.C. Ambare, R.S. Mane, “Room temperature LPG sensing properties using spray pyrolysis deposited nanocrystalline CdO thin films”, Surf. Interfaces, Vol. 17, 2019, p.100339.
10. J. Ma, H. Fan, W. Zhang, J. Sui, C. Wang, M. Zhang, N. Zhao, A. Kumar Yadav, W. Wang, W. Dong, S. Wang, “High sensitivity and ultra-low detection limit of chlorine gas sensor based on In2O3 nanosheets by a simple template method”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 305, 2020, pp. 127456.
11. C.S. Lee, H.Y. Li, B.Y. Kim, Y.M. Jo, H.G. Byun, I.S. Hwang, F. Abdel-Hady, A. A. Wazzan, J.H. Lee, “Discriminative detection of indoor volatile organic compounds using a sensor array based on pure and Fe-doped In2O3 nanofibers”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 285, 2019, pp. 193–200.
12. X. Wang, T. Wang, G. Si, Y. Li, S. Zhang, X. Deng, X. Xu, “Oxygen vacancy defects engineering on Ce-doped α-Fe2O3 gas sensor for reducing gases”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 302, 2020, pp.127165.
13. C. Kamble, M. Panse, A. Nimbalkar, “Ag decorated WO3 sensor for the detection of sub-ppm level NO2 concentration in air”, Mater. Sci. Semicond. Process, Vol. 103, 2019, pp.104613.

14. P.G. Choi, N. Izu, N. Shirahata, Y. Masuda, “Improvement of sensing properties for SnO2 gas sensor by tuning of exposed crystal face”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 296, 2019, p.126655.

15 M. Tonezzer, “Selective gas sensor based on one single SnO2 nanowire”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 288, 2019, pp. 53–59.

16. Y. Zou, S. Chen, J. Sun, J. Liu, Y. Che, X. Liu, J. Zhang, D. Yang, “Highly efficient gas sensor using a hollow SnO2 microfiber for triethylamine detection”, ACS Sens. Vol. 2, 2017, pp. 897–902.

17. U.T. Nakate, G.H. Lee, R. Ahmad, P. Patil, Y.B. Hahn, Y.T. Yu, E. Suh, “Nano-bitter gourd like structured CuO for enhanced hydrogen gas sensor application”, Int. J. Hydrog. Energy, Vol. 43, 2018, pp. 22705–22714.

18. J.H. Bang, M.S. Choi, A. Mirzaei, S. Han, H.Y. Lee, S.W. Choi, S.S. Kim, H.W. Kim, “Hybridization of silicon nanowires with TeO2 branch structures and Pt nanoparticles for highly sensitive and selective toluene sensing”, Appl. Surf. Sci. 525 (2020), 146620.
19. A.A. Mane, A.V. Moholkar, “Orthorhombic MoO3 nanobelts based NO2 gas sensor”, Appl. Surf. Sci. Vol. 405, 2017, pp. 427–440.

20. J.W. Kim, Y. Porte, K.Y. Ko, H. Kim, J.M. Myoung, “Micropatternable double-faced ZnO nanoflowers for flexible gas sensor”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 9, 2017, pp. 32876–32886.

21. S. Zhao, Y. Shen, X. Yan, P. Zhou, Y. Yin, R. Lu, C. Han, B. Cui, D. Wei, “Complex surfactant-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional ZnO nanorods for high-performance ethanol gas sensor”, Sens. Actuators B Chem. Vol. 286, 2019, pp. 501–511.

22. J. Xuan, G. Zhao, M. Sun, F. Jia, X. Wang, T. Zhou, G. Yin, B. Liu, “Low temperature operating ZnO-based NO2 sensors: a review”, RSC Adv., Vol 10, 2020, pp. 39786–39807.

23. S. Chaudhary, A. Umar, K. Bhasin, S. Baskoutas, “Chemical sensing applications of ZnO nanomaterials”, Materials, Vol. 11, 2018, p. 287.

ANÁLISIS CINÉTICO PRELIMINAR DE UNA LIXIVIACIÓN DIRECTA DE SULFURO DE ZINC (ZNS) ASISTIDO CON OZONO

*[1]Carolina Rodríguez-Rodríguez, [1]Juan Carlos Baltazar-Vera, [1]Joel Everardo Valtierra-Olivares, [1]Roberto Ontiveros-Ibarra, [1]Ma. del Rosario Abraham-Juárez

[1]Universidad de Guanajuato
Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología
Ex-Hacienda de San Matías s/n, Col. San Javier, 36020, Guanajuato, Gto., México
[2]Universidad de Guanajuato
Departamento de Alimentos
Ex Hacienda El Copal k.m. 9; carretera Irapuato-Silao; A.P. 311, 36500, Irapuato,Gto., México
*carolina.rodriguez@ugto.mx

RESUMEN

El zinc es el cuarto metal más usado a nivel global y está presente en grandes cantidades en la tierra. Actualmente es uno de los seis principales metales que produce México ocupando el 7° lugar en producción mundial. Tradicionalmente, los minerales de zinc son concentrados y son sometidos a diferentes procesos para su obtención, utilizando dos procedimientos: la pirometalurgia y la hidrometalurgia, siendo esta ultima la más utilizada. El proceso hidrometalúrgico convencional consiste en transformar al sulfuro de zinc en óxido de zinc mediante tostación, el cual es sometido a una lixiviación con ácido sulfúrico para finalmente recuperarlo por electrodeposición. Por lo que la eliminación de la etapa de tostación, pudiera ser considerado un atractivo desde el vista económico y ambiental. Así que, en este trabajo se presenta la disolución de zinc a partir de un sulfuro de zinc en una lixiviación con ácido nítrico y asistida con ozono para incrementar su velocidad de disolución. Este trabajo se enfoca principalmente en estudiar dos sistemas ZnS/HNO_3 y $ZnS/HNO_3/O_3$ para observar su cinética de disolución, en donde se observa que, que se incrementa la disolución del zinc del 0.5% al 63% cuando la lixiviación con ácido nítrico al 1% v/v se le añade un flujo de ozono a la lixiviación. Por otra parte, se estudió la solubilidad del Zn en 3 concentraciones de pulpa, y se muestra que existe un tipo se saturación de zinc de alrededor de 0.44g Zn/L. Por lo que el uso del ozono podría ser una opción novedosa y amigable con el medio ambiente, para la metalurgia del zinc.

ABSTRACT

Zinc is the fourth most used metal worldwide and is present in large quantities on earth. It is currently one of the six main metals produced by Mexico, ranking 7th in world production. Commonly, zinc minerals are concentrated and are subjected to different processes to obtain them, using two procedures: pyrometallurgy and hydrometallurgy, the latter being the most used. The conventional hydrometallurgical process consists in transforming zinc sulfide into zinc oxide through roasting, which is subjected to leaching with sulfuric acid to finally recover it by electrodeposition. Therefore, the roasting stage elimination could be considered attractive from an economic and environmental point of view. In this work the dissolution of zinc from a zinc sulfide is presented as a leaching with nitric acid and assisted with ozone to increase its dissolution rate. This work focuses mainly on studying two systems ZnS/HNO3 and ZnS/HNO3/O3 to observe their dissolution kinetics, where it is observed that the dissolution of zinc increases from 0.5% to 63% when acid leaching at 1% v/v, an ozone flow is added to the leaching. On the other hand, the solubility of Zn was studied in three concentrations of pulp, and it is shown that there is a type of zinc saturation of around 0.44g Zn/L. Therefore, the use of ozone could be a novel and environmentally friendly option for zinc metallurgy.

INTRODUCCIÓN

El zinc es el cuarto metal mas usado a nivel global y esta presente en grandes cantidades en la tierra. Actualmente es uno de los seis principales metales que produce México ocupando el 7° lugar en producción mundial. Su principal uso es para mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de otros metales, así como también para la producción de componentes metálicos en forma de aleaciones (i.e. el latón).

Los sulfuros son la principal fuente de zinc (esfalerita (ZnS) y marmatita (ZnFeS). Este es concentrado por flotación, para posteriormente someterse a tostación para obtener oxido de zinc, el cual es sometido a una lixiviación con ácido sulfúrico para finalmente recuperarlo por electrodeposición (Pecina y col., 2008). Por esta razón, la eliminación de la etapa de tostación es considerado atractivo desde el vista económico y ambiental (Babu y col., 2002)

Los tratamientos hidrometalúrgicos de Zn son una buena opción para contrarrestar los problemas de contaminación por SO_2 y de selectividad metálica que presentan los tratamientos pirometalúrgicos. Por lo que, algunas de las alternativas hidrometalúrgicas que se han estudiado para la disolución de zinc se enfocan en la disolución de los concentrados de zinc con ácido sulfúrico mezclados con soluciones amoniacales, disolución de esfalerita en soluciones de sales férricas, dióxido de manganeso, cloruro cúprico, ácido clorhídrico y soluciones alcalinas (Crundwell, 1987; Balaz and Ebert, 1991, Perez y Dutrizac, 1991, Jin y col., 1993, , 1997, Srinivasa Rao y Paramguru, 1998; Babu et al., 2002, Da Silva, 2004).

Este trabajo presenta la comparación de la disolución de zinc a partir de un sulfuro (ZnS) en dos sistemas: ZnS/HNO_3 y $ZnS/HNO_3/O_3$ con el objetivo de observar la factibilidad técnica del uso del ozono para asistir a la lixiviación con ácido nítrico, el cual ayudara a promover la velocidad de disolución del zinc. Al mismo tiempo se estudió la solubilidad del zinc para tres densidades de pulpa para observar si existe algún tipo de saturación del zinc en la pulpa utilizada. Por lo que esta investigación considera imperativo explorar la posibilidad de utilizar un agente oxidante ambientalmente amigable para el tratamiento de sulfuros. La aplicación hidrometalúrgica del uso del ozono parece ser una opción novedosa y amigable con el medio ambiente para la metalurgia del zinc.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Preparación de la muestra

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizó sulfuro de zinc (ZnS) grado reactivo (Sigma Aldrich 333271-50G) el cual fue reducido de tamaño manualmente en un mortero de ágata, obteniendo 3 fracciones de tamaño de partícula -106 +74 µm, -38 +25µm y -25µm. Al término de la molienda las fracciones fueron lavadas con agua desionizada y posteriormente se secaron con acetona. La determinación de zinc en las soluciones de lixiviación se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica (Perkin Elmer Analyst 200).

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo 2 diferentes tipos experimentos para la lixiviación del sulfuro de zinc: a) cinética de disolución para los sistemas ZnS/HNO_3 y $ZnS/HNO_3/O_3$ en tres diferentes tamaños de partícula (-106 +75 µm, -38 +25 µm y -25 µm) y b) grado de solubilidad para tres densidades de pulpa (0.2 g, 0.5 g y 0.75 g en 250 mL) para la fracción de tamaño de -25 µm.

Para la disolución del zinc en el sistema $ZnS/HNO_3/O_3$ se utilizó el equipo experimental que se observa en la Figura 1. Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor de vidrio de 500 mL de capacidad, cerrado herméticamente y con agitación mecánica, equipado con un difusor poroso para la adición del gas. El ozono fue producido a partir de oxigeno puro y seco. La concentración de ozono en la corriente gaseosa fue previamente determinada por titulación con una solución normalizada de

tiosulfato. En un inicio se vierten 250 mL de solución de HNO_3 al 1% y se calibra la corriente gaseosa a 1 L/min (0.014 g O_3/L). Posteriormente se procede a añadir la muestra de ZnS (0.2 g para las pruebas en los sistemas ZnS/HNO_3 y $ZnS/HNO_3/O_3$) y se da inicio a la generación de ozono y se inicia el cronometraje del tiempo y la agitación mecánica a 700 rpm. Al minuto 15, 30, 45 y 60 se procede a tomar una muestra de 20 mL, la cual es filtrada para posteriormente analizar zinc en la solución. Al termino del experimento, se recuperan los sólidos que no reaccionaron para una futura caracterización. El tiempo de tratamiento con ozono fue de 60 minutos a una temperatura de 25 °C (± 2°C).

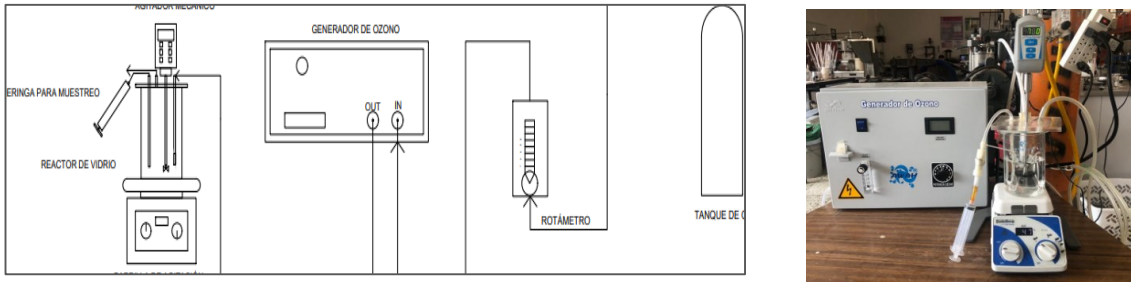


Figura 1. Sistema experimental utilizado durante la lixiviación de ZnS en el sistema HNO_3/O_3 (esquema experimental (izquierda) y fotografía (derecha))

RESULTADOS

Cinética de disolución del zinc para los sistemas ZnS/HNO_3 y $ZnS/HNO_3/O_3$

La Figura 2, presenta la cinética de disolución del zinc para las tres diferentes fracciones de tamaño de partícula para el sistema en los sistemas ZnS/HNO_3, en donde se observa que, aunque su disolución pareciera ser linear, no alcanza una disolución significativa del sulfuro de zinc a los 60 minutos, por lo que esta lixiviación sugiere que el sulfuro de zinc pudiera disolverse a tiempos más prolongados.

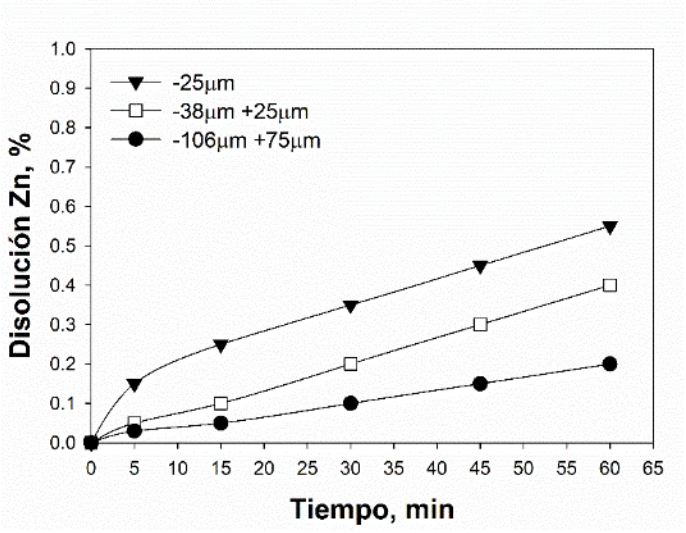


Figura 2. Cinética de disolución del zinc a tres diferentes tamaños de partícula en presencia de un medio de HNO_3 al 1%

La Figura 3 presenta la disolución del zinc en el sistema $ZnS/HNO_3/O_3$ para las 3 diferentes fracciones de tamaño de partícula, en donde se observa que la máxima disolución del sulfuro de zinc se presenta en la fracción más fina (-25µm) con un 68% de disolución, mientras que para las fracciones de -38µm +25µm y -106m +75 µm las disoluciones fueron del 42% y 28% de disolución de zinc respectivamente. Lo que sugiere que el uso del ozono para asistir una lixiviación de ácido nítrico para la disolución de sulfuro de zinc pudiera ser una alternativa para su tratamiento.

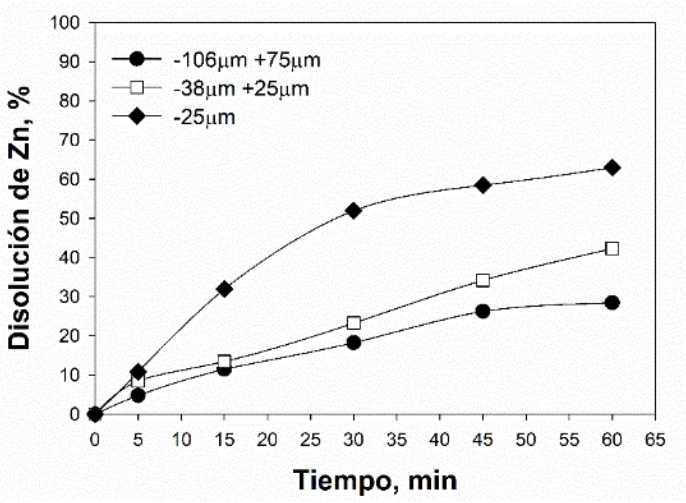


Figura 3. Cinética de disolución del zinc a tres diferentes tamaños de partícula para el sistema $ZnS/HNO_3/O_3$.

Grado de solubilidad del zinc

La densidad de pulpa no es una disolución, sino una mezcla constituida por sólidos de una granulometría casi uniforme y un líquido, generalmente el agua, por lo que, el porcentaje de solidos debe ser en la mayoría de los casos lo más alto posible para alcanzar una alta concentración del ion metálico en la solución de lixiviación. Así que, la Figura 4 nos presenta la disolución del zinc para las diferentes concentraciones de pulpa (i.e. 0.2, 0.5 y 0.75 g en 250 mL de solución lixiviante), en donde se puede observar que, aunque el porcentaje mayor de disolución del Zn (65 %) se presenta a la densidad de pulpa de 0.2 g en 250 mL de solución lixiviante, la Tabla 1, nos muestra que para la pulpa de 0.5 g en 250 mL de solución, es el que presenta una mayor disolución de zinc, disolviendo 0.1475 g de Zn. Estos experimentos surgen de la necesidad de observar el grado de solubilidad del zinc, para determinar cuál es la máxima concentración de pulpa que se puede utilizar en este sistema. En la Tabla 1, también se puede observar que se llega a una disolución de zinc constante, alrededor de 0.14 g de Zn en 250 mL de solución lixiviante (0.56 g Zn/L), lo que nos indica que para el sistema ácido-ozono-ZnS existe un punto de saturación de zinc en la solución.

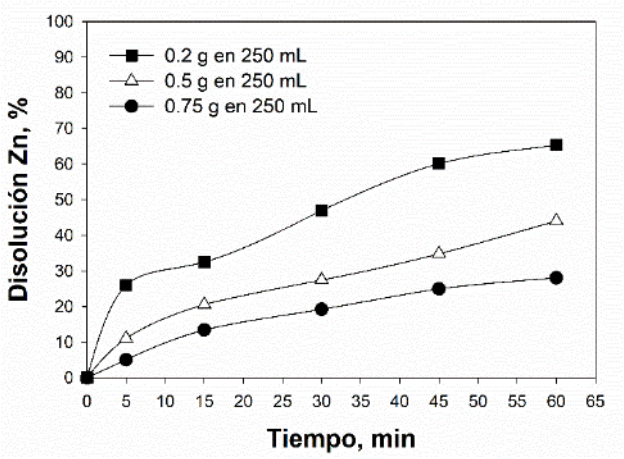


Figura 4. Cinética de lixiviación del Zn para tres concentraciones de pulpa.

Tabla 1. Disolución de zinc al minuto 60, para las 4 densidades de pulpa.

Densidad de Pulpa (g)	Disolución de Zn (mol)	(g)
0.2	0.001346	0.0875
0.5	0.002269	0.1475
0.75	0.002170	0.1411

CONCLUSIONES

En base a los resultados de este trabajo preliminar, se propone como una alternativa para la disolución de sulfuro de zinc una lixiviación ácida con ácido nítrico al 1% y utilizando ozono como agente oxidante.

Se puede observar que cuando las tres fracciones de tamaño de partícula del sulfuro de zinc se ponen en contacto solo en presencia del medio ácido de ácido nítrico, la máxima disolución de zinc es de alrededor del 0.5% en un tiempo de 60 minutos, mientras que cuando este sistema se ve asistida con una corriente gaseosa de ozono, las recuperaciones incrementan hasta un 63% de disolución de zinc para la fracción más fina (-25m). en un tiempo de 60 minutos.

Por otra parte, se observa que este sistema $HNO_3/O_3/ZnS$ alcanza una concentración de saturación de zinc de alrededor de 0.56 g de Zn/L, lo que indicaría que para este sistema se tendría que trabajar a pulpas relativamente diluidas.

Es importante mencionar que este es un estudio preliminar para demostrar la factibilidad técnica del uso del ozono como una alternativa para la disolución del sulfuro de zinc por una vía exclusiva de hidrometalurgia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CONAHCYT por el financiamiento recibido para la realización de este proyecto con el numero CB 2017-2028 A1-S-35079. Por otra parte, se agradece también al técnico-académico Martínez-Barrón J.C. por el soporte técnico.

BIBLIOGRAFÍA

Baláž P., Ebert I. 1991. Oxidative leaching of mechanically activated sphalerite. Hydrometallurgy, Vol. 27. Issue 2, 141-150

Babu M.N. , Sahu K.K. , Pandey B.D. 2002. Zinc recovery from sphalerite concentrate by direct oxidative leaching with ammonium, sodium and potassium persulphates. Hydrometallurgy, Vol. 64, Issue 2, 119-129

Crundwell F. K. 1987. Kinetics and mechanism of the oxidative dissolution of a zinc sulphide concentrate in ferric sulphate solutions. Hydrometallurgy, Vol. 19, 227-242

Da Silva G. 2004. Relative importance of diffusion and reaction control during the bacterial and ferric sulphate leaching of zinc sulphide. Hydrometallurgy, Vol. 73, Issues 3-4, 313-324

Jin M., Warren G.W., Henein H. 1993. An investigation of the electrochemical nature of the ferric chloride leaching of sphalerite. International Journal of Mineral Processing, Vol. 37, Issue 3-4, 223-238

Pecina T., Franco T., Castillo P. Orrantia E., 2008. Leaching of a zinc concentrate in H_2SO_4 solutions containing H_2O_2 and complexing agents. Minerals Engineering, Vol. 21, Issue 1, 23-30

Perez P., Dutrizac J.E. 1991. The effect of the iron content of sphalerite on its rate of dissolution in ferric sulphate and ferric chloride media. Hydrometallurgy, Vol. 26, Issue 2, 211-232

Srinivasa Rao K., Paramguru R. K., 1998. Dissolution of sphalerite (ZnS) in acidic ferric sulfate solution in the presence of manganese dioxide. Mining, Metallurgy and Exploration, Vol. 15. 29-34

REDISEÑO DE UNA PLUMA DE ACCESO AUTOMATIZADA

Ramón Hernández Sánchez, Roxana Mercado Gutiérrez, Emanuel Balanzar Gómez, Yair Yoshimar Servín Guido.

Universidad Tecnológica De La Costa Grande De Guerrero, Programa Educativo de Ingeniería en Metal Mecánica.
r_hernandez@utcgg.edu.mx

RESUMEN

El sistema pretende tener el control del acceso al estacionamiento vehicular mediante la tecnología, que es identificación por una tarjeta que será dada a todos los estudiantes y personal que labora en la institución, es decir no se necesitara oprimir ningún botón, sino que bastara con deslizar una tarjeta para activar el módulo y así mismo accionara la pluma
El control de un instituto de educación superior es un aspecto fundamental para el manejo adecuado de la misma; hablando del control de tiempo y del acceso es un requisito básico para la competitividad dentro de la escuela y seguridad del personal. Sin embargo, todavía existen muchas instituciones en las que no se considera relevante medir y controlar objetivamente el tiempo y el acceso del personal utilizando tecnología

INTRODUCCIÓN

El motivo principal de la creación del proyecto es la automatización y el apoyo para una mayor seguridad y control en el acceso vehicular. El sistema pretende tener el control del acceso al estacionamiento vehicular mediante la tecnología, que es identificación por una tarjeta que será dada a todos los estudiantes y docentes, es decir no necesita oprimir ningún botón, sino que basta con deslizar una tarjeta para activar el módulo y así mismo accionara la pluma.

TEORÍA

Una pluma de acceso automatizada puede girar en torno a la idea de utilizar tecnología avanzada, como la inteligencia artificial y la biometría, para mejorar y facilitar el acceso a lugares seguros o restringidos.
Se utilizan los elementos:

- Identificación biométrica avanzada, ya que la pluma utiliza escáneres biométricos para identificar a los usuarios autorizados mostrando sus nombres,
- también hicimos el uso de inteligencia artificial esta es utilizada para verificar la identidad del usuario en tiempo real.
- Podría integrarse con sistemas de seguridad existentes, como cámaras de vigilancia, sistemas de alarma y control de acceso físico, para proporcionar una seguridad integral

PARTE EXPERIMENTAL

La pluma de acceso automatizada se sometió a una serie de pruebas para evaluar su eficacia y rendimiento. Se realizaron pruebas exhaustivas utilizando diferentes tipos de identificación biométrica, como el reconocimiento por nombre del usuario. Esta prueba conllevo a evaluar la precisión y la velocidad del sistema en la identificación de usuarios autorizados, así como su capacidad para detectar intentos de acceso no autorizados. También se hicieron pruebas de precisión y velocidad, para esto se llevo acabo pruebas para evaluar la velocidad y la precisión del sistema en la verificación de la identidad de los usuarios. Esto implicara medir el tiempo necesario para que el sistema procede la información biométrica y determine si el usuario tiene acceso autorizado. También se hicieron pruebas para evaluar la resistencia y la seguridad física de la pluma de acceso automatizada. Esto incluyo pruebas de resistencia a intentos de sabotaje y manipulación, así como pruebas de resistencia y al desgaste.

RESULTADOS

Como resultados obtuvimos la reducción de tiempo de este y eficiencia en el acceso, lo que permitió un acceso más rápido y eficiente, reduciendo el tiempo de espera en las entradas y salidas de la institución. También obtuvimos menor necesidad de personal para operar la pluma, lo que puede reducir los costos laborales. Mejora en la seguridad de acceso ya que solo personas autorizadas pueden acceder, gracias a sistemas de identificación como lo que son las tarjetas personalizadas

CONCLUSIONES

La implementación de una pluma de acceso automatizada ha demostrado ser una mejora significativa en términos de eficiencia, seguridad, y experiencia del usuario. Los beneficios superan ampliamente los desafíos iniciales, haciendo de la automatización una opción valiosa para la gestión de accesos en diversas aplicaciones. La recopilación de datos y el análisis continuo permiten mejoras continuas, asegurando que el sistema se mantenga eficaz y relevante a medida que evolucionan las necesidades tecnológicas

BIBLIOGRAFÍA

Wordpress.com. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://silviatecno.files.wordpress.com/2012/03/tema8_plasticos.pdf
(S/f). Upv.es. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_6.html
MATERIALES PLÁSTICOS. (s/f). Slideplayer.es. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://slideplayer.es/slide/1078054/

DESARROLLAR UN MÓDULO DIDÁCTICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AUTOMOTRICES CON APLICACIÓN AL PROGRAMA EDUCATIVO DE MECÁNICA ÁREA AUTOMOTRIZ

Rafael Alberto Medina Salgado, Gabriel Aparicio Jaimes, Ramón Hernández Sánchez, Arciga Vargas

Manuel, Lucero Santos Hernández, Universidad Tecnológica De La Costa Grande De Guerrero, carretera nacional Aca – Zihua kilómetro 201, Ejido el Cocotero, Petatlán, Guerrero, 40830, México.
r_medina@utcgg.edu.mx

RESUMEN

El proyecto aborda la creación de un módulo de luces automotrices diseñado con el propósito de proporcionar a los alumnos una plataforma efectiva para adiestrarse en la instalación de sistemas eléctricos automotrices. La formación en este campo es esencial para el desarrollo de habilidades prácticas y teóricas en estudiantes de ingeniería automotriz, permitiéndoles comprender y aplicar los principios fundamentales detrás de los sistemas eléctricos en vehículos.

El diseño del módulo se basa en un enfoque didáctico que integra teoría y práctica. Se han seleccionado componentes representativos de los sistemas eléctricos automotrices relacionados con las luces del vehículo, abarcando desde la fuente de alimentación hasta los dispositivos de iluminación específicos. Se incorporan herramientas y manuales detallados para facilitar la comprensión de los conceptos eléctricos, así como para guiar a los estudiantes en la instalación y solución de problemas.

El módulo se compone de secciones teóricas, donde se explica la teoría detrás de los sistemas eléctricos automotrices y sus componentes, y secciones prácticas, donde los alumnos aplican este conocimiento en la instalación de luces automotrices en un entorno simulado. Además, se ha incorporado un sistema de retroalimentación instantánea para evaluar y corregir los errores durante el proceso de aprendizaje.

La implementación del módulo ha mostrado resultados alentadores en términos de la adquisición de habilidades por parte de los estudiantes. Se observa un aumento significativo en la comprensión de los conceptos eléctricos, así como en la capacidad para realizar instalaciones de luces automotrices de manera efectiva. La retroalimentación positiva de los participantes destaca la utilidad del módulo como herramienta de aprendizaje práctico y su contribución a la formación integral en el ramo de la ingeniería automotriz.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se centra en la creación de un modelo didáctico del sistema eléctrico de iluminación automotriz, diseñado para ofrecer a los estudiantes una plataforma sólida y consolidada para un aprendizaje práctico efectivo. Reconociendo la conexión entre las teorías del conocimiento práctico y el impacto positivo de los ejercicios prácticos y sensoriales en los estudiantes, se han incorporado elementos que integran estrechamente los conocimientos teóricos y prácticos. Esto permite a los alumnos interactuar físicamente con sistemas reales similares a los que encontrarán en un entorno de trabajo automotriz.

El diseño del módulo facilita una relación más directa con el entorno real, fortaleciendo el proceso de aprendizaje y, a su vez, promoviendo una mayor retención mental. Esto prepara mejor a los estudiantes para futuras intervenciones en el campo de la industria automotriz.

TEORÍA

Dado el objetivo que plantea a rasgos generales la importancia de la creación de modelos didácticos que ayuden en el ejercicio del aprendizaje, es importante recordar que el objetivo meta se centra sobre el desarrollo de las habilidades de los estudiantes mediante la realización de ejercicios y proyectos que no se limitan solo a los aspectos teóricos de la materia dado que los estudiantes tienen la oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos en situaciones prácticas, lo que hace que la experiencia de aprendizaje sea más completa y enriquecedora. En esencia, los alumnos aprenden a través de la acción y el descubrimiento.

Por su parte, el aprendizaje multisensorial es una metodología educativa en la que no solo se utilizan la vista y el oído para recibir información. En este enfoque, los estudiantes emplean todos sus sentidos disponibles, combinando la teoría con aspectos más prácticos y variados: tocan, huelen, prueban... Este tipo de aprendizaje es especialmente utilizado con los estudiantes más jóvenes, quienes están en las primeras etapas de su desarrollo cognitivo, emocional y social. Así, esta técnica permite enseñar las materias mediante elementos auditivos, visuales y táctiles, junto con el gusto y el olfato, haciendo que los alumnos disfruten y vivan su aprendizaje de manera integral.

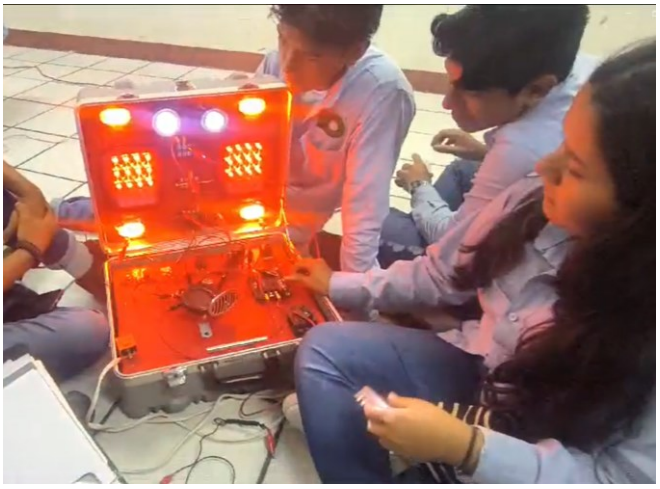


Fig. 1-1 Alumnos interactuando con modulo didáctico.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del módulo didáctico se emplearon distintos elementos sin embargo el uso de los mismo fue limitado a componentes reales para poder realizar una vez integrado todos los elementos las pruebas y practicas pertinentes. Los elementos empleados para su desarrollo fueron:

Elemento	Cantidad	Sistema que representa
Lámpara bifocal faro de ángel	2	Cambio de Luz alta y baja
Foco tipo Zepelín	4	Luz de cortesía, intermitentes y direccionales
Plafón de luz trasera	2	Luz de freno, reversa y cuartos
bocina	1	Simulando el claxon
Rack de terminal de tornillo	3	Para realizar las correcciones de forma rápido
Caja de fusibles	1	Para control y protección de circuitos
Porta relevador	4	Para relevadores y flasher

Control de luz chevy	1	Para activación de luz alta y baja
Interruptor push botón	2	Para interruptor de claxon y freno
Interruptor de 3 pasos	1	Para uso como direccionales
Interruptor de 2 pasos	1	Para activación de luz de reversa

Adicionalmente se observó que el alumno al tener la oportunidad de crear dicho modelo didáctico, comprendió aún más efectivamente la razón de fondo de la instalación de los componentes, permitiéndole abrir un panorama creativo y pertinente para proponer un acomodo idóneo de los elementos eléctricos.

Fig. 1.2 Alumnos realizando el ensamble del modelo didáctico

RESULTADOS

Una vez terminado de armar el modelo didáctico, se procedió a su utilización mediante practica en el aula de forma inicial a través de una plantilla prediseñada a la forma y distribución de los componentes del modelo didáctico.

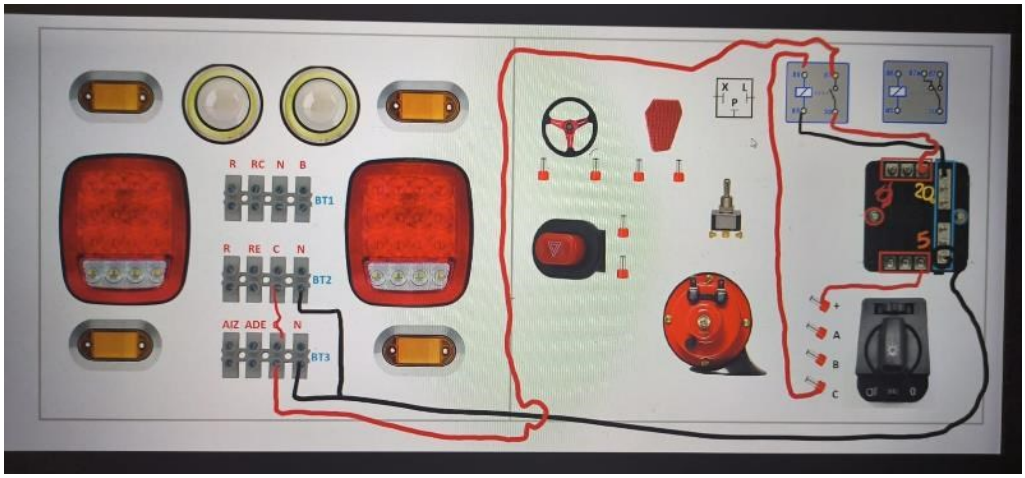


Fig. 1.3 a través de un circuito digital crean sus alternativas de conexión

Fig. 1.4 Muestra de interacción del alumno con modelo didáctico.

Una vez resuelto el ejercicio de forma práctica se procede a la conexión física de cada uno de los componentes, siguiendo un orden aleatorio según cada equipo. Para ello se crean los siguientes elementos;

Elemento	Cantidad	Características
Cable eléctrico calibre 14	12 metros / 7 unidades	Ideal para realizar las conexiones entre los elementos y los elementos de control
Relevador de 4 patas	2 pzas.	Empleados en el control eléctrico
Relevador de 5 patas	2 pzas.	Empleados en el control eléctrico
Flasher electrónico	2 pzas.	Para destello intermitente de direccionales o

CONCLUSIONES

El proyecto ha logrado desarrollar un módulo de luces automotrices que cumple con éxito su objetivo de proporcionar a los alumnos una experiencia de aprendizaje integral en la instalación de sistemas eléctricos automotrices. La combinación de teoría y práctica ha demostrado ser efectiva, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades aplicables en un entorno automotriz real. Este enfoque pedagógico puede servir como modelo para el diseño de futuros módulos de formación en el campo del conocimiento de la mecánica área automotriz, contribuyendo así al desarrollo de profesionales altamente capacitados.

Fig. 1.5 Muestra de prototipo terminado de su local.

BIBLIOGRAFÍA

1. 3 E. Aprendizaje práctico y experiencias multisensoriales. EDUCACIÓN 3.0. https://www.educaciontrespuntocero.com/noticias/aprendizaje-practico-y-experiencias-multisensoriales/#:~:text=El%20aprendizaje%20basado%20en%20la,puramente%20te%C3%B3ricos%20de%20la%20materia. Published 9 de mayo de 2021.

DISEÑO DE UN CAMPER AUTOMATICO PARA UNA CAMIONETA RANGER

Humberto Rodríguez Bravo, Silvia Alejandra Hernández Ramírez, Carlos Arturo Anguiano Luna, Juan Ángel Contreras Vargas y José de Jesús Nieto Rangel.

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato
humberto.rb@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

El presente trabajo se implementará un sistema de camper automático para camioneta Ranger 2022, el cual tendría como función mejorar el montaje del camper siéndolo portable y fácil de usar disminuyendo los accidentes que pueden suceder con un montaje manual creando la posibilidad que cualquier tipo de usuario instruido de forma correcta sea capaz de usarlo, el diseño de la camioneta se ha ido actualizando con el tiempo dando mayores comodidades, pero el camper se instala de la misma manera. En la primera etapa del desarrollo de este proyecto comenzó por conocer como era el diseño de un camper, su montaje, las medidas del camper y la camioneta acentuando el mayor interés en el sistema de anclaje del camper para determinar las dimensiones. En la segunda etapa del desarrollo se definieron los materiales que se usan en el diseño teniendo en cuenta sus características y motores que se puedan adaptar para su funcionamiento teniendo en cuenta la investigación previa. En la tercera etapa del desarrollo se trabajó en el diseño plegable para el camper pasando por muchos rediseños buscando un diseño compacto y resistente. En la cuarta etapa se calcula las inclemencias del tiempo obteniendo las presiones a las cuales está expuesta la estructura, se comenzó a ejecutar los estudios de vibraciones y de esfuerzos para saber cuál es el comportamiento de la estructura en base a los resultados se implementó un rediseño para mejorar la estructura del sistema dándole un mayor punto de apoyo, variando los materiales para tener un diseño más optimo y rentable, cuidando que el número de seguridad sea mayor a 1 para tener un diseño optimo. Con los estudios y el ensamble de la estructura se apreció que el diseño es capaz de aguantar las inclemencias del clima

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de investigación llevará a cabo el diseño de un camper de camioneta Ranger el proyecto tiene como objetivo que sea más fácil la colocación de un camper en una camioneta dado ya que es algo tediosa la colocación de este necesita tener la participación de dos a tres personas para colocarlo y cuando este no se quiere en la camioneta se tiene que desmontar y dejarlo en casa lo cual no brinda una gran portabilidad.

Para llevar a cabo dicho proceso, primeramente, se debe tener un antecedente del programa usado para el diseño y simulación por esa razón en el apartado de la teoría se tiene una descripción del software que se usa para el diseño y simulación del mismo diseño asi como los distintos cálculos que se usan en las presiones usadas en las simulaciones.

En el apartado de parte de metodología se encuentran los cálculos que se usan para obtener los valores de las presiones usadas en los estudios representando las presiones por medio de tabla siendo los cálculos de los distintos valores calculados.

En el apartado de resultados se encuentran las representaciones graficas de las simulaciones de los distintos estudios de las presiones a las cuales están expuestas la estructura y sus posibles deformaciones.

TEORÍA

SolidWorks.

SolidWorks es un software CAD desarrollado actualmente por Dassault Systemes (Suresnes, Francia) a través de su compañía subsidiaria SolidWorks Corp., para el diseño mecánico 3D. El programa basa su potencial en el modelador paramétrico de solidos que utilizan el kernel Parasolid. Su primera versión apareció en el año 1995 (SolidWorks 95) y desde entonces compite en el mercado con diferentes soluciones CAD de similares características como Pro ENGINEER, NX, Solid Edge, CTIA, y Autodesk Mechanical Desktop.

Simulación realizada con SolidWorks Simulation.

SolidWorks Simulation permite comprobar virtualmente el comportamiento de los modelos diseñados en sus fases más iniciales de desarrollo, sin la necesidad de construir prototipos reales (Figura 1). Esto permite identificar de forma prematura cualquier tipo de problema que pudiese ocurrir con el producto sometido a las condiciones normales de uso, permitiendo de mejorar el diseño desde sus primeras fases de desarrollo y abarata costes en la fabricación de prototipos y la realización de ensayos reales, además de mejorar la calidad de los productos finales.

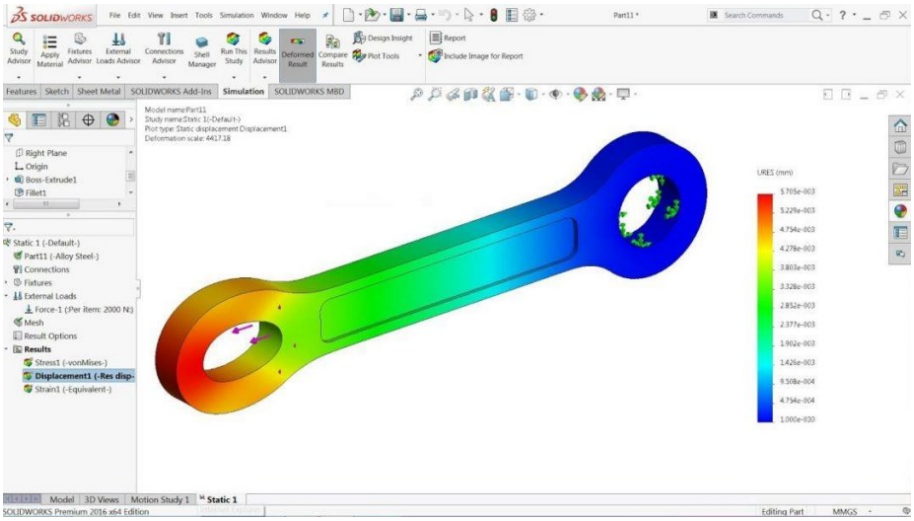


Figura 1. Ejempló de simulación.

Si interfaz simple e intuitiva permite al usuario manejar con facilidad todos los parámetros necesarios para la realización de estudios, pudiendo someter las piezas y conjuntos modelados a todo tipo de ensayos, como pruebas de esfuerzo, impactos, etc., con diferentes soluciones geométricas o diferentes materiales. Esto propicia de manera considerable la innovación en el diseño, ya que la posibilidad de hacer más ensayos sin elevados costes permite al diseñador proponer más conceptos diferentes y comprobar la validez de estos que utilizando los antiguos sistemas de diseño [1].

Presiones de viento

El efecto del viento sobre las construcciones se refiere a la acción accidental que produce el aire en movimiento sobre los objetos que se le interponen, y consiste, de empujes y succiones, como se muestra en la (Figura 2).

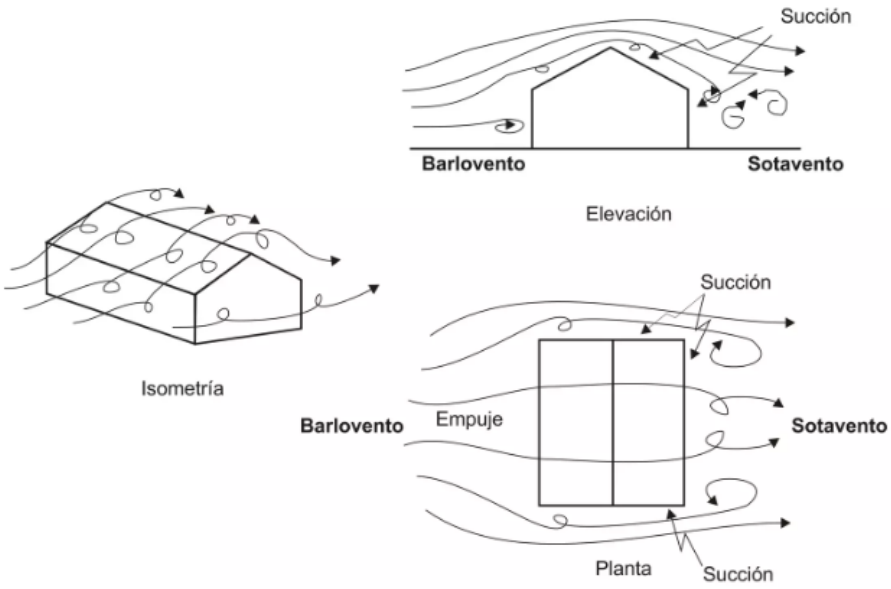


Figura 1. Acciones del viento sobre un galpón.

Las construcciones proyectadas para resistir la acción del viento deberían permanecer estables, entendiéndose por estable cuando la variación no ocasione deformaciones excesivas o tenciones que agoten la resistencia de los componentes o de la estructura en su totalidad de los ocupantes o que puedan causar daños a los componentes de la estructura [2].

Análisis modal

El Análisis Modal es una técnica para determinar las características dinámicas del sistema como frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y forma de modos, y así utilizarlos para formular un modelo matemático que represente su comportamiento dinámico. El modelo matemático obtenido es el llamado modelo modal de un sistema y su información es referida como su información modal. El análisis modal está basado en el hecho que la respuesta de vibración de un sistema lineal dinámico de tiempo invariante que puede ser expresada como la combinación lineal de movimientos simples armónicos llamados modos naturales de vibración [3].
La manera más sencilla de analizar un resorte físicamente es mediante su modelo ideal global y bajo la suposición de que este obedece la Ley de Hooke (Figura 3a).
De igual manera, se representan los diferentes modos de vibración que se pueden obtener en dicho sistema (Figura 3b)

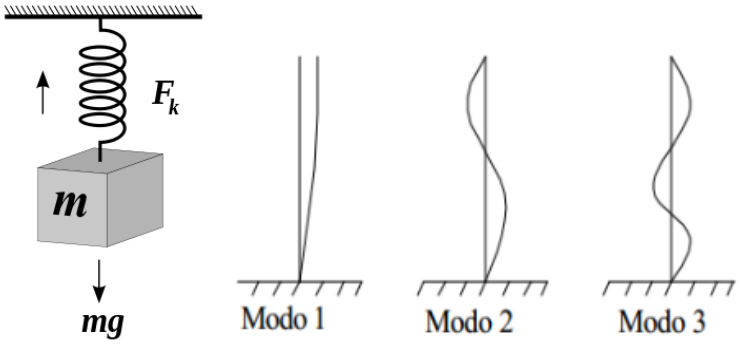


Figura 2. a) Representación de sistema masa resorte. b) Diferentes modos de vibración.

La ecuación general que describe el movimiento de este sistema de un grado de libertad se muestra a continuación (Ecuación 1).
En la cual, los parámetros utilizados son los siguientes:

m: Masa

ẍ: Aceleración

K: Constante del resorte

x: Posición de la masa

$$\boldsymbol{m\ddot{x} + Kx = 0} \text{ ------ (Ecuación 1)}$$

Para calcular la frecuencia natural de un sistema, es necesario saber el valor de la constante del resorte y la masa, de esta manera podemos aplicar la Ecuación 2, que se muestra a continuación [4].

$$\boldsymbol{w = \sqrt{k/m}} \text{ ------- (Ecuación 2)}$$

METODOLOGIA

Para obtener las dimensiones de la caja de la camioneta se utilizó un flexómetro con el cual se obtuvo Que el largo de la caja es de 144.4 cm y el ancho es de 141.2 cm. En la (Tabla 1) se tiene los cálculos que se usan para calcular las presiones del granizo y el viento.

Tabla 1. Cálculos.

Estudio estático de presión de granizo		
Volumen.	$v = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot r^3$	$v = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot 4^3 = 150.7964\ cm^3$
Masa	$m = v \cdot d$	$m = 150.7964 cm^3 \cdot 0.92\ g/cm^3 = 138.7327 g$
Fuerza	$F = m \cdot a$	$F = 0.0138 kg \cdot 9.8\ m/s^2 = 0.1352 N$
área	$A = b \cdot h$	$A = 144.4 cm \cdot 141.2 cm = 20389.28 cm^2$
Presión	$P = \frac{F}{A}$	$P = \frac{91.9632 N}{2.0389 m^2} = 45.3438\ N/m^2$
Estudio estático de presión de viento.		
Presión del viento según la altura	$V_h = V\left(\frac{h}{10}\right)^{0.22}$	$V_h = 118\ km/hr \left(\frac{1.873 m}{10}\right)^{0.22} = 81.6282\ km/hr$
Barlovento	$P_{hb} = (0.005)(C)(V_h)^2$	$P_{hb} = (0.005)(0.8)(81.6282\ km/hr)^2 = 26.6526\ kg/m^2$
Sotavento	$P_{hs} = (0.005)(C)(V_h)^2$	$P_{hb} = (0.005)(0.6)(81.6282\ km/hr)^2 = 19.9894\ kg/m^2$

En la (Tabla 2) se tienen las presiones del granizo de distintos diámetros los en rojo están resaltado el valor que se usa en la simulación como se aprecia se usaran los valores más grandes para tener mayor resistencia en los resultados lo cual asegura que los granizos de diámetro menor no representan ningún problema.

Tabla 2. Presiones del granizo.

Diámetro del granizo (⌀ cm)	Presión con la densidad de 0.92 g/cm^3(680 granizos)
1 cm	$0.0000008\ N/mm^2$
2 cm	$0.000007\ N/mm^2$
3 cm	$0.00002\ N/mm^2$
4 cm	$0.00005\ N/mm^2$
5 cm	$0.0001\ N/mm^2$
6 cm	$0.00019\ N/mm^2$
7 cm	$0.0003\ N/mm^2$
8 cm	$0.0004\ N/mm^2$
9 cm	$0.0006\ N/mm^2$
10 cm	$0.0008\ N/mm^2$
11 cm	$0.0011\ N/mm^2$
12 cm	$0.0015\ N/mm^2$
13 cm	$0.0019\ N/mm^2$
14 cm	$0.0024\ N/mm^2$
15 cm	$0.0029\ N/mm^2$

En la (Tabla 3) se tiene las presiones del viento que se dividen en barlovento y sotavento teniendo en cuenta distintas velocidades de viento y resaltando en rojo el valor usado en las simulaciones ambos valores son necesarios para hacer el estudio y las presiones ser usaran en las caras paralelas al camper se usan los valores de las velocidades de viento más grandes para que no represente ningún problema los valores más pequeños.

Tabla 3. Presiones del viento.

Velocidad del viento (km/h)	Presión en barlovento	Presión en sotavento
1 km/h	$0.0019kg/m^2$	$0.0014\ kg/m^2$
5 km/h	$0.0478\ kg/m^2$	$0.0358\ kg/m^2$
11 km/h	$0.2316\ kg/m^2$	$0.1737\ kg/m^2$
19 km/h	$0.6910\ kg/m^2$	$0.5182\ kg/m^2$
28 km/h	$1.5006\ kg/m^2$	$1.1255\ kg/m^2$
38 km/h	$2.7640\ kg/m^2$	$2.0730\ kg/m^2$
49 km/h	$4.5958\ kg/m^2$	$3.4468\ kg/m^2$
61 km/h	$7.1225\ kg/m^2$	$5.3419\ kg/m^2$
74 km/h	$10.4818\ kg/m^2$	$7.8614\ kg/m^2$
88 km/h	$14.8231\ kg/m^2$	$11.1173\ kg/m^2$
102 km/h	$19.9247kg/m^2$	$14.9360\ kg/m^2$
118 km/h	$26.6526\ kg/m^2$	$19.9894\ kg/m^2$

La (Figura 4) representa la estructura del camper del lado izquierdo es la posición de guardado y del lado derecho es la posición del camper colocado.

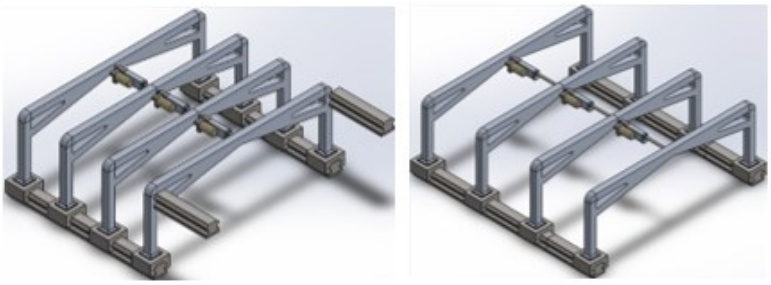


Figura 4. Estructura.

RESULTADOS

Granizo

En el desplazamiento tiene una máxima es de 2.310e +01 N $mm2/$ y un mínimo de 1.000e −30 N $mm2/$ (Figura 5) hay dos puntos de desplazamiento muy marcados en las esquinas de la lona del camper los cuales son los puntos más propensos a la presión están marcados en verde.

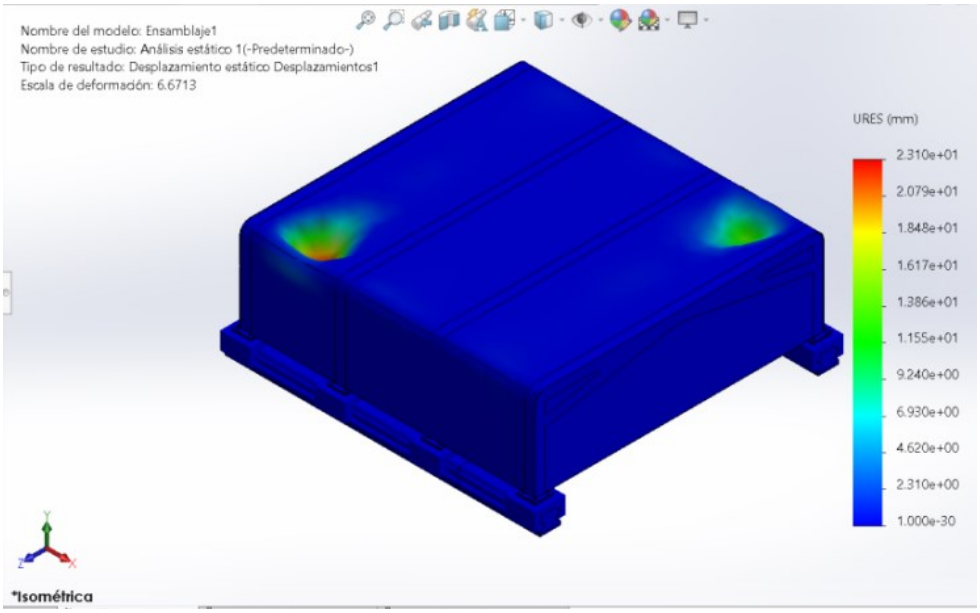


Figura 5. Resultados desplazamientos (granizo).

En la deformación tiene una máxima de 8.415e −03 N $mm2/$ y un mínimo de 4.720e −13 N $mm2/$ (Figura 6) las deformaciones más marcadas se aprecian en los mismos puntos que la (Figura 5) están representados en verde, pero la deformación sigue siendo mínima.

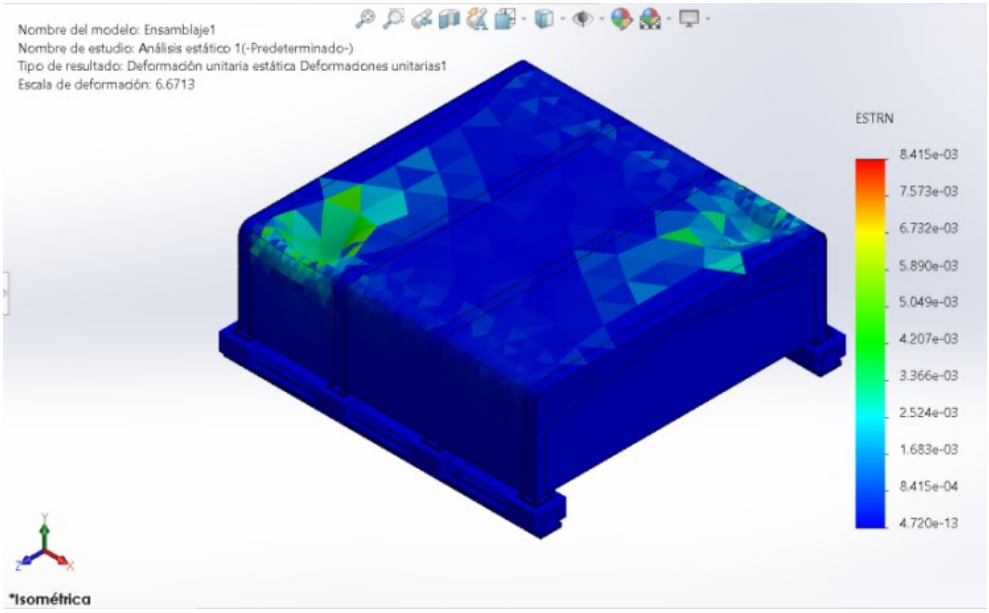


Figura 6. Resultados deformación (granizo).

Dio un factor de seguridad de 3.2 por lo tanto 3.2>1 por lo cual si es fiable (Figura 7) este valor tiene un sesgo que hace posible que pueda soportar tres veces más la presión que estamos aplicando sin llegar a romperse.

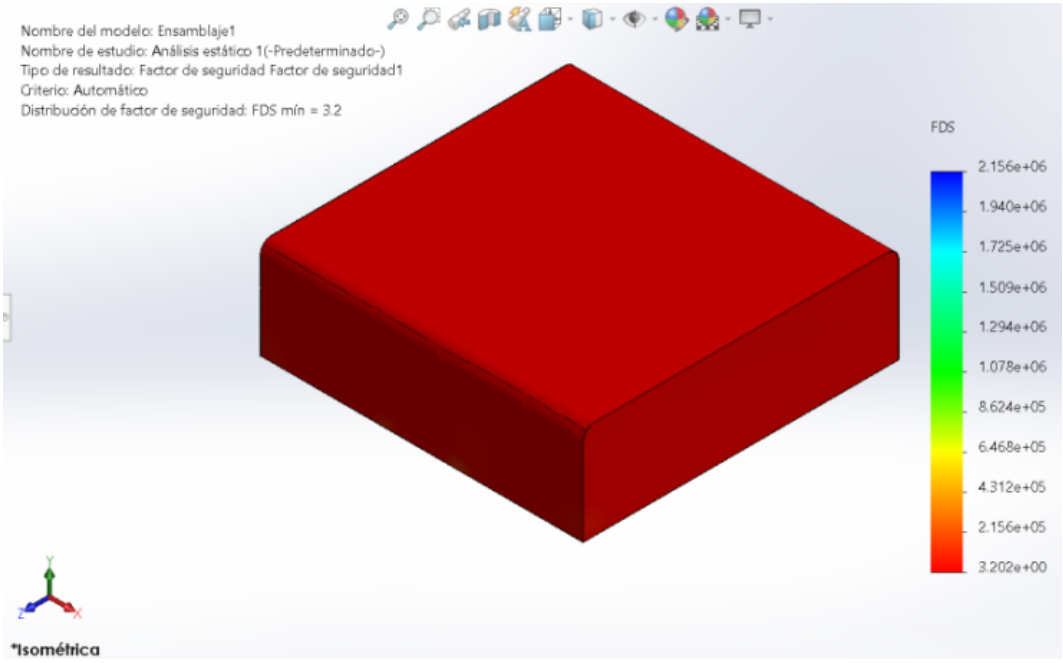


Figura 7. Resultados de factor de seguridad (granizo).

Viento

En el desplazamiento se tiene una máxima es de 4.279e +00 N $mm2/$ y un mínimo de 1.000e −30 N $mm2/$ (Figura 8) se presenta un desplazamiento en la esquina inferior izquierda de la lona y en la de la derecha dado que se encuentra una circulación de aire porque no sella al cien por ciento su paso.

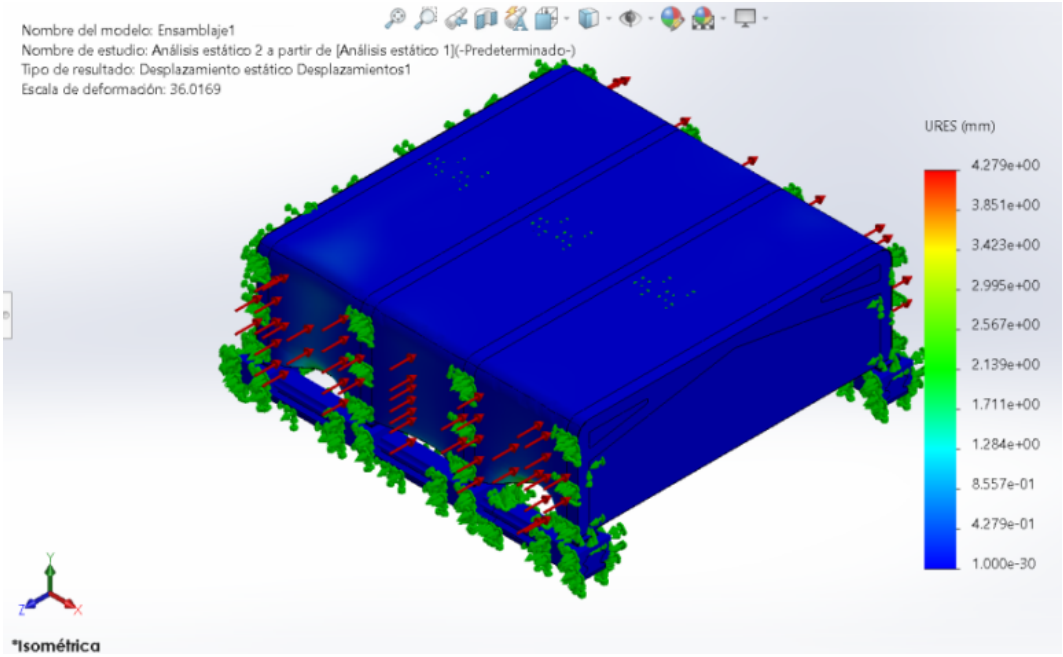


Figura 8. Resultados desplazamientos (viento).

En la deformación se tiene una máxima es de 1.187e −03 N $mm2/$ y un mínimo de 5.917e −14 N $mm2/$ (Figura 9) las deformaciones más marcadas se encuentran en los mismos puntos de la (Figura 8) pero no son tan grandes como para romper la lona.

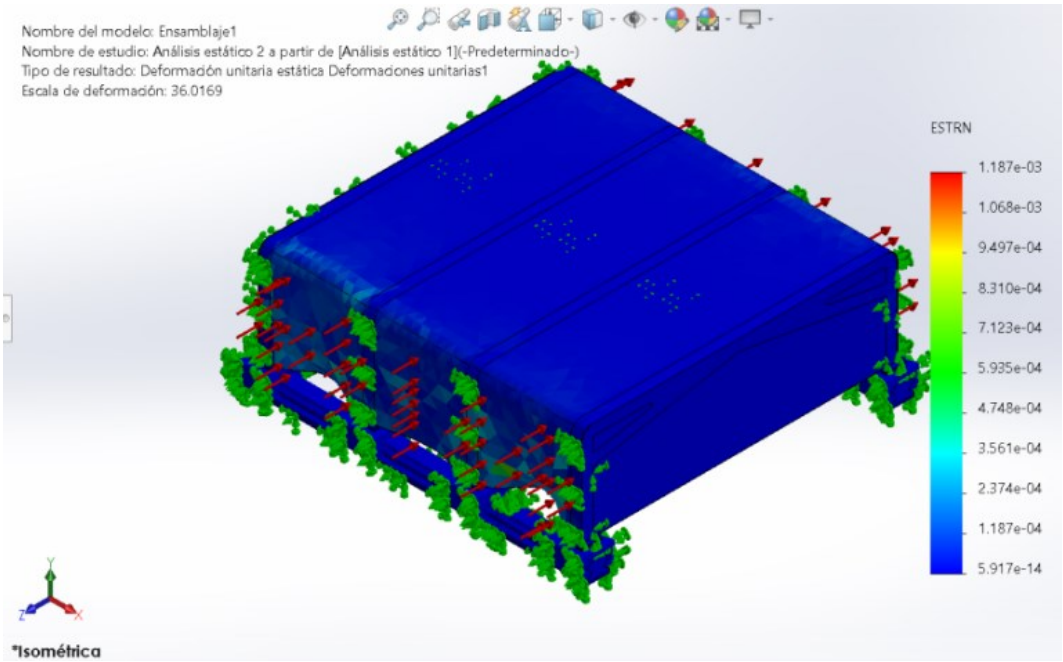


Figura 9. Resultados deformaciones (viento).

En el factor de seguridad se seleccionó la lona igual que el anterior estudio y desplego el resultado de un factor de seguridad de 15 por lo tanto 15>1 por lo cual si es fiable (Figura 10) este valor tiene un sesgo que hace posible que pueda soportar quince veces más la presión que estamos aplicando sin llegar a romperse.

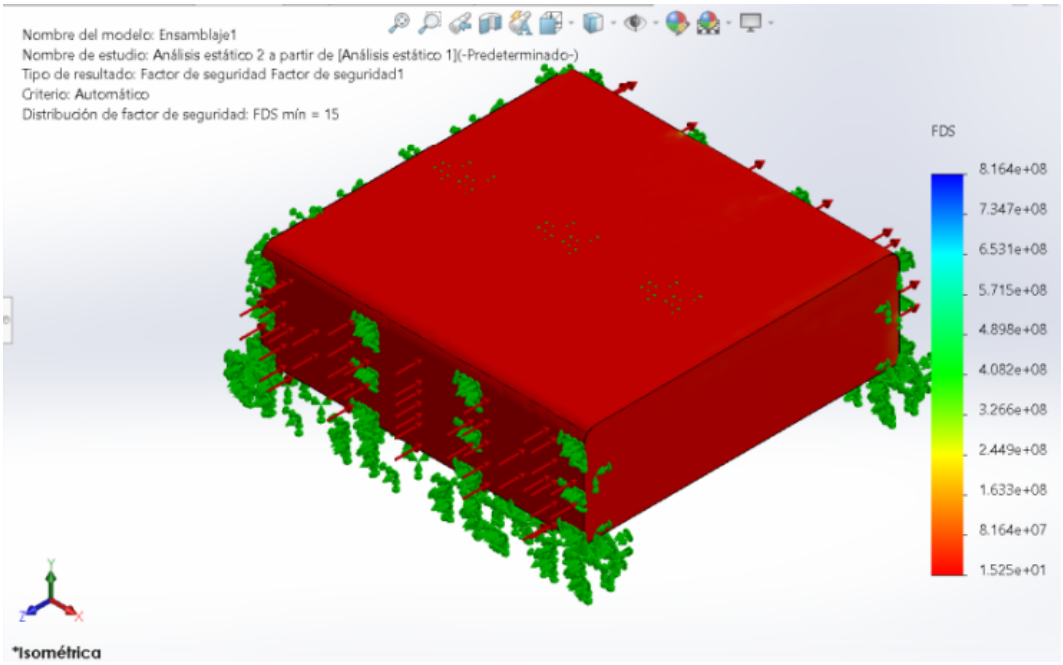


Figura 10. Resultados de factor de seguridad (viento).

Vibraciones

En la amplitud 1 se tiene 1.6087Hz con una deformación que se ubica en la parte izquierda que es la que está pegada a la cabina (Figura 11) presenta deformación en la cara de la lona del lado izquierdo donde va pegado a la cabina es donde tenemos mayo movimiento por las vibraciones, pero no presentan mayor movimiento.

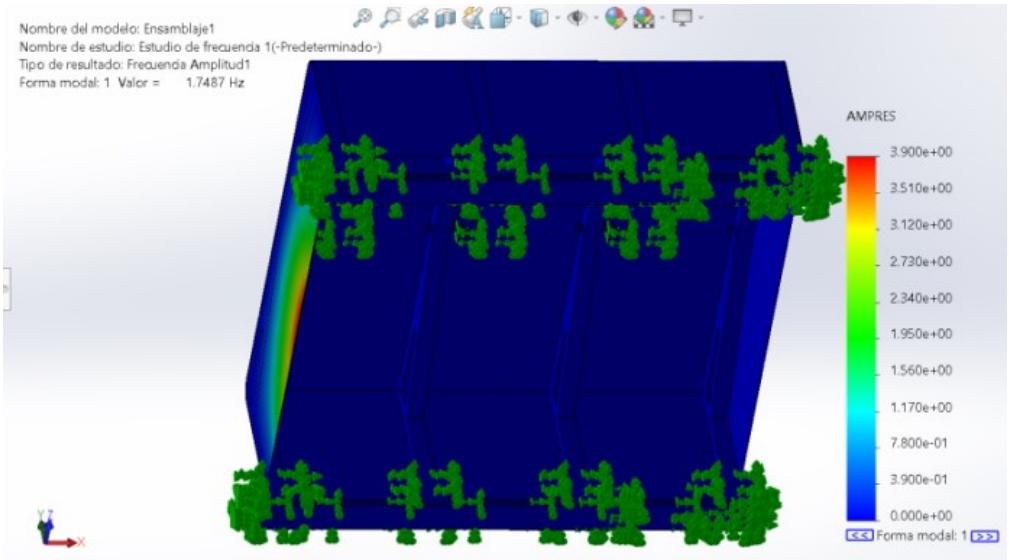


Figura 11. Resultados amplitud 1.

En la amplitud 2 se tiene 3.5177Hz con una deformación de 0.0436364 que se ubica en la parte izquierda que es la que está pegada a la cabina y solo se deforma hacia dentro del camper (Figura 12) al subir la amplitud suele ser mayor los movimientos de la lona, pero sigue siendo en el mismo punto.

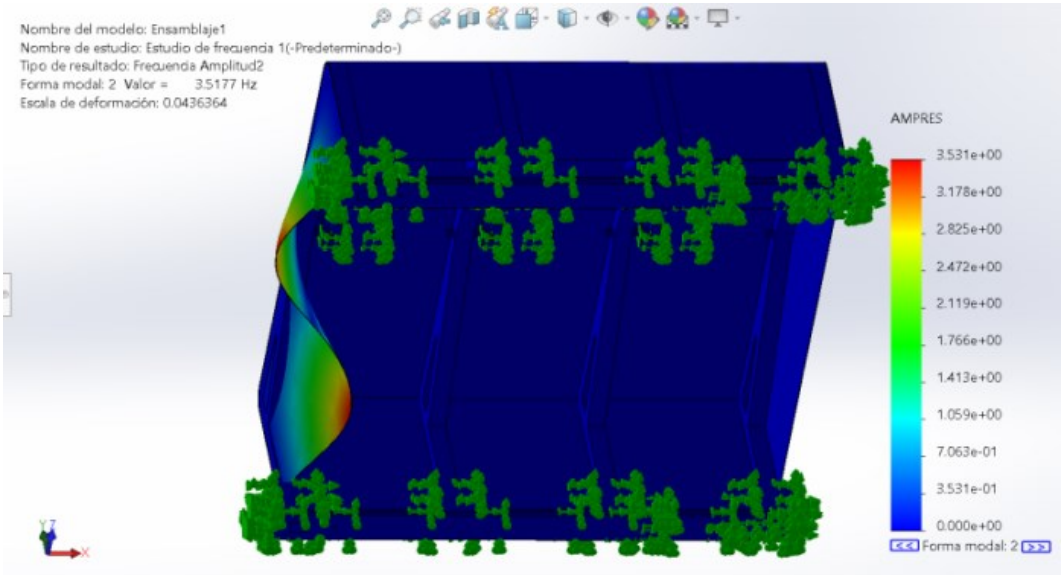


Figura 12. Resultados amplitud 2.

En la amplitud 3 se tiene 6.0409Hz con una deformación de 0.044669 que se ubica en la parte izquierda que es la que está pegada a la cabina y solo se deforma hacia dentro del camper (Figura 13) al subir la amplitud ahora oscila en tres curvas en la misma cara de la lona dado que la vibración es mayor.

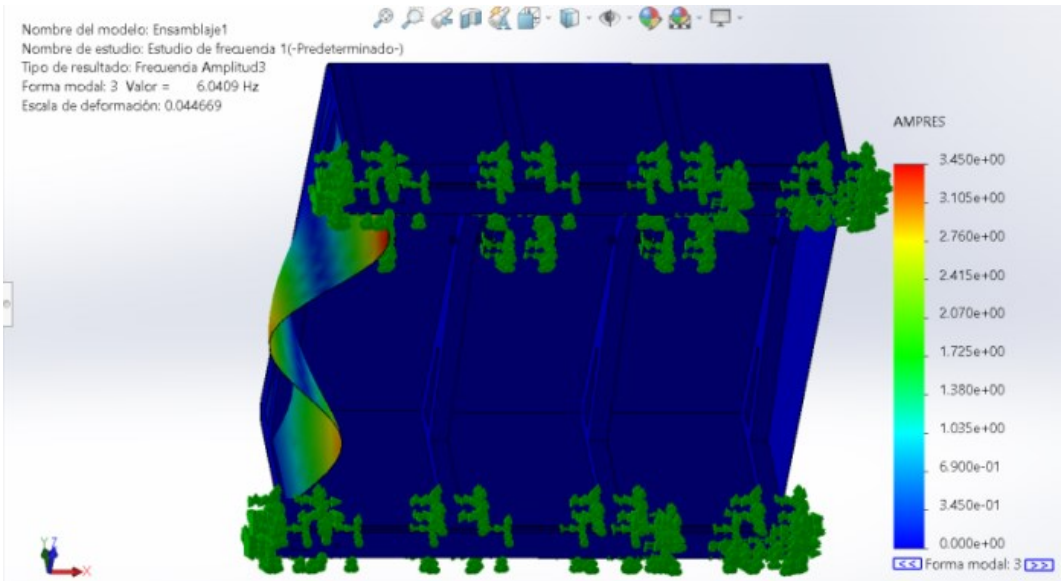


Figura 13. Resultados amplitud 3.

En la amplitud 4 se tiene 8.9872Hz con una deformación de 0.0387975 que se ubica en la parte izquierda que es la que está pegada a la cabina y solo se deforma hacia dentro del camper (Figura 14) en este nivel de amplitud se mueve de forma más horizontal cambiando el comportamiento que teníamos en las amplitudes anteriores, pero sique siendo capaz de resistir.

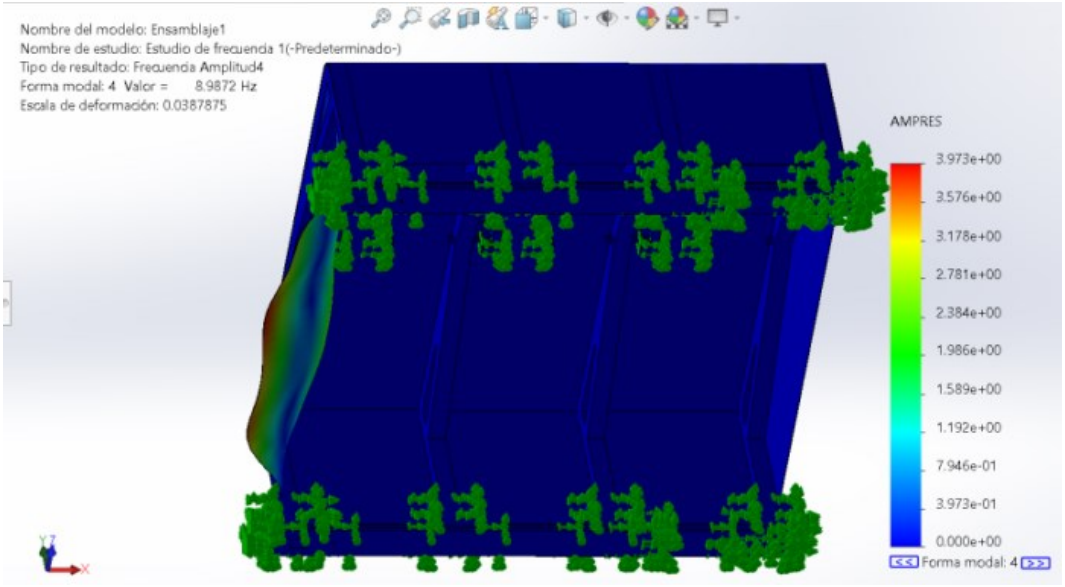


Figura 14. Resultados amplitud 4.

En la amplitud 5 se tiene 10.532Hz con una deformación de 0.0489685 que se ubica en la parte izquierda que es la que está pegada a la cabina y solo se deforma hacia dentro del camper (Figura 15) la deformación se encuentra en el lado izquierdo dándoles tres curvas a la deformación de la lona la cual sería la deformación más grande que se obtuvo, pero sigue estando dentro de los estándares son valores de vibraciones altos.

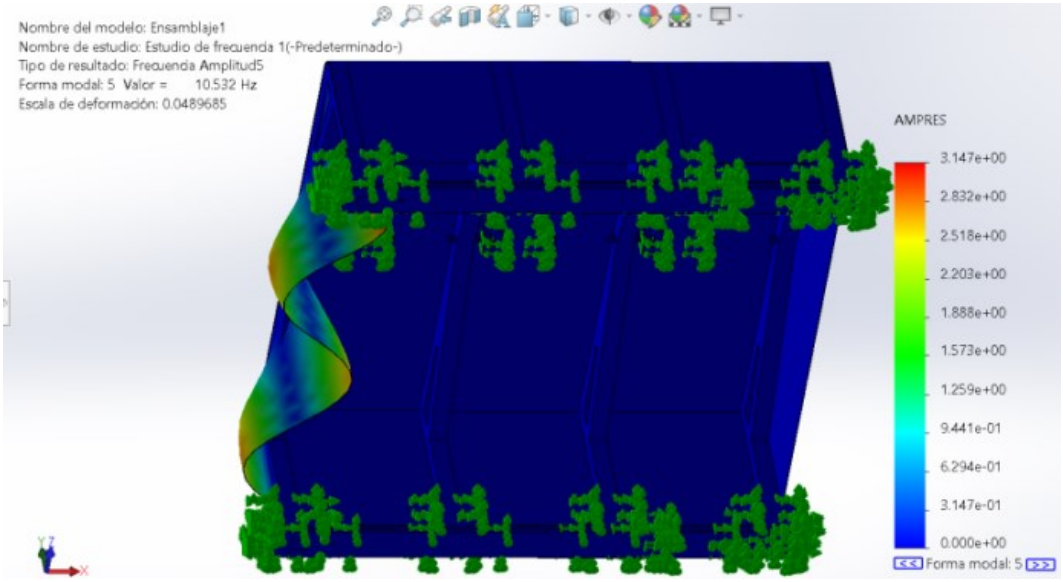


Figura 15. Resultados amplitud 5.

La siguiente tabla identifica los valores de seguridad con distintas mallas (Tabla 4) representan los resultados de los factores de seguridad los cuales son óptimos dando valores mayores a y lo cual representa que la estructura es segura.

Tabla 4. Valores de malla.

Factor de seguridad	Malla fina	Malla 3/4	Malla gruesa
Granizo	**3.2**	**8.5**	4.3
Viento	**15**	**39**	100

CONCLUSIONES

En conclusión al simular las presiones en el diseño en SolidWorks da un resultado seguro ya que los factores de seguridad son mayores a 1 lo cual determina que el límite elástico es mayor al esfuerzo del diseño como se aprecia en la figura 5 que se obtuvo un factor de seguridad de 3.2 y en la figura 8 que se obtuvo un factor de seguridad 15 lo cual significa que los materiales son lo suficiente dúctiles y no se rompen por los esfuerzos estos factores tiene un remanente el cual permite soportar una presión más alta; en la tabla 4 representa los factores de seguridad con distintos tamaños de malla una densidad de malla más fina da mayor precisión en los resultados de simulación pero requiere más tiempo de cálculo.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Carlos Rodríguez Vidal, Juan López Maroño. (noviembre del 2015). Diseño mecánico con SolidWorks 2015.
2. Ing. Eduardo Arnal, Ing. Arnaldo Gutierrez, Arq. Felipe Montemayor, Ing Felix Achabal (junio del 2014). Proyecto y construcción de galpones modulares.
3. GARCÍA LAZO, Pierre Francisco. (2009). Análisis de fatiga en piezas mecánicas usando el método de los elementos finitos
4. He, J., & Fu, Z.-F. (2011). Modal analysis. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.

MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR COMPORTAMIENTO ESPERADO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA DE DISTRIBUIDOR VIAL

José M. Jara Guerrero[1], René Morales Govea[1], Jessica M Reyes Mejía[2], Guillermo Martínez *Ruiz*[1]

[1]Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, [2]Universidad Autónoma del Estado de México
jose.jara@umich.mx

RESUMEN

Los puentes son estructuras necesarias y muy relevantes en el transporte de personas y mercancías, cuya falla origina pérdidas económicas importantes y en algunos casos también pérdidas humanas. Cuando se localizan dentro de una población, la consecuencia de su posible falla puede involucrar un mayor número de personas afectadas. Los distribuidores viales son estructuras que deben ser estudiadas debido a que su propia geometría las hace más vulnerables ante la acción de temblores que los puentes tradicionales. El trazo geométrico normalmente incluye estructuras curvas que han mostrado a nivel mundial mayor vulnerabilidad sísmica. En este trabajo se presenta la creación de un modelo numérico de un distribuidor vial de la ciudad de Morelia que sirve como base para conducir estudios sobre la vulnerabilidad sísmica de esta estructura. Se inicia describiendo un conjunto de mediciones de vibración ambiental realizadas con acelerómetros portátiles para determinar experimentalmente las propiedades dinámicas de los puentes. Posteriormente, se crea un modelo numérico con el programa de análisis SAP2000 que permite obtener la respuesta sísmica esperada ante la aplicación de espectros de respuesta o de la acción de registros sísmicos. Los resultados muestran que el modelo numérico es adecuado para describir el comportamiento sísmico esperado del distribuidor vial, en virtud de su cercanía a los resultados experimentales obtenidos con las mediciones de vibración ambiental. Finalmente, el modelo fue sometido a un conjunto de acelerogramas escalados para la peligrosidad sísmica esperada en el sitio. El escalamiento se realizó para la aceleración máxima del terreno esperada para un periodo de retorno Tr=475 años, valor frecuentemente utilizado en reglamentos de diseño sísmico. Los resultados muestran que, para esta demanda sísmica, el comportamiento esperado es adecuado considerando los parámetros señalados en la reglamentación vigente.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura urbana de una ciudad, es muy importante para garantizar la seguridad de los ciudadanos y para encauzar esfuerzos hacia la resiliencia de la población. Este estudio se enfoca en un distribuidor vial recientemente construido en Morelia, Michoacán, México, y busca determinar sus propiedades dinámicas, como paso inicial, para cuantificar su vulnerabilidad ante eventos sísmicos.

Cuando se desea evaluar la vulnerabilidad sísmica de una estructura, se deben conocer sus propiedades dinámicas puesto que de ello depende su comportamiento esperado. En ocasiones estas propiedades se determinan con base únicamente en modelos numérico que suponen la calidad y resistencia de los materiales que integran a la estructura, lo que incrementa la incertidumbre en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

Entre las pruebas no destructivas más utilizadas para conocer las propiedades dinámicas de una estructura existente, se encuentra el análisis modal operacional que consiste en realizar campañas de mediciones de vibración ambiental (Döhler, et al., 2014; Ivanovic, et al., 2000; Chang, et al., 2003). Las mediciones de vibración ambiental registran el movimiento de una estructura que es excitada por ruido de fondo (viento, tránsito vehicular aledaño, etc.). Estas mediciones representan series de tiempo que se transforman al dominio de la frecuencia con análisis de Fourier. La determinación de

las frecuencias fundamentales de vibración se realiza calculando espectros de Fourier. Las campañas de medición se llevan a cabo con acelerómetros uniaxiales o triaxiales que conectados a un equipo de adquisición registran la historia de aceleraciones en el dominio del tiempo. Posteriormente, el proceso numérico de estas mediciones experimentales conduce a identificar las propiedades dinámicas de la estructura, que sirven para calibrar modelos numéricos para determinar el comportamiento esperado de una estructura ante acciones sísmicas.

El objetivo fundamental de este trabajo es realizar mediciones de vibración ambiental y, con base en la técnica FFD (Descomposición en el Dominio de la Frecuencia), identificar los modos y frecuencias de vibrar de en un distribuidor vial, que permitan calibrar modelos numéricos para estimar su respuesta dinámica y vulnerabilidad ante movimiento del terreno.

DESCRIPCIÓN DEL DISTRIBUIDOR VIAL

El distribuidor vial se encuentra en el oriente de la ciudad de Morelia y conecta importantes vialidades. En la dirección Poniente-Oriente une la carretera Morelia-Guadalajara con la carretera que conduce hacia las carreteras al oriente de Morelia. En la dirección Norte-Sur, une de forma continua el libramiento oriente de la ciudad de Morelia. El viaducto norte tiene una longitud total de 548 metros y se soporta en 15 pilas con alturas que oscilan desde 8 y 16 metros (Figura 1). Su superestructura se compone de 14 claros simplemente apoyados de 40 metros y en ambos extremos existen estribos.

Figura 1. Vista inferior del distribuidor vial en proceso de construcción. Se observan las pilas formadas por una columna y los viaductos sur (izquierda) y norte (derecha).

La gaza norte tiene una longitud de 83 metros y se apoya en cinco pilas con alturas en el intervalo de 8 a 16 metros. Los claros simplemente apoyados tienen una longitud de 15 metros. El viaducto sur tiene una longitud total de 334 metros y descansa sobre nueve pilas con alturas que varían entre 8 metros y 14 metros. Se compone de ocho claros simplemente apoyados con una longitud de 40 metros cada uno. La gaza sur (Figura 2), tiene una longitud de 95 metros y se apoya en seis pilas que exhiben alturas fluctuantes entre 8 metros y 14 metros. El claro entre las pilas es de 15 metros.

Los cabezales de las pilas son de concreto reforzado con resistencia f'c=400 kg/cm², de 3.6 metros de altura y 10.2 metros de ancho. Los claros son soportados por trabes tipo cajón CA-180 (f'c=400 kg/cm²) y apoyados en neoprenos de altura variable. La superficie de rodamiento se compone de losa de concreto reforzado y una capa de asfalto.

Figura 2. Vista lateral de la gaza sur del distribuidor vial durante su proceso de construcción.

MEDICIONES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Para estimar las propiedades dinámicas de la estructura, se realizaron dos campañas de medición de vibración ambiental utilizando acelerómetros triaxiales de marca Kinemetrics. Los sensores se conectan con cables a una consola de adquisición, que registra la vibración de la estructura en los puntos donde se localizaron los acelerómetros. Las campañas de medición se realizaron sobre el viaducto y la gaza norte.

En la primera campaña de medición, se colocaron los sensores sobre la gaza norte en la vialidad Salamanca-Acueducto. Los acelerómetros se colocaron en la mitad del ancho de calzada, en el centro de cada claro, a una distancia de un cuarto del claro y en los extremos de cada uno de ellos. En todas las mediciones se dejó un acelerómetro de referencia fijo, mientras se movían a los largo de la gaza los demás sensores. Las mediciones se realizaron con duración de 10 minutos cada una de ellas (Figura 3).

Figura 3. Campaña de medición de la vibración ambiental del distribuidor vial. Se muestra la ubicación de los acelerómetros triaxiales en una de las mediciones.

La segunda campaña se llevó a cabo en un tramo recto en dirección Acueducto-Mil Cumbres (Figura 4). Los puntos de medición se ubicaron sobre claros centrales, colocando los sensores al centro de cada claro, a un cuarto del claro y en los extremos. Se midieron dos tramos del puente con esta distribución y posteriormente se realizaron mediciones a lo largo de la longitud total del tramo recto

colocando los acelerómetros al centro de cada claro. En todos los casos de medición, se mantuvo nuevamente un sensor de referencia fijo. En cada posición de los sensores, la medición tuvo también una duración de 10 minutos.

Figura 4. Campaña de medición de la vibración ambiental del distribuidor vial en tramo recto del viaducto norte. Se muestra la ubicación de los acelerómetros triaxiales en una de las mediciones.

Los datos de las mediciones proporcionan historias de aceleración en el tiempo, para tres direcciones ortogonales debido a la vibración del puente originada por ruido de fondo. Posteriormente, los registros se procesaron utilizando el software ARTEMIS (SVS, 2015). Este software calcula espectros de Fourier y densidades espectrales de las señales obtenidas para desacoplar la respuesta en valores singulares, con base en los cuales se estiman las frecuencias de vibrar del puente. Para ello, se empleó la metodología de análisis modal operacional y descomposición en el dominio de frecuencia mejorado (OMA-FDD), con lo que se identificaron los modos de vibración de la estructura.

El proceso de OMA-FDD implica el uso de algoritmos matemáticos para descomponer las respuestas de vibración registradas en frecuencias modales de un grado de libertad (valores singulares), lo que permite estimar las características dinámicas de la estructura (Figura 5).

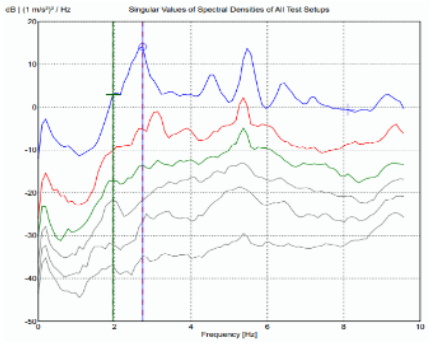
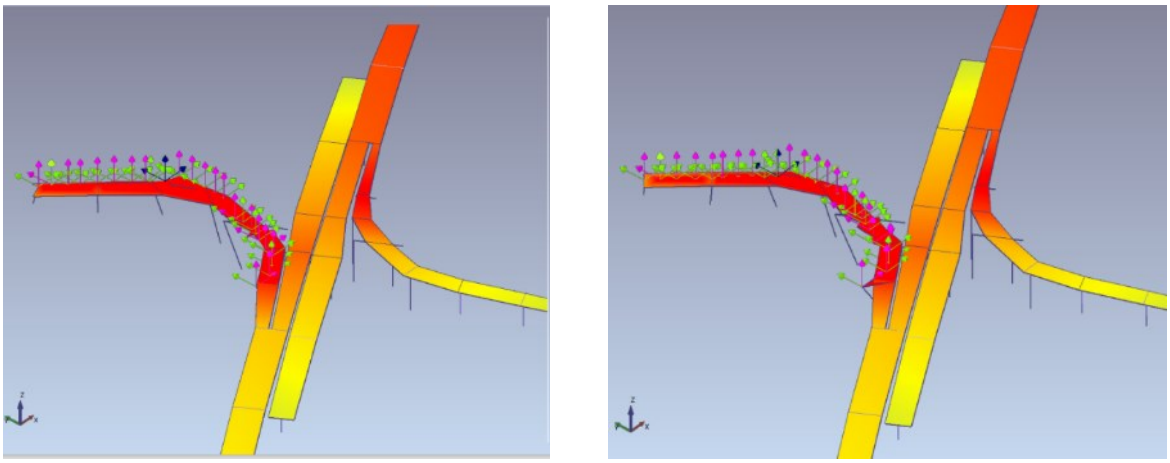


Figura 5. Valores singulares de las densidades espectrales utilizando todas las mediciones de vibración ambiental realizadas en la gaza norte.

RESULTADOS

Para mostrar animadamente los modos de vibrar identificados, el programa ARTEMIS (SVS, 2015) requiere que se introduzca la geometría del distribuidor vial, la posición de los acelerómetros utilizados en las mediciones y las historias de aceleración obtenidas en cada campaña de medición. Con ello, se realizó el proceso numérico que arrojó los resultados mostrados en la Figura 5. En esta figura se muestran los modos identificados para la gaza norte.

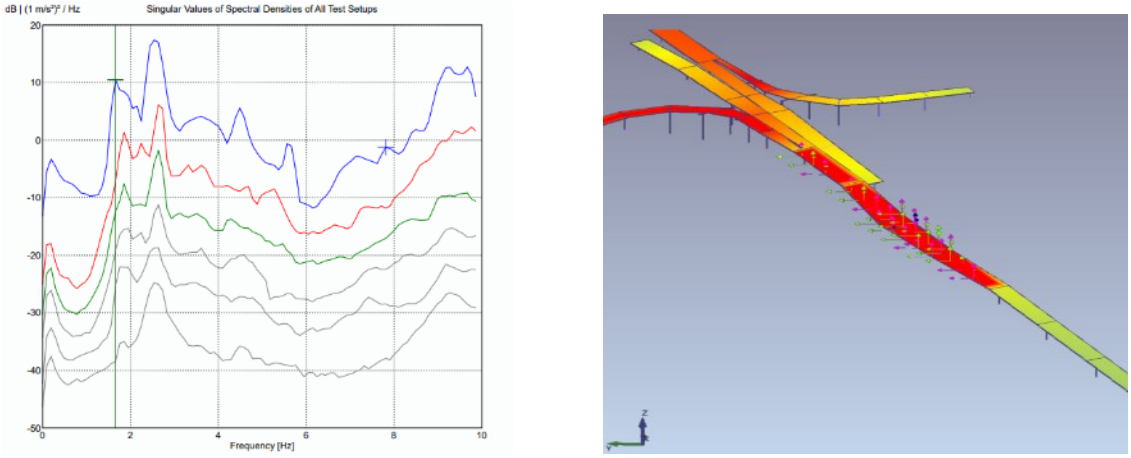
El primer modo de vibrar se presenta en la dirección transversal (Figura 6a). Como se observa la mayor amplitud se encuentra al inicio de la gaza cercano al tramo del viaducto norte. Posteriormente se observa el segundo modo de vibrar en la dirección longitudinal de la gaza (Figura 6b), nuevamente con la mayor amplitud en la misma zona.



(a) (b)

Figura 6. Primeros modos de vibrar en la gaza norte del distribuidor vial. (a) Primer modo en la dirección transversal de la estructura; (b) segundo modo de vibrar en la dirección longitudinal.

Posteriormente se analizaron los resultados del tramo recto del viaducto norte. La Figura 7 muestra los valores singulares de las densidades espectrales de todas las mediciones realizadas en este tramo del distribuidor (Figura 7a), y la configuración deformada correspondiente al primer modo de vibrar en la dirección transversal de movimiento (Figura 7b). Este modo se se presenta en los claros cercanos al inicio de la gaza norte.



(a) (b)

Figura 7. Resultados de las mediciones en el tramo recto del viaducto norte del distribuidor vial. (a) Valores singulares de las densidades espectrales de todas las mediciones realizadas; (b) configuración deformada correspondiente al primer modo de vibrar en la dirección transversal del viaducto.

MODELO NUMÉRICO

Se realizó un modelo numérico del distribuidor vial utilizando el programa SAP2000 (CSI, 2015) que permite cuantificar el movimiento esperado del puente ante acciones sísmicas. Las vigas de la superestructura simplemente apoyadas se componen de elementos tipo cajón de concreto reforzado, con peraltes de 1.8 m y de 0.85 m. En ambos casos la resistencia a compresión del concreto fue de de f'c=400 kg/cm^2. Las dimensiones de los cabezales son de 3.1 m de peralte, con la misma resistencia a compresión del concreto que las vigas. El distribuidor vial tiene columnas de sección transversal octagonal de 2.4 m x 2 m y columnas rectangulares de 1.5 m x 1.8 m, con una resistencia de f'c=350 kg/cm^2. Estos elementos estructurales se modelaron con elementos tipo barra con seis grados de libertad en cada nudo (tres desplazamientos y tres rotaciones). La losa de rodamiento es de concreto reforzado con espesor de 0.18 m y resistencia a compresión del concreto de f'c=250 kg/cm^2. Se modeló con elementos tipo Shell discretizados en secciones rectangulares pequeñas. Finalmente, los apoyos elastométricos de neopreno se modelaron con elementos elásticos tipo link de dos nudos, con cinco grados de libertad por nudo.

La Figura 8 muestra el modelo numérico creado con el programa SAP2000 (CIS, 2015). En la figura se observan los viaductos norte y sur (trazo recto) y las dos gazas que componen al distribuidor vial. Como se muestra la mayoría de las pilas tiene una sola columna.

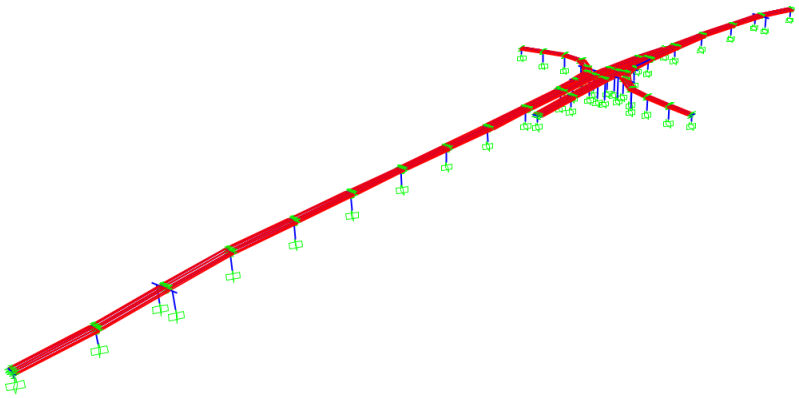


Figura 8. Modelo numérico del distribuidor vial.

La Figura 9 muestra el primer modo de vibrar del distribuidor vial que corresponde al movimiento transversal de la gaza norte, como se había también identificado con las mediciones experimentales.

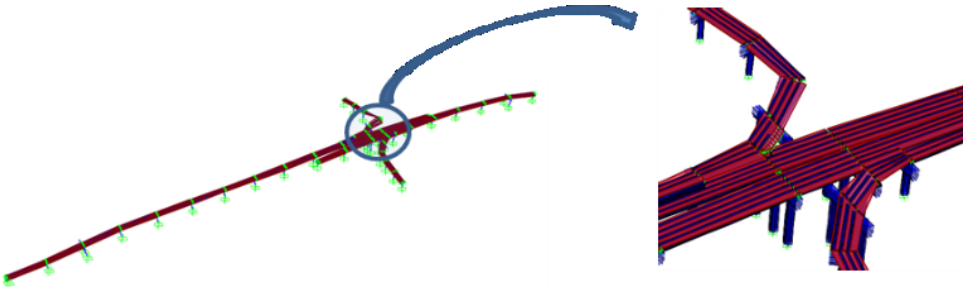


Figura 9. Primer modo de vibrar del modelo numérico del puente.

La Figura 10 muestra el modo transversal en el tramo recto del viaducto norte obtenido con el modelo numérico realizado en SAP2000 e identificado en las mediciones experimentales de vibración ambiental. Tanto el modo transversal de la gaza norte como el modo transversal del tramo recto identificados con base en la mediciones de vibración ambiental fueron obtenidos con el modelo numérico del puente.

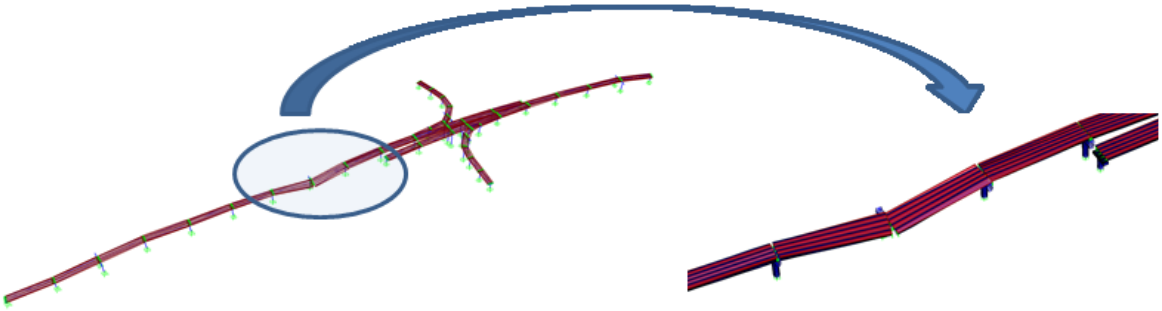
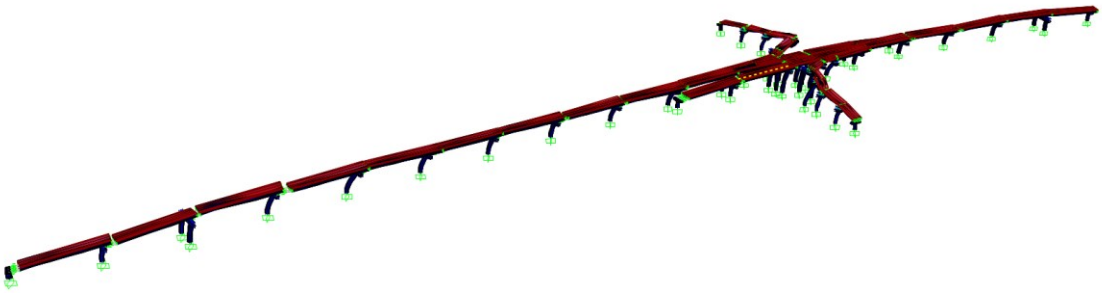


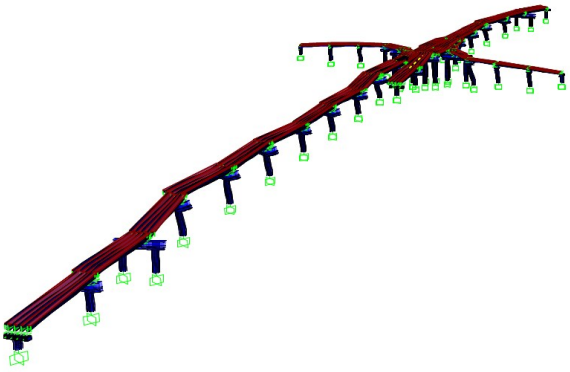
Figura 10. Primer modo de vibrar del viaducto norte en la dirección transversal del puente.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Se determinó la demanda de desplazamientos de las pilas del puente cuando es sometido al espectro de diseño de la ciudad de Morelia y a un conjunto de acelerogramas compatibles con el espectro de diseño. la Figura 11 muestra la configuración deformada del distribuidor vial al ser sometido al espectro de diseño en la dirección longitudinal de los tramos rectos (Figura 11a) y en la dirección transversal (Figura 11b).



(a)



(b)

Figura 11. Configuración deformada del viaducto al ser sometido al espectro de diseño. (a) Dirección longitudinal; (b) dirección transversal.

La Tabla 1 muestra la demanda de desplazamientos del extremo superior de las columnas del distribuidor vial cuando es sometido al espectro de diseño para la ciudad de Morelia en las direcciones longitudinal y transversal de los tramos rectos. Adicionalmente, se muestran las

distorsiones angulares de las columnas (cociente D/H) que es el parámetro que se especifica en reglamentos de diseño símico para limitar los daños esperados ante la acción de temblores.

Tabla 1. Desplazamientos y distorsiones angulares en las pilas del distribuidor vial.

Nudo	Desplazamientos sismo		H (m)	D/H	
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal
21	0.00057	0.00000	4.00	0.0001	0.0000
23	0.00056	0.00070	4.00	0.0001	0.0002
51	0.00882	0.00878	8.94	0.0010	0.0010
75	0.00955	0.00752	11.07	0.0009	0.0007
92	0.00913	0.00731	11.07	0.0008	0.0007
121	0.02669	0.02386	11.78	0.0023	0.0020
144	0.03519	0.02531	11.85	0.0030	0.0021
170	0.02459	0.02175	11.18	0.0022	0.0019
179	0.00062	0.00078	4.90	0.0001	0.0002
209	0.01926	0.01544	10.65	0.0018	0.0014
222	0.00113	0.00110	5.20	0.0002	0.0002
245	0.01530	0.00962	10.10	0.0015	0.0010
266	0.01614	0.01514	10.12	0.0016	0.0015
300	0.01759	0.01466	10.63	0.0017	0.0014
318	0.02046	0.01535	9.87	0.0021	0.0016
350	0.00919	0.00796	8.36	0.0011	0.0010
378	0.02099	0.02003	9.99	0.0021	0.0020
401	0.04009	0.02944	15.02	0.0027	0.0020
430	0.00691	0.00719	8.22	0.0008	0.0009
458	0.02215	0.01610	10.28	0.0022	0.0016
482	0.02144	0.01708	16.75	0.0013	0.0010
484	0.00751	0.00593	16.75	0.0004	0.0004
491	0.02089	0.01656	16.13	0.0013	0.0010
504	0.01445	0.01144	15.78	0.0009	0.0007
517	0.01442	0.01136	15.78	0.0009	0.0007
535	0.00091	0.00079	5.10	0.0002	0.0002
559	0.02739	0.01187	16.41	0.0017	0.0007
579	0.02448	0.01043	17.00	0.0014	0.0006
587	0.02923	0.00926	9.47	0.0031	0.0010
600	0.01146	0.00668	9.07	0.0013	0.0007
643	0.01198	0.00876	8.90	0.0013	0.0010
665	0.00365	0.00238	6.86	0.0005	0.0003
705	0.01371	0.01247	9.03	0.0015	0.0014
731	0.01953	0.01273	9.95	0.0020	0.0013
774	0.01588	0.01449	9.46	0.0017	0.0015
803	0.00823	0.00685	11.42	0.0007	0.0006
819	0.05939	0.02228	16.37	0.0036	0.0014
840	0.01734	0.01245	9.45	0.0018	0.0013
849	0.00657	0.00245	9.33	0.0007	0.0003
866	0.00636	0.00239	9.33	0.0007	0.0003
875	0.01673	0.01217	17.14	0.0010	0.0007

Como se observa en la Tabla 1, las distorsiones angulares se mantienen en valores moderados y bajos comparativamente con los valores admisibles para columnas de concreto reforzado, lo que sugiere un comportamiento adecuado ante las acciones de diseño. En trabajos futuros, se podría analizar el comportamiento dinámico no lineal del distribuidor para periodos de retorno mayores de los eventos sísmicos.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron la factibilidad del uso de mediciones experimentales de vibración ambiental de estructuras existentes para calibrar modelos numéricos de puentes. Con base en el modelo calibrado se analizó la respuesta sísmica del distribuidor vial sometido a acciones de diseño utilizando el espectro de diseño vigente para la ciudad de Morelia. La respuesta sísmica obtenida permite concluir un comportamiento esperado adecuado antes estas demandas sísmicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. CSI (2015), SAP2000, Computer and Structures Inc., Berkeley, CA.
2. Chang, P. C., Flatau, A. y Liu S. C. (2003). Review paper: Health monitoring of civil infraestructure. Structural Health Monitoring. Vol. 2: 257:267.
3. Döhler, M., Hille, F., Mevel, L. y Rücker, W. (2014). Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 Bridge. Engineering Structures. Vol. 69: 183-193.
4. Ivanovic, S. S., Trifunac, M. D. y Todorovska, M. I. (2000). Ambient vibration tests of structures – a review. ISET Journal of Earthquake Technology. Vol. 407 (4): 165-197.
5. SVS (2015), Structural Vibration Solutions, Artemis Version 3.6, NOVI Science Park, Denmark.

APLICACIÓN DE LA REALIDAD AUMENTADA COMO UN RECURSO DIDÁCTICO PARA VISUALIZAR Y EXPLORAR MODELOS 3D

Miriam Merino Rivera y Angélica Lázaro García

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato
lis22110192@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La Realidad Aumentada (R.A.) es una herramienta que tiene como principal objetivo proporcionar información visual por medio de la superposición de objetos y elementos digitales sobre el mundo real. Por esta razón, la Realidad Aumentada permite proporcionar información adicional de un objeto, así como explorar y descubrir contenido de piezas, objetos, productos o cualquier tipo de elemento del que se tenga un modelo 3D, así como ser muy útil para conocer objetos, piezas, equipos o maquinarias que sean difíciles de adquirir o conseguir. Por su propia naturaleza, la Realidad Aumentada es muy atractiva y llama mucho la atención de cualquier persona, por lo que también se puede considerar una herramienta digital que ayude y contribuya a la formación académica de cualquier nivel educativo. Este proyecto se llevó a cabo en la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices del TECNM / ITS de Irapuato en donde se ha identificado un área de oportunidad en los instrumentos y recursos educativos digitales, mismos que permitan al estudiante de la carrera comprender el diseño y funcionamiento de componentes internos de un vehículo o bien de sistemas complejos que pueden ser difíciles de observar sin desmontar otras piezas o equipos, además de presentar de forma innovadora e interactiva los diseños y modelos que estudiantes de semestres superiores han generado a lo largo de su estancia académica. Se llevó a cabo una metodología práctica que permitió obtener resultados cuantitativos y cualitativos de este estudio. En la parte cuantitativa se recopilaron datos numéricos y medibles sobre el uso y efectividad de las herramientas de R.A., así como resultados que permiten determinar niveles de conocimientos previos y posteriores de los estudiantes en temáticas afines al proyecto, también se presentan los resultados observados en una encuesta y cuestionario sobre la percepción y satisfacción de los estudiantes. En la parte cualitativa, se presentan los puntos más importantes que los estudiantes manifestaron sobre el uso de la R.A. para conocer experiencias, percepciones y opiniones de los participantes de manera más descriptiva. El desarrollo del proyecto obtuvo resultados positivos desde una perspectiva académica, y ha sido útil para abordar desafíos educativos en la formación del ingeniero al proporcionar experiencias interactivas y prácticas que complementan la enseñanza tradicional mediante el uso de “nuevas tecnologías”, explorar componentes de manera virtual e incluso guardar diseños de programas especializados en diseño para su visualización. Por contraparte, se identificaron complicaciones técnicas y operativas, por lo que se establece una serie de recomendaciones y trabajo futuro. El estudio ha permitido desarrollar habilidades y competencias en los estudiantes para trabajar con plataformas y tecnologías digitales que pudieran aplicar en el sector industrial como una manera atractiva de dar a conocer los productos que desarrollan y cambiar la manera en que los consumidores, clientes o usuarios interactúen con dichos productos.

INTRODUCCIÓN

El concepto de Realidad Aumentada (R.A.) se remonta a la década de 1960, cuando Morton Heilig desarrolló el "Sensorama", un dispositivo que combinaba imágenes en 3D, sonido, vibración y aromas para ofrecer una experiencia sensorial inmersiva (Mendez A, 2023).

Sin embargo, el término "Realidad Aumentada" fue acuñado por primera vez por Tom Caudell, un investigador de Boeing, en 1990, para describir un sistema que ayudaba a los trabajadores en la fabricación de aviones al superponer información digital sobre el mundo real.

Los conceptos básicos de la Realidad Aumentada se han explorado durante décadas e incluso no es una tecnología nieva, soló que su popularización y desarrollo tecnológico significativo ocurrieron

a partir de la década de los 2000, con la evolución de dispositivos móviles, la mejora de las capacidades de procesamiento y la miniaturización de sensores (Cabero y Fernández, 2018). En años recientes, la Realidad Aumentada ha experimentado un crecimiento exponencial y se ha convertido en una tecnología ampliamente utilizada en diversas industrias, incluyendo áreas como el entretenimiento, la educación, la medicina y en este caso en la industria automotriz.

Podríamos explicar la R.A. como una tecnología innovadora que combina el mundo físico con el digital, proporcionando una experiencia inmersiva al superponer elementos virtuales sobre el entorno real. Su objetivo principal es enriquecer la percepción sensorial de cualquier usuario al ofrecer información visual adicional. A diferencia de la Realidad Virtual, en donde se crea un entorno completamente digital, la Realidad Aumentada mejora la realidad existente al superponer elementos virtuales sobre el entorno real, incluso se han popularizado videojuegos y aplicaciones que hacen uso de esta tecnología.

Desde su concepción, ha sido adoptada en diversas industrias, desde el entretenimiento hasta la educación y la medicina, debido a su gran capacidad para mejorar la interacción humano-computadora y proporcionar experiencias enriquecidas. En el ámbito educativo, consideramos que puede transformar la forma en que los estudiantes interactúan con el contenido y prácticas realizadas. Además, su integración en entornos de trabajo colaborativo y proyectos posteriores a la aplicación del CAD (Diseño Asistido por Computadora) representa avances significativos en la forma en que los equipos de trabajo interactúan con los modelos digitales y se comunican entre sí.

Es decir, consideramos que la Realidad Aumentada complementa el CAD al permitir la visualización tridimensional de los diseños de manera más inmersiva y realista. Mientras que el CAD ofrece representaciones digitales muy precisas, la R.A. agrega una capa adicional de información al superponer los modelos digitales sobre el entorno físico. Esto facilita la comprensión espacial de los diseños y permite a los equipos evaluar su viabilidad y funcionalidad en tiempo real. Mediante el uso de dispositivos móviles, los estudiantes pueden interactuar con los modelos desde diferentes ubicaciones geográficas, lo que facilita la colaboración remota.

La carrera de Sistemas Automotrices del TECNM/ ITS de Irapuato, es una carrera que genera una gran cantidad de diseños realizados en programas especializados, los cuales deben modelar y visualizar en sus equipos de cómputo. Paralelamente, la institución debe realizar actividades que permitan dar promoción y difundir al programa académico en las instituciones de Nivel Medio Superior con el fin de captar su atención e interés, y en este caso la R.A. puede ser un medio apropiado para divulgar este tipo de diseños de manera fácil y práctica, ya que al hacerlo en programas como “Solid Works” o “Catia” se requiere llevar un equipo de cómputo de altas prestaciones, un proyector, extensión, entre otros, mientras que con la R.A. solo basta tener un código QR, y un teléfono para abrir estos diseños de una manera muy atractiva. Además, entre estudiantes de Nivel Superior la R.A. les permite identificar fallas, anomalías o imprecisiones en los diseños o bocetos generados.

Finalmente, en el ámbito educativo, la R.A., puede ofrecer una experiencia de aprendizaje más inmersiva y práctica, ya que os estudiantes pueden interactuar con modelos tridimensionales de manera tangible, lo que facilita la comprensión de conceptos abstractos y promueve el aprendizaje activo. Además, al utilizarla en proyectos de ingeniería y diseño, los estudiantes adquieren habilidades técnicas y digitales relevantes para el mercado laboral actual, lo que permite aumentar su empleabilidad y competitividad en la industria.

TEORÍA

La Realidad Aumentada se basa en algoritmos y tecnologías que permiten superponer gráficos generados por computadora sobre la visión del mundo real. Esto se logra a través de dispositivos como smartphones, tablets o gafas especiales que utilizan cámaras y sensores para reconocer y rastrear el entorno físico (Morales E., 2009). La información digital se integra de manera precisa con

la realidad, lo que crea la ilusión de que los objetos virtuales realmente están presentes en el mundo físico.
Existen distintos enfoques o tipos de R.A., cada uno de estos enfoques ofrecen una perspectiva distinta sobre cómo los elementos digitales interactúan en el entorno físico y cómo los usuarios experimentan la realidad enriquecida.

RA del tipo marcador: En este tipo de R.A., obsérvese la Figura 1, los elementos digitales son superpuestos sobre un marcador físico predefinido, como un código QR o una imagen específica. La aplicación de R.A., a través de la cámara de un dispositivo, identifica este marcador y coloca los objetos virtuales en relación con él. Este método es ampliamente utilizado en aplicaciones de marketing, juegos y educación, donde se requiere una interacción precisa con un objeto físico concreto, en ingeniería se pueden colocar símbolos o códigos visuales para visualizar prácticas por ejemplo con protoboards y material de electrónica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Realidad aumentada del tipo Marcador.

R.A. Facial: la cual ofrece una experiencia completamente diferente al centrarse en la superposición de elementos digitales sobre el rostro de una persona, obsérvese la Figura 2. Utilizando algoritmos avanzados de reconocimiento facial, esta forma de R.A. detecta y rastrea las características faciales, como los ojos, la boca y la nariz, para luego superponer efectos o gráficos en tiempo real.

Este enfoque es muy popular en redes sociales y entretenimiento, permitiendo a los usuarios agregar filtros y efectos especiales a “selfies” y videos.

Fuente: Elaboración propia

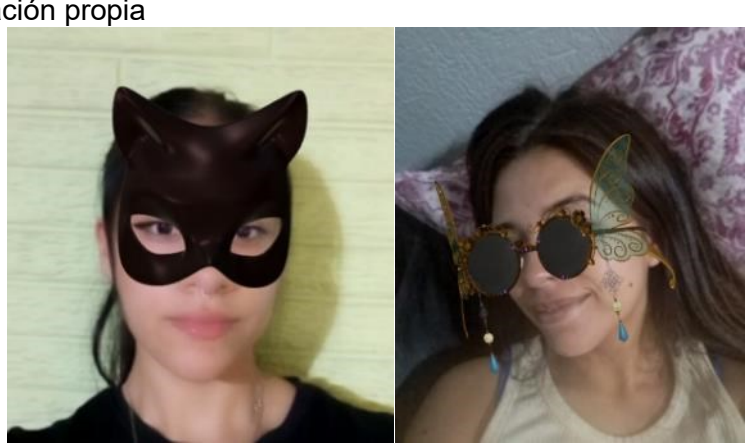


Figura 2. Realidad aumentada del tipo Facial.

RA de Superficie: este tipo de R.A., obsérvese la Figura 3, se enfoca en la superposición de objetos digitales en una superficie plana, como una mesa, un suelo o una pared. A través de algoritmos de detección de planos, la aplicación de R.A. identifica y rastrea la superficie para colocar los objetos virtuales de manera realista.

Este tipo de R.A. se utiliza comúnmente en aplicaciones de diseño de interiores, simulaciones de muebles y herramientas de visualización arquitectónica, brindando a los usuarios la capacidad de experimentar y visualizar objetos virtuales en su entorno físico.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Realidad aumentada del tipo superficie.

RA "Alrededor de Ti": este tipo de R.A., es para el equipo de investigación la experiencia más atractiva y envolvente al superponer elementos digitales en el entorno físico circundante del usuario, sin necesidad de marcadores específicos, obsérvese la Figura 4. Utilizando la geolocalización y la información del entorno, esta forma de R.A. coloca objetos virtuales en ubicaciones del mundo real, brindando a los usuarios una experiencia contextualizada y basada en la ubicación (Barroso K., 2022). Desde aplicaciones de navegación y turismo hasta juegos de realidad aumentada, este enfoque ofrece infinitas posibilidades de exploración y descubrimiento.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Realidad aumentada “Alrededor de Ti”.

PARTE EXPERIMENTAL

La implementación de la Realidad Aumentada fue realizada mediante un enfoque experimental, con el propósito de evaluar su efectividad en el desarrollo de habilidades y competencias relacionadas con la comunicación e información visual.

Se definieron claramente los objetivos del experimento, los cuales se centraron en el desarrollo de habilidades y competencias específicas mediante la utilización de la Realidad Aumentada "Alrededor de Ti", tales como la comprensión de conceptos de dimensiones y perspectivas de un modelo y como mejora la comunicación visual.

La mayor parte del experimento se llevó a cabo en la plataforma y en el funcionamiento de la misma, obsérvese la Figura 5. Se seleccionó un grupo de 5 estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices, con diferentes niveles de conocimiento previo en tecnología y un interés compartido en el tema. Se proporcionaron dispositivos móviles con la aplicación de Realidad Aumentada instalada a cada estudiante, asegurándose de que estuvieran completamente cargados y listos para su uso.

Fuente: Plataforma Blippar

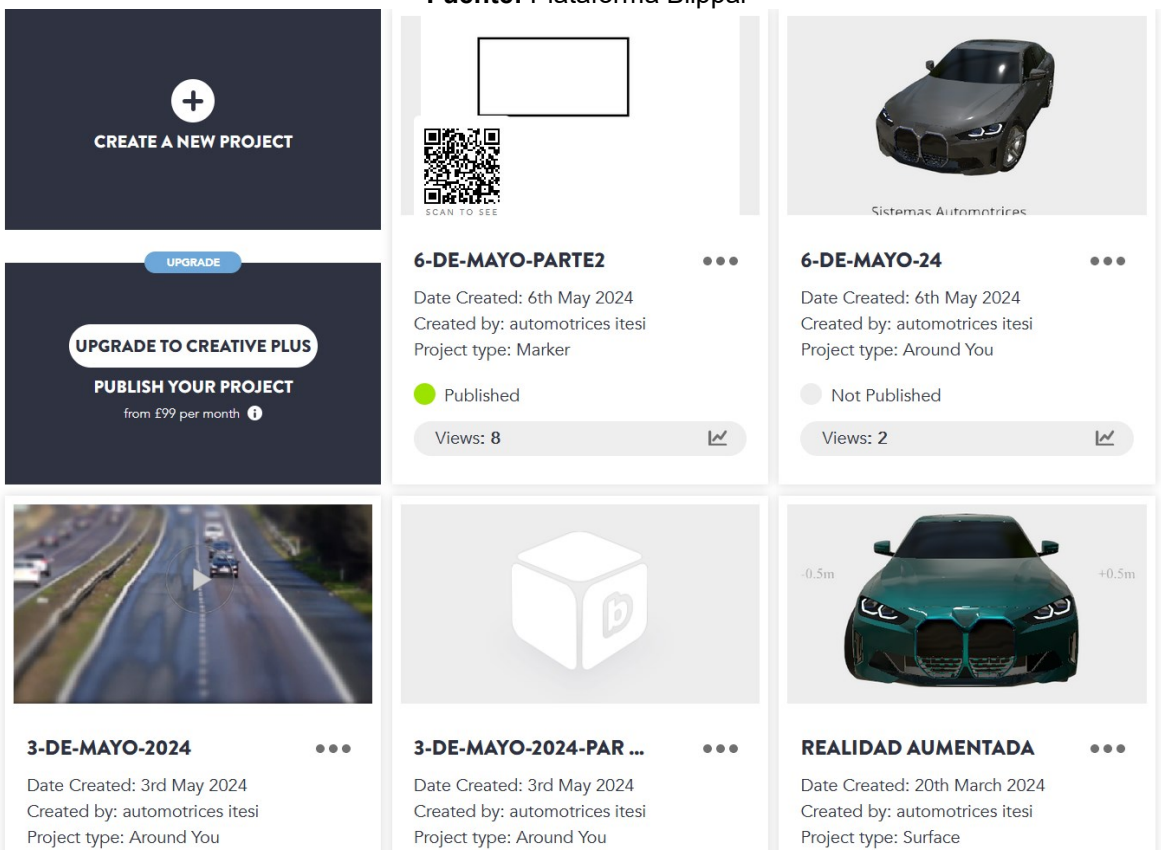


Figura 5. Pruebas y experimentaciones en la plataforma.

Se introdujo la Realidad Aumentada "Alrededor de Ti" a los participantes mediante una sesión de capacitación inicial, explicando su propósito, funcionamiento y cómo acceder al contenido disponible. Se asignaron tareas específicas que requerían la exploración del entorno físico y la interacción con los modelos 3D y videos utilizando la aplicación de Realidad Aumentada. Se registró el tiempo que cada estudiante dedicó a interactuar con los modelos 3D y videos de Realidad Aumentada, así como el número de actividades completadas con éxito.

Además, se realizaron entrevistas individuales y un grupo focal al finalizar el experimento para recopilar opiniones y percepciones de los estudiantes sobre su experiencia con la Realidad Aumentada. Se registraron observaciones cualitativas sobre el nivel de compromiso, la facilidad de uso y la efectividad de la Realidad Aumentada como herramienta educativa durante el proceso experimental.

Se comparó el desempeño y las percepciones de los estudiantes antes y después de la exposición a la Realidad Aumentada para determinar su impacto en el aprendizaje y la enseñanza. Los resultados del experimento mostraron un aumento significativo en el compromiso y la comprensión de conceptos industriales entre los estudiantes que participaron en la Realidad Aumentada "Alrededor de Ti". Los estudiantes expresaron un mayor interés en el aprendizaje y una mayor confianza en sus habilidades de comunicación visual después de interactuar con el contenido de Realidad Aumentada. Se identificaron áreas de mejora, como la necesidad de una mayor integración de la Realidad Aumentada en el plan de estudios y la disponibilidad de más recursos digitales.

Esta implementación experimental de la Realidad Aumentada "Alrededor de Ti" demostró ser una herramienta efectiva para mejorar el aprendizaje y el desarrollo de habilidades tecnológicas, lo que proporcionó una experiencia educativa más inmersiva y personalizada para los estudiantes.

RESULTADOS

La Realidad Aumentada logro promover el desarrollo de habilidades de comunicación visual al permitir a los estudiantes crear, manipular y presentar contenido digital de manera efectiva. No solamente con diseños 3D, también pudieron generar proyectos con recursos digitales como videos, animaciones o fotografías. Lo que puede ampliar las áreas y ciencias que sean apropiadas para presentarse de esta manera.

Se percibió interés por parte de los estudiantes que hacían uso de los proyectos generados, la tecnología incita a ver y observar el contenido que se esta presentando, lo que determina que es también una opción viable para considerarse como un recurso didáctico, sobretodo para aquellos casos en los que es difícil observar físicamente algun equipo o maquinaria.

En cuanto a los aspectos técnicos, se determino que es preferente contar con un equipo de altas prestaciones soló para generar los proyectos de R.A., ya que se utiliza memoria RAM y tarjeta gráfica para visualizar, tratar y gestionar la posición de los recursos en el área de trabajo, es decir al posicionarlos por ejemplo en el tipo de realidad “alrededor de ti”. Posteriormente para su visualización en los dispositivos móviles, solo se requiere internet y un código QR para tener acceso al proyecto, es decir para que los usuarios o estudiantes puedan observar el resultado del proyecto.

CONCLUSIONES

La Realidad Aumentada se basa en algoritmos y tecnologías que permiten superponer gráficos generados por computadora sobre la visión del mundo real. Esto se logra a través de dispositivos como smartphones, tablets o gafas especiales que utilizan cámaras y sensores para reconocer y rastrear el entorno físico. La información digital se integra de manera precisa con la realidad, lo que crea la ilusión de que los objetos virtuales realmente están presentes en el mundo físico.

Desde el punto de vista educativo, la Realidad Aumentada ofrece numerosas ventajas. Permite la visualización de modelos tridimensionales de manera interactiva, lo que facilita la comprensión de conceptos abstractos y fomenta el aprendizaje activo. Además, al proporcionar información contextualizada en tiempo real, los estudiantes pueden explorar y experimentar de manera autónoma, lo que promueve la motivación y el compromiso con el contenido.

Finalmente, concluimos que la Realidad Aumentada logró:

- Mejorar la comprensión de conceptos de diseño asistido por computadora (CAD) y de sistemas automotrices.
- Desarrollar habilidades de comunicación visual y presentación de información técnica de manera efectiva.
- Fomentar la capacidad para trabajar de manera colaborativa en proyectos de ingeniería mediante la exploración de modelos 3D y equipos industriales en entornos de Realidad Aumentada.

Agradecemos la colaboración y asesoría del maestro César Manuel Hernández Mendoza, quien ha dado seguimiento al desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguaded, I.; Cabero, J. (2014). Avances y retos en la promoción de la innovación didáctica con las tecnologías emergentes e interactivas. Educar, Especial 30 aniversario, 67-83. doi:10.5565/rev/educar.691.
2. Álvarez, J. F.; López, C.; Hafner, A.; Gonzalo, P.; González, E.; Portero, M.; …; Llopis, B. (2018). Informe Odite sobre tendencias educativas 2018. (http://odite.ciberespiral.org/comunidad/ODITE/recurso/informe-odite-sobre-tendencias-educativas-2018/23109971-25e2-4833-8507-c4da7acfe822#Informe%20completo).
3. Barroso, K. (2022). La realidad aumentada en el proceso de Enseñanza – Aprendizaje, Universidad Nacional de Ingeniería. Technology Rain Journal. Vol.1(22).
4. Cabero, J.; Fernández, B. (2018). Las tecnologías digitales emergentes entran en la Universidad: la Realidad Aumentada y la Realidad Virtual. RIED: Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 21(2), 119-138.
5. Leiva, J. J.; Moreno, N. M. (2015). Tecnologías de geolocalización y realidad aumentada en contextos educativos: experiencias y herramientas didácticas. Revista Científica de Opinión y Divulgación, 31, 1-18.
6. Morales, E. (2009). El uso de los videojuegos como recurso de aprendizaje en educación primaria y Teoría de la comunicación. Revista Académica de la Federación Lationamericana de Facultades de Comunicación Social, 78, 1-12.

UTILIZACIÓN DE UN MODULO DE RADIO FRECUENCIA LORA EBYTE PARA EL CONTROL DE ENCENDIDO, APAGADO Y MONITOREO UN MOTOR ELECTRICO

Luis Carmen Silvano Pérez, Miguel Roque Vasquez Hernández, Christopher Jair Pacheco Figueroa
Alberto Gutiérrez Martínez.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
1339467d@umich.mx.

RESUMEN

El avance tecnológico en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) 1 ha revolucionado la manera en que interactuamos con nuestro entorno, permitiendo la monitorización y control remoto de diversos sistemas. En este contexto, el presente trabajo de investigación de basa en la utilización de dos módulos de radio frecuencia LoRa EByTe, donde uno actúa como transmisor y otro como receptor en una comunicación omnidireccional, por medio de ondas electromagnéticas y con el uso de un microcontrolador conectado a cada módulo LoRa, donde el módulo receptor es el encargado de activar físicamente los contactores que energizan a un motor eléctrico y el transmisor es el módulo encargado de enviar la señal de control, demostrando su capacidad para establecer comunicaciones inalámbricas estables en distancias aproximadamente superiores a 4 kilómetros.2 Dentro de los resultados obtenidos, se logró una manera de comunicación semidúplex, es decir, que ambos módulos LoRa cumplen la función de transmisor como de receptor, logrando que el módulo de activación del motor eléctrico, también puede enviar una de señal de control retroalimentado, en caso de falla mecánica, envíe un código y que recibe el transmisor o el módulo de control, que al recibir el error envié ahora la señal de apagado del motor. Logrando así el encendido, apagado y monitoreo de un motor eléctrico de modo inalámbrico. La utilización de este modo de trabajo con los módulos LoRa abre nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones innovadoras que impulsen la conectividad y la eficiencia en diversos sectores como en la Industria3.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de las comunicaciones inalámbricas se enfoca en la interconexión de objetos físicos, tales como bombillas de luz, electrodomésticos y cualquier otro dispositivo que permita la interacción con varios usuarios e incluso su activación mediante actuadores. Además de facilitar el control remoto de estos dispositivos, estas tecnologías permiten medir y sensar diversas variables, como alertas, datos de acceso, valores de temperatura o velocidad del viento, entre otros. Esta interconexión posibilita la comunicación entre los dispositivos y su integración en una red más amplia, como internet, para el control y el flujo de información, tal como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1.- Una representación del IoT y se puede implementas en micro-redes inteligentes.

Con la IoT, es posible crear pequeñas redes inalámbricas de comunicación o control. Estas redes comienzan con un módulo de transmisión y un receptor de datos, ya sea para un actuador o un interruptor, que activa o detecta algún objeto físico.

TEORÍA

En el presente trabajo de investigación se presenta una alternativa de comunicación inalámbrica utilizando la tecnología LoRa (Long Range), que es un tipo de comunicación por radiofrecuencia de larga distancia. Esta tecnología se basa en una técnica de modulación de espectro ensanchado continuo (chirp Spread Spectrum o CSS) utilizada anteriormente en aplicaciones militares, permitiendo la transmisión segura de información digital.

Aunque LoRa no es eficiente para la transmisión de datos de gran tamaño, como archivos de audio o video, es extremadamente útil para enviar información de sensores o señales a actuadores, como la activación de un motor eléctrico o la monitorización de alarmas de sensores. El protocolo LoRa permite establecer una red de comunicación de amplio alcance y baja potencia, diseñada para conectar de forma inalámbrica dispositivos que funcionan con baterías.

Esta tecnología cumple con los requisitos clave del IoT, como comunicaciones seguras, servicios de movilidad y localización, garantizando estabilidad, buena velocidad y capacidad de resistencia a interferencias. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de una comunicación tradicional omnidireccional, donde un módulo E220 de eByTe actúa como transmisor y otro módulo como receptor.

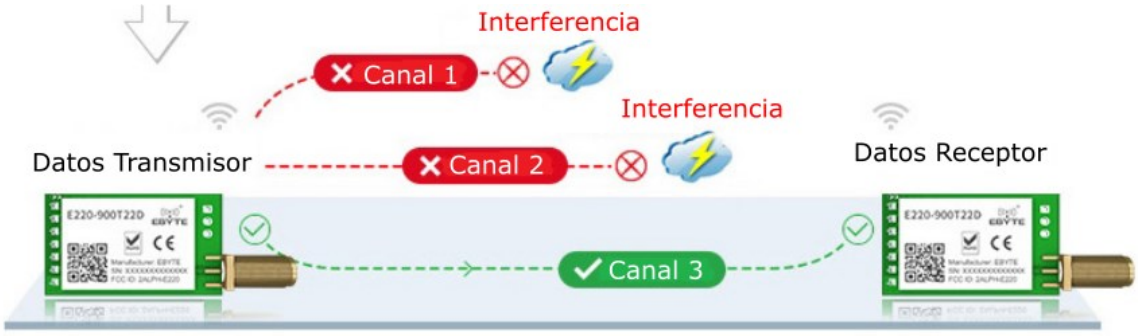


Figura 2.- Comunicación tradicional con tarjetas LoRa eByTe E220, aun con posibles interferencias.

Los datos genéricos de la tarjeta LoRa EBYTE E220-900T22D se presentan en la Tabla 1. A pesar de que la tarjeta LoRa eByTe E220 opera en un rango de frecuencia de 850.125 a 930.125 MHz, no interfiere con las redes WiFi ni con la red 5G de telefonía móvil. Esto permite la comunicación inalámbrica de datos digitales entre sensores y actuadores a distancias de aproximadamente 4 kilómetros o más.

Tabla1.- Datos característicos de la Tarjeta LoRa EBYTE E220-900T22D.

Parámetros	Mínimos	Típicos	Máximos	Unidad	Observación
Voltaje Operativo	3.0	50.	5.5	V	≥5.0 V Asegurando la potencia de alimentación
Nivel de Comunicación	-	3.3	-	V	5V TTL
Corriente TX	-	110		mA	Consumo de Potencia instantánea en 22dBm
Corriente RX	-	16.8	-	mA	Voltaje de 5V
Corriente Sleep	-	5	-	uA	Con software de apagado
Temperatura de Funcionamiento	-40	-	+85	°C	Grado Industrial

Frecuencia de Funcionamiento	850.125	-	930.125	Mhz	Banda de Soporte ISM
Potencia de TX	21.5	22	22.5	dBm	-
Sensibilidad de recepción	-146	-147	-148	dBm	Velocidad de datos aéreos 2,4 kps

La tarjeta LoRa EBYTE E220 utiliza comunicación serial mediante el protocolo UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Además, cuenta con pines de alimentación, siendo recomendable alimentar el pin VCC con 3.3V. También dispone de pines para los modos de comunicación, M0 y M1, como se ilustra en la Figura 3.

Figura 3.- Pines de alimentación, comunicación y modo de operación de la tarjeta LoRa EBYTE E220-900T22D.

En la configuración de la tarjeta eByTe E220 se pueden hacer múltiples configuraciones y combinaciones, como la dirección del módulo, el canal de frecuencia, la ID de red y la clave que se muestran en modo decimal; el rango de modificación de cada parámetro es lo siguiente:

- Dirección de red: 0 – 65535
- Canal de frecuencia: 0 – 83
- Clave: 0 – 65535

Para lograr una comunicación utilizando las tarjetas LoRa EBYTE E220, es necesario convertir las señales analógicas de los sensores a señales digitales o activar actuadores mediante una señal digital. En este trabajo de investigación, se emplea un microcontrolador ATMEGA328P en una tarjeta de desarrollo Arduino Nano, como se muestra en la Figura 4.

- 20 puertos de entraba de salida digitales
- 8 convertidores analógicos a digitades (que en inglés: Analog-to-Digital, ADC)
- 6 salidas con modulación de Ancho de pulso (que inglés: PWM)
- Puerto de comunicación Serial USART
- Puerto de Comunicación SPI
- Puerto de Comunicación I2C
- Velocidad de reloj: 16 MHz.
- Voltaje de trabajo: 5V o 3.3V.
- Voltaje de entrada de alimentación: 7,5 a 12 voltios.
- Memoria: 32 KB Flash (2KB para bootloader), 2KB SRAM y 1KB EEPROM
- Comunicación y alimentación con un Puerto USB que puede ser micho o nano.
- Temperatura de operación de -40 a +85°C
- Corriente máxima de entra y de salida de 20mA
- ADC de 10 bits
- Tres Contadores de reloj (en inglés: TIMER), dos de 8 Bit y uno de 16 Bit.

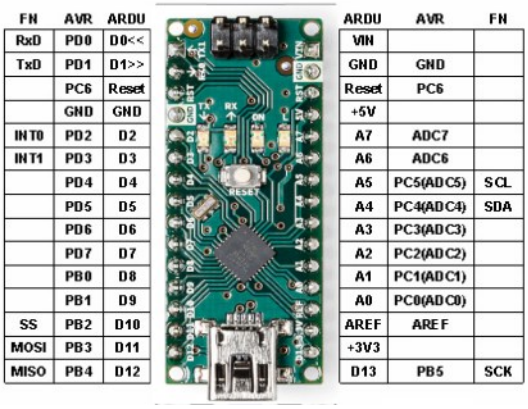


Figura 4.- Pines de la Tarjeta Arduino nano con el Microcontrolador ATMEG328P.

PARTE EXPERIMENTAL

Es importante mencionar que la parte experimental y los resultados se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica (LIE) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en las instalaciones de la Ciudad Universitaria (CU), ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán de Ocampo.

La presente investigación, utiliza las tarjetas LoRa EBYTE E220 y un microcontrolador por cada tarjeta, con fuentes eléctricas independientes (eliminadores de 12V, reguladores de 5V y 3.3V) para alimentar cada módulo transmisor y receptor. Esto permitió desplazarse únicamente a lugares con suministro eléctrico de corriente alterna (CA) dentro de las instalaciones del LIE en la CU de la UMSNH.

Se utilizó la plataforma Arduino, aprovechando librerías disponibles en GitHub desarrolladas para la tarjeta LoRa EBYTE E220 y diferentes microcontroladores y ARMs, como el ATMEGA328P que incluye la tarjeta Arduino Nano R3.0. Es importante llamar correctamente la librería y realizar la configuración básica de los pines de alimentación, modos de comunicación y operación, ajustando los pines M0 y M1 según sea necesario, como se muestra en la Figura 6. En la Tabla 2 se presentan los modos básicos de los pines de operación del 0 al 3, donde 0 indica poner el pin a GND y 1 indica poner el pin a VCC.

```
3 #include "Arduino.h"
4 #include "LoRa_E220.h"
5
6 //LoRa_E220 e220ttl(RX, TX, AUX, M0, M1);  // Arduino RX <-- e220 TX, Arduino TX --> e220 RX
7 LoRa_E220 e220ttl(4, 5, 3, 7, 6); // Configura los pines de acuerdo a tu hardware
```

Figura 5.- Pines de la Tarjeta Arduino nano con el Microcontrolador ATMEG328P.

Tabla 2.- Modos de configuración de pines M0 y M1 de la Tarjeta LoRa EBYTE E220-900T22D.

Modo 0 - 3	M1	M0	Descripción	Observación
Modo - 0 de transmisión	0	0	UART y el canal inalámbrico están abiertos, la transmisión transparente está activada	
Modo - 1 de trabajo	0	1	Operado como Transmisor	

Modo - 2 de trabajo	1	0	Operado como Receptor	Admite Activación por aire
Modo – 3 de descanso	1	1	Entra en modo de suspensión (se activa automáticamente al configurar los parámetros)	Admite configuración

La configuración se puede realizar directamente en la plataforma Arduino o utilizando el software de Ebyte para la tarjeta LoRa E220. Como se muestra en la Figura 6, los pines M0 y M1 se pueden colocar en modo de reposo o configuración, lo que permite diversas configuraciones y modos de comunicación posibles. Además, la comunicación UART permite una decodificación exclusiva entre dos o más tarjetas LoRa E220.

En la plataforma Arduino, después de llamar la librería y definir los pines de configuración, es necesario iniciar la comunicación en la función void setup() utilizando la librería LoRa_E220.h para configurar los modos de trabajo del LoRa E220, tal como se observa en la Figura 7.

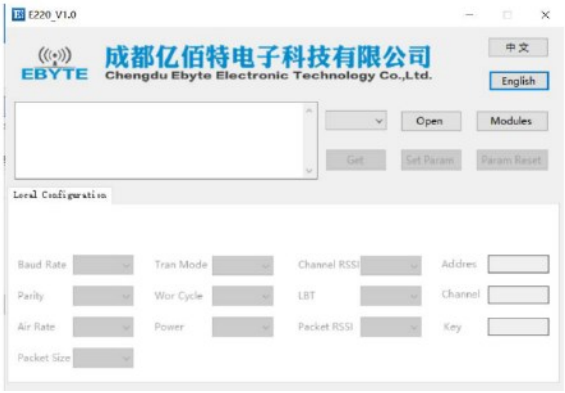


Figura 6.- Plataforma de configuración de la tarjeta LoRa EBYTE E220-900T22D y un puerto UART.

```
void setup()
{
  // Inicia todos los pines E220 y comunicacion UART
  e220ttl.begin();
  //Continua Configuracón
```

Figura 7.- Inicialización en la función void setup () en la plataforma Arduino.

A continuación, se presentan los dos modos de operación de la tarjeta E220. Se recomienda insertar estos códigos en la función void loop() en la plataforma Arduino. La primera parte del código permite que la tarjeta opere como receptor, como se muestra en la Figura 8A. La segunda parte del código configura la tarjeta para que funcione como transmisor, como se ilustra en la Figura 8B.

```
36 void loop()
37 {
38   // Verifica si hay datos disponibles para ser Receptor
39   if (e220ttl.available() > 1) {
40     // Lee el mensaje recibido
41 #ifdef ENABLE_RSSI
42     ResponseContainer rc = e220ttl.receiveMessageRSSI();
43 #else
44     ResponseContainer rc = e220ttl.receiveMessage();
45 #endif
46     // Verifica si la recepción fue exitosa
47     if (rc.status.code == 1) {
48       // Imprime el mensaje recibido
49       Serial.println("Mensaje recibido:");
50       Serial.println(rc.data);
51       //se guarda mensaje recivido
52       Menl= rc.data;
53 #ifdef ENABLE_RSSI
54       Serial.print("RSSI: ");
55       Serial.println(rc.rssi, DEC);
56 #endif
57     }
58   }
```

(A)

```
59
60   // Verifica si hay datos disponibles en el puerto serial para transmisor
61   if (Serial.available())
62   {
63     // Lee la entrada del usuario desde el puerto serial
64     String input = Serial.readStringUntil('\n'); // Lee hasta que se ingrese un salto de lín
65     // Envía el mensaje al módulo LoRa
66     e220ttl.sendMessage(input);
67     Serial.println("Mensaje enviado: " + input);
68   }
69
```

(B)

Figura 8.- (A) Código en Arduino para que opere como Receptor y (B) Código para que opere como transmisor.

RESULTADOS

Para lograr una comunicación semidúplex o bidireccional, es importante comprender que la ejecución de los códigos de programación en los microcontroladores se realiza de forma serial, es decir, línea por línea. Por lo tanto, solo puede operar en un momento dado en uno de los dos modos: receptor o transmisor. La información debe almacenarse en variables de tipo cadena (en inglés, String), preferiblemente globales, para que posteriormente puedan ser procesadas. Esto permitirá activar o desactivar alguna máquina eléctrica, o bien, sensar alguna variable o señal de alarma. Tal como se muestra en la Figura 9, se puede lograr una comunicación semidúplex con las tarjetas LoRa E220.

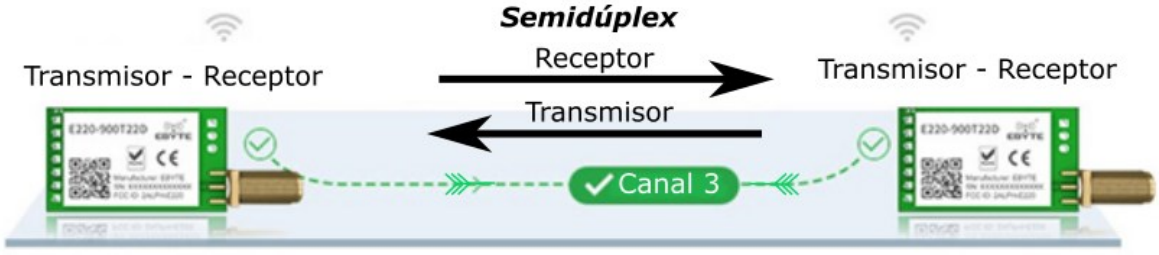


Figura 9.- Comunicación Semidúplex con tarjetas LoRa eByTe E220.

En este apartado se presenta el circuito de control receptor para el motor utilizando la tarjeta LoRa E220, alimentada con una fuente de 3.3V. El microcontrolador, en cambio, se conecta a una fuente de 5V, por lo que se utiliza un módulo convertidor lógico de 5V a 3.3V. Además, se emplea un módulo de relé que se activa en bajo y opera a 5V y GND, capaz de activar directamente un motor monofásico o controlar otro relé con contactores trifásicos, como se muestra en el esquema de la Figura 10. Adicionalmente, se instalaron dos botones pulsadores que funcionan como señales de alarma en caso de fallo, permitiendo transmitir una alarma y desactivar el motor localmente.

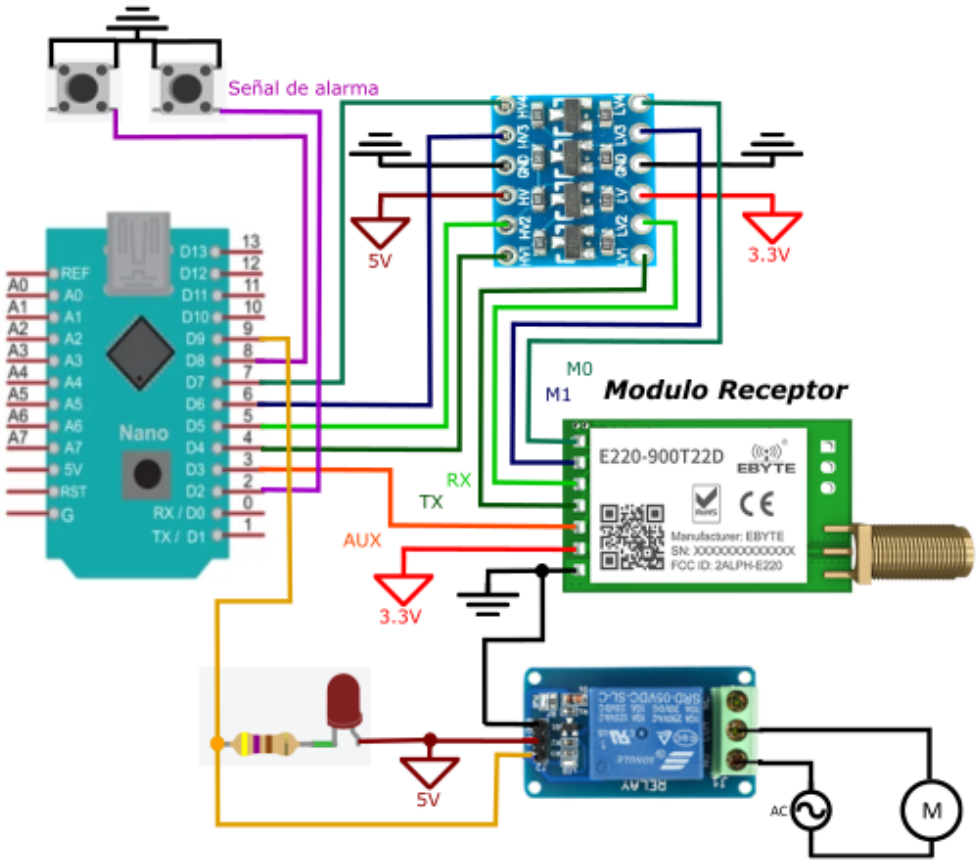


Figura 10.- Diagrama del circuito receptor para activar el motor eléctrico y también puede ser transmisor de una señal de alarma al otro módulo transmisor de forma inalámbrica.

En la Figura 11 se muestra el circuito receptor montado en una tarjeta de pruebas, también conocida como protoboard o breadboard. Este circuito está conectado a un relé de dos salidas que controla una máquina eléctrica, como se observa en la Figura 12. Este relé permite el control de encendido y apagado (ON-OFF) de la máquina.

Se ha diseñado un circuito transmisor similar, con dos botones de entrada al microcontrolador. Uno de los botones envía la orden de encendido (activación), mientras que el otro envía la orden de apagado (desactivación). Ambos botones y los pines del microcontrolador cuentan con resistencias internas Pull-UP, lo que permite recibir normalmente el voltaje de VCC. Al presionar un botón, se recibe un GND y se envía una variable del tipo String al módulo LoRa E220 receptor, que activa el relé para energizar el motor eléctrico.

Además, el módulo transmisor puede actuar como receptor en otros momentos, por ejemplo, al recibir una alerta del motor eléctrico. Esto permitirá encender un LED indicador y, de manera inalámbrica, procesar y enviar una señal de apagado al motor por razones de seguridad. Este comportamiento se muestra en la Figura 13.

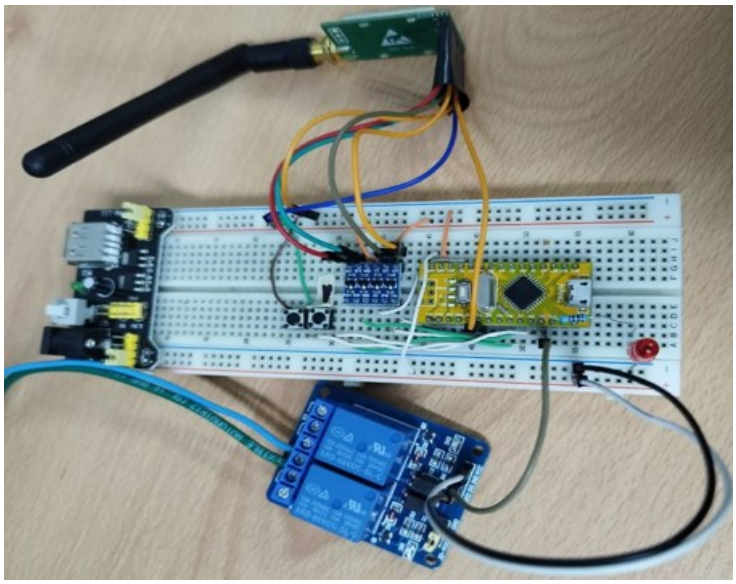


Figura 11.- Circuito de prueba receptor real activa el motor eléctrico

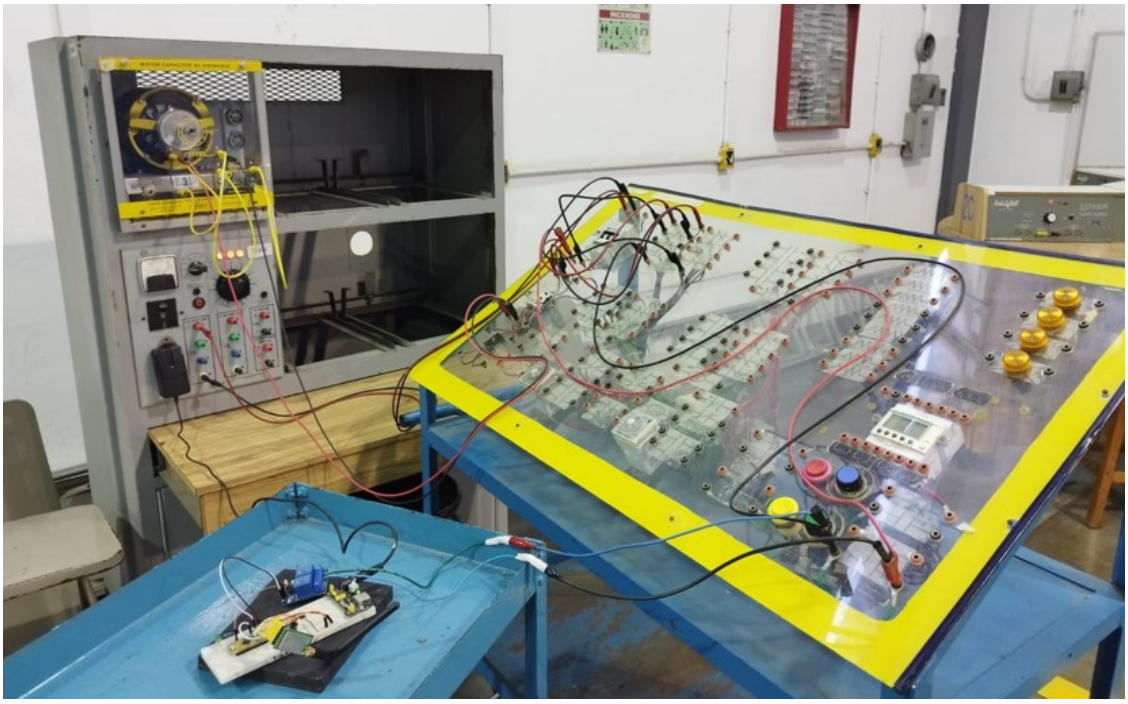


Figura 12.- Circuito de prueba receptor conectado a un relevador industrial que arranca a un motor en LIE.

En la Figura 14 se muestra el circuito del microcontrolador montado en una protoboard, que incluye dos botones (uno de encendido y otro de apagado), un LED indicador y la antena LoRa eByTe E220. Esta antena envía variables de tipo String al circuito receptor, que activa de manera inalámbrica el

motor eléctrico, como se muestra en la Figura 15 con los dos módulos conectados a sus fuentes de alimentación independientes. Se logra activar y desactivar el motor eléctrico a una distancia superior a los 400 metros, tanto dentro como fuera de la estructura del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica (LIE), ubicado en la Ciudad Universitaria (CU) de la UMSNH. Esto es posible siempre y cuando se pueda energizar el módulo transmisor en el lugar donde se encuentre.

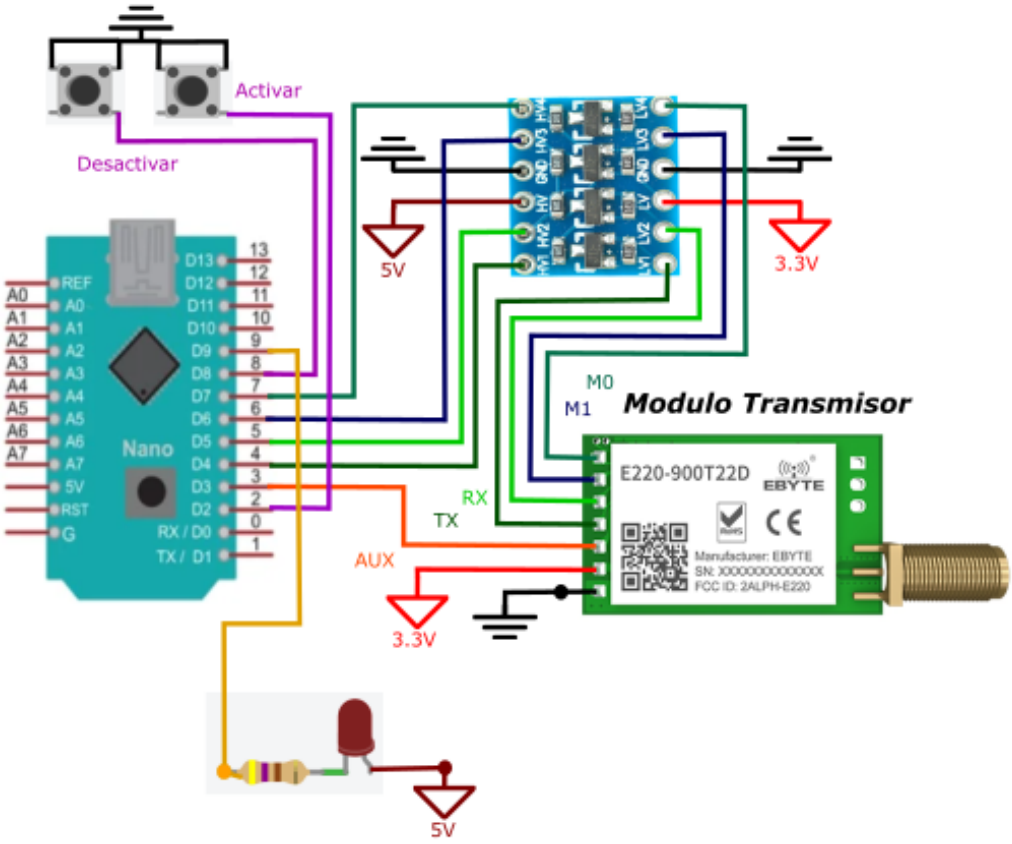


Figura 13.- Diagrama del circuito transmisor que envía las señales de encendido y apagado, pero también puede recibir la señal de alarma del otro módulo receptor de forma inalámbrica.

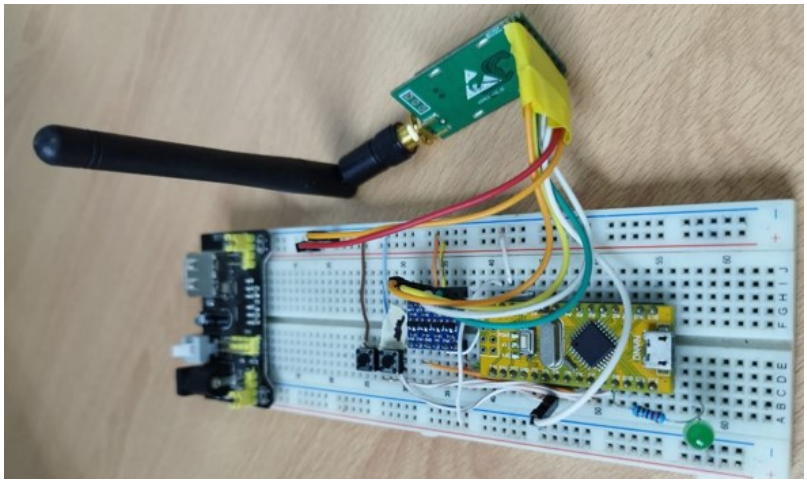


Figura 14.- Circuito de prueba receptor real activa el motor eléctrico

Figura 15.- Circuito final ya programado tanto el modulo Transmisor y Receptor conectado a un relevador industrial que arranca a un motor en LIE hasta 400m una distancia.

CONCLUSIONES

Aunque las antenas LoRa eByTe E220-900T22D tienen un alcance de comunicación de más de 4 km según el fabricante cuando operan con una batería, esta investigación muestra que es posible activar y desactivar un motor eléctrico al conectar los módulos a fuentes de alimentación independientes. Se logró una comunicación semiduplex con un alcance de más de 400 m al controlar una maquina eléctrica. En el futuro, esta tecnología podría utilizarse para conectar micro redes de control para la activación de bombas eléctricas de forma inalámbrica. Agradecido a la UMSNH por el apoyo para realizar este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre-Marroquin, J. D., & Medina-Sandoval, N. S. (2023). Sistema para irradiar cultivos con ondas de las tecnologías LoRa y wifi, que también permita su monitoreo en tiempo real.
2. Sánchez Ponz, Jorge Luis. "CDMA: comunicaciones de espectro ensanchado." Buran 16 (2000): 25-32.
3. Amir, A., Suwardoyo, U., & Irwan, I. N. P. (2024). Oceanographic Parameter Measurement System Based on LoRA Communication Module. Journal Of Informatics And Telecommunication Engineering, 7(2), 435-447.
4. Pérez, D., & Risco, R. (2020). Implementación de Lora y Lorawan como escenario futuro de la industria 4.0 en el sector agroindustrial peruano. Campus, 25(29).
5. «LoRa Modulation Basics» (2019). Semtech. Archivado desde el original el 18 de julio de 2019. Consultado el 5 de febrero de 2020, https://www.semtech.com/lora/what-is-lora.
6. Elselini, A. S., Eleribi, H. R., Sanaani, M., & Alwerfalli, A. (2020, September). A Performance Study of an IoT System Using LoRa Access Network Technology. In Proceedings of the 6th International Conference on Engineering & MIS 2020 (pp. 1-7).
7. https://github.com/xreef/EByte_LoRa_E220_Series_Library?tab=readme-ov-file
8. Mischianti, R. (2021). ESP32 WEMOS Lolin32 high resolution pinout and Specs. Renzo Mischianti, https://mischianti.org/category/project/lora-wireless-remote-water-tank-and-pump-controller/
9. Rivadeneira, E. H., & Andrade, P. L. (2021). Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada.

SISTEMA OPTOELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURA DE CARGA USANDO IOT

Ana Margarita Abundis-Tristan[1], José David Filoteo-Razo[1,*], José Ramon Martinez-Angulo[1], Alan Diaz-Manriquez[1], Vicente Paul Saldivar-Alonso[1] y Julián Moisés Estudillo-Ayala[2]

[1]Facultad de ingeniería y Ciencias, Centro Universitario Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Matamoros SN, Cd. Victoria, Tamaulipas, México, CP 87149. [2]Departamento de ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, México CP 36787.
darazo@uat.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sistema optoelectrónico innovador diseñado específicamente para abordar el desafío de la detección de vibraciones en infraestructuras críticas, aprovechando la tecnología IoT. Este sistema ofrece una solución eficiente y económica para la detección de vibraciones, con ventajas clave como la capacidad de monitoreo remoto y la integración con otros sistemas electrónicos. La configuración del sistema se basa en el uso de dos POF (fibra óptica plástica) alineadas horizontalmente y separadas por una distancia, actuando como sensor extrínseco. El funcionamiento del sistema consiste en: la luz emitida por la POF-Tx atraviesa el espacio entre las dos POF y llega a la POF-Rx, cuya intensidad lumínica varía según las vibraciones presentes en la estructura. Los cambios lumínicos son captados por una fotorresistencia y posteriormente analizados por el microcontrolador. Cuando se excede un umbral predefinido de intensidad lumínica, se emite una notificación a través de Wi-Fi hacia la dirección de correo electrónico especificada. La capacidad de monitoreo remoto permite a ingenieros y operadores supervisar el estado de las estructuras en tiempo real, tomando medidas proactivas ante anomalías. Esta configuración puede ser implementada en puntos críticos a lo largo de la estructura de un puente, permitiendo detectar daños y garantizar la seguridad pública. La integración con otros sistemas electrónicos ofrece flexibilidad adicional para adaptarse a diversas aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

En la última década, ha incrementado un notable avance en la tecnología de sensores de fibra óptica, que ha llevado al desarrollo de dispositivos optoelectrónicos cada vez más sofisticados [1–5]. Este progreso ha sido impulsado por su extraordinario potencial, lo que ha resultado en que muchos de los sensores convencionales sean reemplazados por estos dispositivos en una amplia gama de aplicaciones, desde mediciones de variables físicas hasta monitoreo ambiental [6]. La combinación de esta nueva tecnología con los constantes avances en transductores ópticos ha facilitado el camino para el monitoreo remoto de una manera sin precedentes [7].

Además de su capacidad para proporcionar mediciones precisas y fiables, los sensores de fibra óptica ofrecen la ventaja adicional de permitir el monitoreo sin contacto y sin perturbaciones. Esto significa que pueden utilizarse en entornos sensibles donde el contacto físico podría interferir con los procesos que se están observando o donde la presencia de cables o dispositivos tradicionales podría ser impráctica o incluso peligrosa. Los sensores de fibra óptica pueden clasificarse generalmente en dos grupos: extrínsecos (sensores de fibra óptica donde la detección ocurre en una región fuera de la fibra) e intrínsecos (sensores de fibra óptica caracterizados por el hecho de que la detección ocurre dentro de la fibra misma) [8]. Sin embargo, los sensores de fibra óptica también pueden clasificarse por sus principios de funcionamiento como los interferómetros de fibra óptica, las rejillas de periodo largo y las rejillas de Bragg [7].

Los avances en tecnología de sensores ópticos han propiciado el desarrollo de aplicaciones cada vez más sofisticadas, entre las que destacan los sensores de vibración. Estos dispositivos son fundamentales para detectar y medir vibraciones en una amplia variedad de estructuras y sistemas.

Los sensores de vibración de fibra óptica son capaces de detectar cambios minúsculos en la longitud de onda o en la intensidad de la luz que viaja a lo largo de la fibra. Estos cambios están directamente relacionados con las vibraciones que afectan la fibra, lo que permite una detección precisa y sensible de movimientos, deformaciones u otras formas de perturbación [9].

Una de las principales ventajas de estos sensores es su capacidad para operar en entornos desafiantes, donde los sensores tradicionales podrían no ser adecuados debido a interferencias electromagnéticas o condiciones extremas. Además, su diseño basado en fibra óptica ofrece una mayor inmunidad al ruido y una mayor resolución, lo que los convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren mediciones precisas y confiables de vibración. Otro factor que ha contribuido al avance de los sensores de vibración de fibra óptica es la integración con la Internet de las cosas (IoT). Esta combinación ha dado lugar a la creación de dispositivos inteligentes y sistemas de monitoreo que pueden recopilar datos de vibración de manera remota, analizarlos en tiempo real y proporcionar información valiosa para la gestión predictiva de activos, la seguridad estructural y otras aplicaciones críticas. En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sistema optoelectrónico innovador para la detección de vibraciones en infraestructuras críticas, que utiliza fibras ópticas plásticas y tecnología IoT para proporcionar una solución eficiente y económica para el monitoreo de vibraciones.

SENSOR BASADOS EN FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

Este tipo de sensor de POF involucra configuraciones donde la luz se extrae de una fibra, interactúa con la magnitud a medir y se acopla en otra fibra o en la misma. La reflexión dentro de la misma fibra puede lograrse mediante la reflexión de Fresnel o la reflexión interna total en el extremo de la fibra [10]. El acoplamiento entre dos fibras puede ser para la transmisión o para la reflexión [11,12]. No obstante, las configuraciones de este tipo de sensor limitan el rango de trabajo, la sensibilidad y las regiones lineales de operación. La Figura 1 proporciona una representación esquemática que resalta el principio básico de medición del sensor propuesto. Los rayos ópticos emitidos desde la fibra fuente emergen en un cono cuyo ángulo medio en el ápice es θ_{max}. Suponiendo una distribución homogénea de energía, la pérdida en la potencia óptica (expresada en dB) se determina tomando el logaritmo de la relación entre el área del núcleo de la fibra receptora y el área total iluminada por el núcleo de la fibra emisora. La pérdida se describe mediante la siguiente expresión:

$$\eta = -10\log_{10}\left[\left(1+\frac{2d}{D}tan\theta_{max}\right)^2\right] \quad (1)$$

donde D es el diámetro del núcleo de la fibra, y d es la separación longitudinal entre las dos caras finales de la fibra [12].

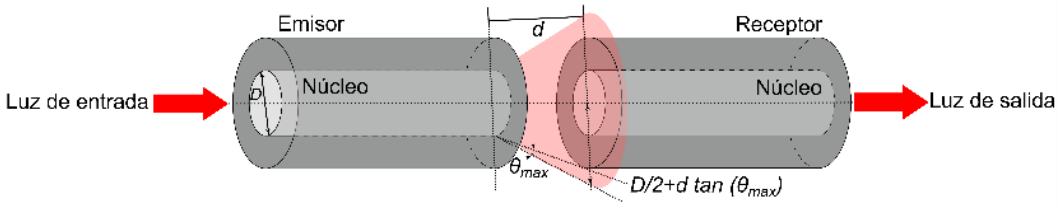


Figura 1. Principio básico de detección del sensor de fibra óptica plástica.

PARTE EXPERIMENTAL

La Figura 2 presenta un diagrama esquemático que describe la configuración del sensor en bloques. En esta configuración, se emplea un LED (Siled, modelo LED-X5D-YY-R30) que emite luz en un espectro de longitud de onda que abarca desde los 400 hasta los 800 nm (longitud central en 600 nm). El LED es utilizado como fuente lumínica en el sistema. Se emplea una fibra óptica plástica (POF) de polimetilmetacrilato con un índice de refracción escalonado (n_{core} = 1.49 and $n_{cladding}$ =

1.402) y una mínima atenuación aproximadamente en 650 nm [13]. Para medir la respuesta del sensor, se utiliza una fotorresistencia (MEC, modelo 9P5-1L) que responde a longitudes de onda entre 400 nm (violeta) a 600 nm (naranja) [14]. La radiación luminosa fue propagada mediante el uso de dos POF (fibra óptica plástica) alineadas horizontalmente y separadas por una distancia de 1 mm, actuando como sensor extrínseco. El funcionamiento del sistema consiste en: la luz emitida por la POF-Tx atraviesa el espacio entre las dos POF y llega a la POF-Rx, cuya intensidad lumínica varía según las vibraciones presentes en la estructura. Una vez capturada la información del sensor es enviada a un microcontrolador (Espressif Systems, modelo ESP8266) para obtener el cambio de intensidad del espectro de la fuente de luz [15].

Esta variación en la intensidad lumínica está directamente relacionada con la variable física que se está midiendo, en este caso, las vibraciones estructurales. Este proceso permite al sensor detectar y cuantificar con precisión dichas vibraciones. Cuando la intensidad lumínica excede un umbral predefinido, se emite una notificación a través de Wi-Fi hacia una dirección de correo electrónico específica, indicando una alerta en el sistema optoelectrónico. Este mecanismo se basa en el protocolo simple de transferencia de correo (SMTP); es un estándar de comunicación que permite la transmisión de mensajes de correo electrónico a través de Internet [16]. La utilización de SMTP habilita la creación de un sistema autónomo capaz de enviar correos electrónicos de manera automatizada. Esto resulta especialmente útil para la generación de notificaciones, alertas y registros de eventos en tiempo real, lo que facilita la supervisión y gestión remota de estructuras o sistemas sujetos a vibraciones. La integración de SMTP en este contexto ofrece una solución eficiente y versátil para la detección y notificación de eventos críticos en aplicaciones optoelectrónicas y de monitoreo estructural.

Para garantizar la estabilidad y la correcta transmisión de las señales a través de las POF-Tx y POF-Rx, se han diseñado piezas de plástico 3D que se ajustan a los requisitos del sistema. Estas piezas actúan como bases que permiten fijar de manera segura las POF, asegurando su posición deseada y minimizando cualquier movimiento o desalineación que pueda afectar la transmisión de las múltiples modalidades de propagación con distribuciones de intensidad presentes en la POF. Esto garantiza mediciones más precisas y confiables al asegurar la correcta alineación tanto de la fuente de luz como del detector.

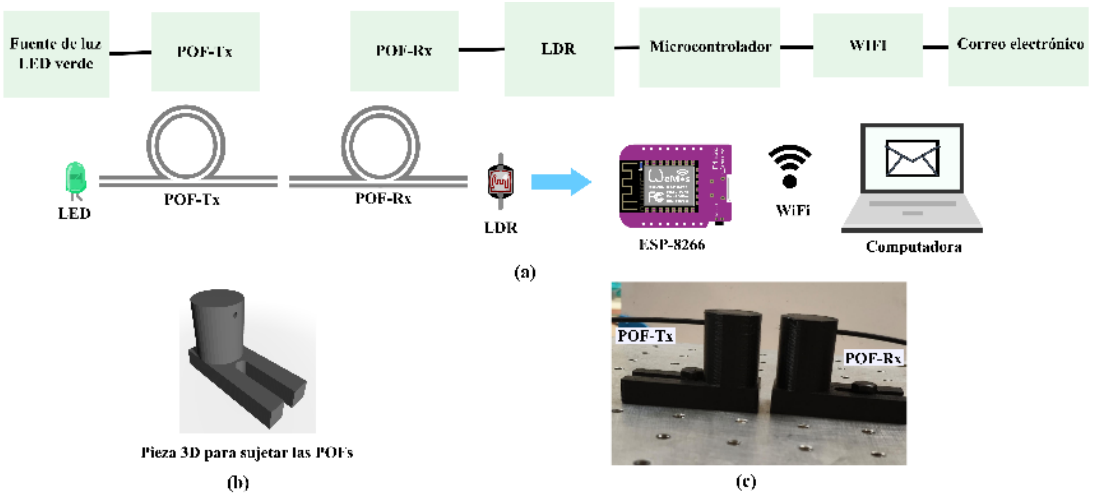


Figura 2. (a) Diagrama de bloques del sistema optoelectrónico. (b) Diseño de piezas en 3D para la estructura de la POF. (c) fotografía del diseño físico del sistema optoelectrónico. POF: Fibra óptica plástica. LDR: Fotorresistencia.

En la Figura 3(a), se presenta un esquema detallado del circuito electrónico, ilustrando cada uno de los componentes integrados en el sistema que hemos desarrollado. Este diseño se ha concebido con el propósito de lograr un funcionamiento óptimo y eficaz. En la Figura 3(b), se exhibe el diseño del circuito impreso (PCB), que ha sido elaborado utilizando el software EasyEDA [17]. Este diseño refleja la disposición física y la interconexión precisa de los componentes electrónicos en el sistema, esencial para su correcto desempeño. El uso de EasyEDA ha facilitado el proceso de diseño y ha contribuido a la viabilidad y eficiencia del sistema.

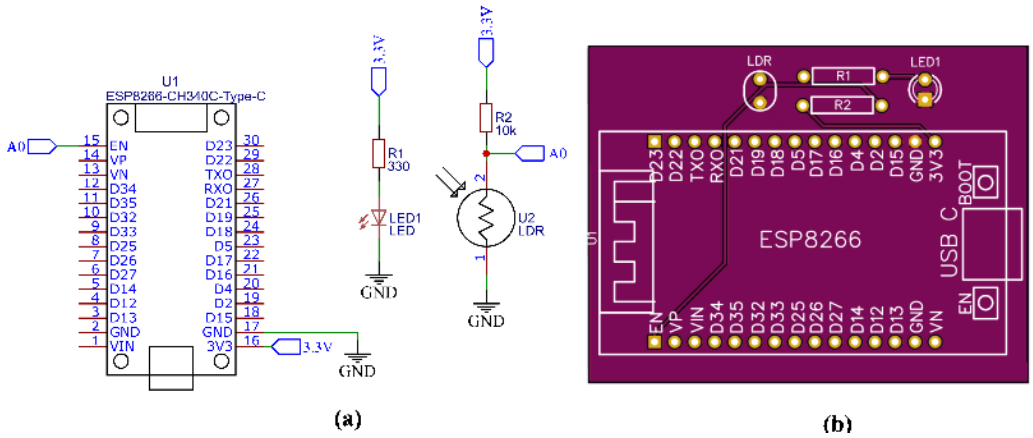


Figura 3.Sistema optoelectrónico para la detección de vibración. (a) circuito electrónico. (b) diseño del circuito impreso.

El código utiliza un ESP8266 para monitorear un sensor de luz (LDR) y enviar un correo electrónico de alerta cuando la lectura del sensor cae por debajo de un cierto umbral. A continuación, se detalla el algoritmo del sistema de alerta.

Algoritmo 1. Sistema de alerta de vibración con envio del correo electrónico

ENTRADA: Conexión a Internet y configuración del sensor de luz (LDR)
SALIDA: Activación del envío de alertas (correo electrónico)

1. **Conectar al WiFi especificado**
2. **Si la conexión WiFi falla:**
3. **Intentar nuevamente la conexión**
4. **Mientras (true):**
5. **Leer el sensor de luz (LDR)**
6. **Convertir la lectura del sensor en voltaje**
7. **Si (voltaje en LDR >= 2):**
8. **Crear un mensaje de correo electrónico con el asunto "Alerta de movimiento" y un mensaje indicando la alerta**
9. **Enviar el correo electrónico al destinatario especificado**
10. **Esperar un tiempo determinado antes de volver a leer el sensor y se reinicia el ciclo**

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la estabilidad del sistema optoelectrónico con la fuente de luz del LED verde. Se realizó un experimento de 120 minutos con mediciones tomadas en intervalos de 5 minutos, como se ilustra en la Figura 4. La estabilidad se evaluó a través de mediciones realizadas con un analizador de espectros visible (Ocean Optics, modelo USB2000+). La Figura 4(a) representa la variación de potencia, evidenciando una fluctuación de 50 cuentas.

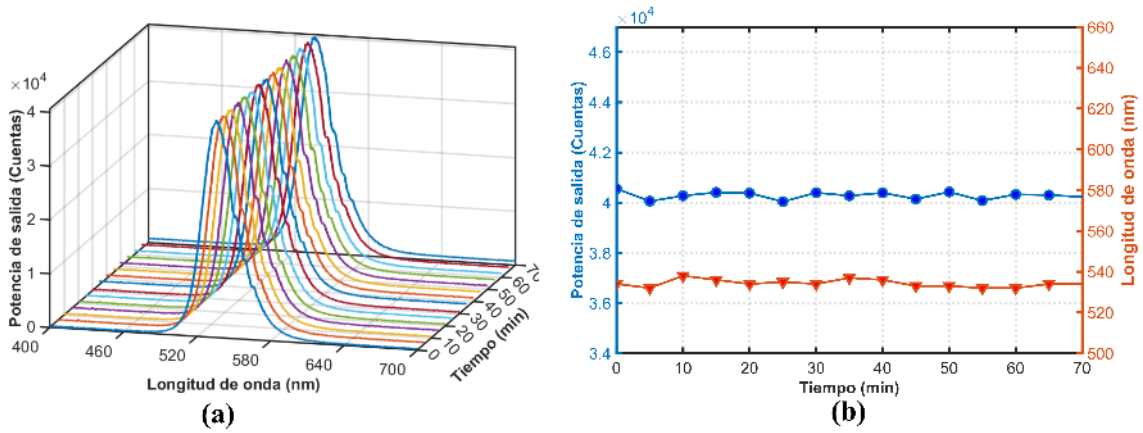


Figura 4. Estabilidad para la respuesta del sensor de POF con el LED verde. a) Espectro del sensor medido con un analizador de espectro visible, b) Fluctuación de potencia y de longitud de onda del espectro del sensor.

Se continua con una evaluación del hardware del sistema para confirmar su correcto funcionamiento. El sistema se montó en un soporte específico para llevar a cabo pruebas de vibración. Los resultados se resumen en la Tabla 1, la cual indica que cuando el sensor de luz (LDR) detecta una vibración, el sistema procede a enviar un correo electrónico.

Tabla 1. Prueba de funcionalidad de notificaciones ante la vibración del dispositivo.

Estado del sensor	Estado del LDR	Correo electrónico	Adoptadores finales
Bajo	Bajo (Voltaje < 2)	En espera	Ésta es la acción prevista
Alto	Alto (Voltaje >= 2)	Correo electrónico enviado	Ésta es la acción prevista

La Figura 5 ilustra la activación del sistema cuando se detecta vibración y se envía un correo electrónico. En la Figura 5(a), se realizaron más de 10,000 mediciones, durante las cuales se provocó vibración gradualmente en uno de los soportes de la POF. En las mediciones 6,362 y 9,749, se observó una variación en el voltaje del LDR de 1.78 V y 2.00 V, respectivamente. Respecto a la medición 9,749, se envió el correo electrónico, y el tiempo transcurrido hasta recibir la alerta fue de aproximadamente 7 segundos. Este tiempo es crítico para garantizar una respuesta oportuna. En otros estudios previos se ha establecido que el tiempo límite máximo para recibir una alerta es de 60 segundos [18]. Por lo tanto, en nuestro sistema, este tiempo de respuesta es aceptable para recibir una alerta. En la Figura 5(b), se muestra el proceso de establecimiento de la conexión y la visualización de las mediciones a través del puerto serie para observar su funcionamiento. Mientras que en la Figura 5(c), se presenta un ejemplo del resultado de la notificación mediante correo electrónico.

El sistema de detección de vibraciones basado en fibra óptica ofrece una solución avanzada y eficaz para la monitorización y detección de movimientos, deformaciones y otras perturbaciones en diversas infraestructuras. Cuando la fibra óptica se somete a vibraciones mecánicas, se producen cambios de intensidad de la luz que se propaga a través de ella. Por lo tanto, presenta varias ventajas significativas sobre los sensores tradicionales. En primer lugar, su capacidad para operar en entornos hostiles y su inmunidad a interferencias electromagnéticas los hacen ideales para una amplia gama de aplicaciones, como monitoreo estructural, detección de intrusos, monitoreo de maquinaria industrial y detección de eventos sísmicos.

Además, presenta varias ventajas como es eficiente y económico, ya que utiliza POFs y tecnología IoT. Esto lo convierte en una solución rentable para la detección de vibraciones en infraestructuras críticas. Además, permite el monitoreo remoto de vibraciones, lo que facilita la recopilación y análisis de datos desde una ubicación remota. La tecnología de fibra óptica proporciona mediciones precisas y sensibles de las vibraciones, garantizando una detección sensible de movimientos y deformaciones. Además, su diseño basado en fibra óptica ofrece una mayor inmunidad al ruido, asegurando mediciones confiables incluso en entornos con interferencias electromagnéticas. Por último, el sistema puede integrarse fácilmente con otros sistemas electrónicos para una gestión más completa de la infraestructura, lo que brinda mayor flexibilidad y funcionalidad en su aplicación en diferentes contextos y necesidades.

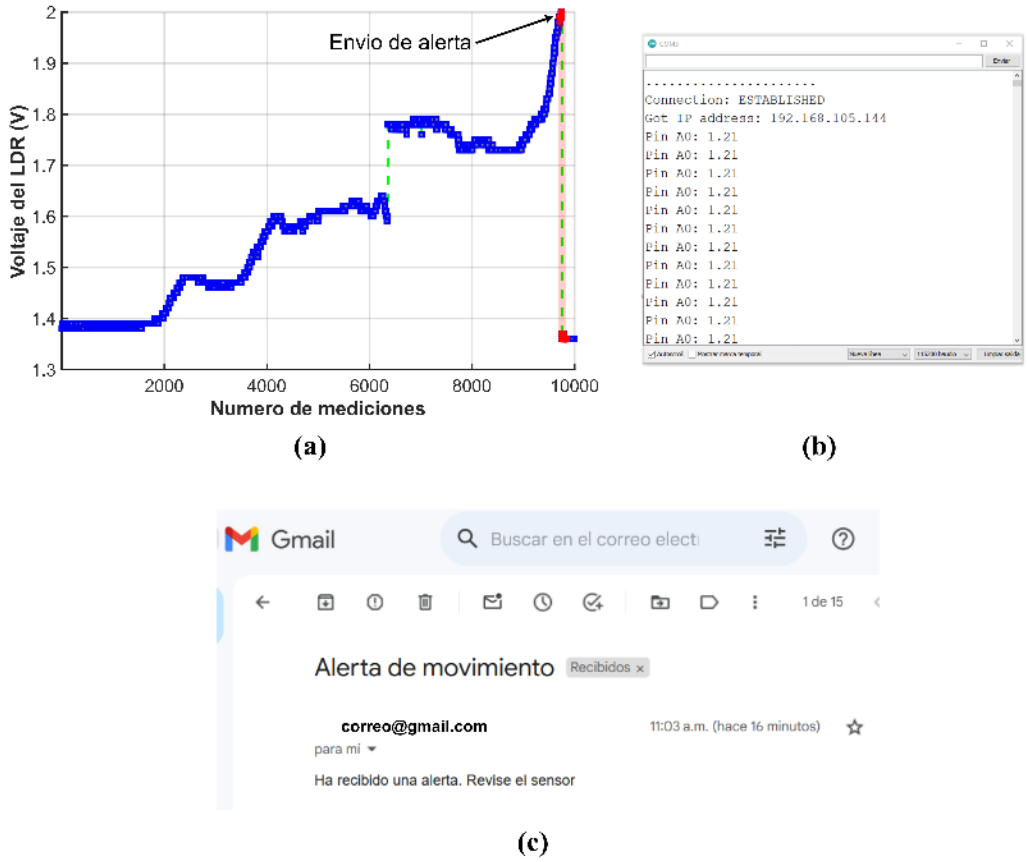


Figura 5. Resultados de la activación de la alerta. (a) Mediciones del desempeño y activación de la notificación de la alerta. (b) Establecimiento de la conexión y visualización de las mediciones a través del puerto serie. (c) Ejemplo del resultado de notificación mediante correo electrónico.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de detección de vibración basado en un sensor de fibra óptica utilizando POFs. Se llevó a cabo una exhaustiva evaluación del hardware del sistema para garantizar su correcto funcionamiento, y se realizaron pruebas de vibración para validar su capacidad de detección. Los resultados obtenidos demostraron una buena estabilidad en las mediciones, gracias a la modulación de la intensidad de la señal óptica mediante cambios en la separación longitudinal de las fibras ópticas. Además, se implementó un sistema de notificación que activa alertas a través de correo electrónico con tiempo de respuesta aceptable. En general, el sistema muestra un rendimiento satisfactorio en la detección de vibración y en la entrega eficiente de alertas a los usuarios finales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el CONAHCYT mediante el programa Estancias Posdoctorales por México 2022 con el proyecto No. 2840970, titulado “Diseño e implementación de sistemas de monitoreo inteligente usando dispositivos optoelectrónicos para aplicaciones a los sistemas agropecuarios en Tamaulipas”.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. N. Lopes, P. H. S. Pinto, J. D. L. Vargas, A. Dante, A. Macrae, R. C. B. Allil, and M. M. Werneck, "Development of an Immunocapture-Based Polymeric Optical Fiber Sensor for Bacterial Detection in Water," Polymers (Basel) 16, 861 (2024).
2. L. S. Supian, M. Anwar, C. S. Ping, N. S. Suhaimi, H. G. Safnal, and N. Arsad, "Development of POF-Based Insole for Plantar Pressure and Ground Reaction Forces Monitoring," in *2024 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)* (IEEE, 2024), pp. 260–264.
3. N. Wang, Y. Yao, P. Wu, L. Zhao, and J. Chen, "Soft Polymer Optical Fiber Sensors for Intelligent Recognition of Elastomer Deformations and Wearable Applications," Sensors 24, 2253 (2024).
4. R. N. Lopes, P. H. S. Pinto, J. D. L. Vargas, A. Dante, A. Macrae, R. C. B. Allil, and M. M. Werneck, "Development of an Immunocapture-Based Polymeric Optical Fiber Sensor for Bacteria Detection," (2024).
5. J. D. Filoteo-Razo, J. C. Elizondo-Leal, J. R. Martinez-Angulo, J. H. Barron-Zambrano, A. Díaz-Manriquez, V. P. Saldivar-Alonso, J. M. Estudillo-Ayala, and R. Rojas-Laguna, "Non-Invasive Optoelectronic System for Color-Change Detection in Oranges to Predict Ripening by Using Artificial Neural Networks," IEEE Photonics J 15, 1–10 (2023).
6. E. Udd and W. B. Spillman Jr, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* (John Wiley & Sons, 2024).
7. Y. R. Garcia, J. M. Corres, and J. Goicoechea, "Vibration detection using optical fiber sensors," J Sens 2010, (2010).
8. Z. Fang, K. Chin, R. Qu, and H. Cai, *Fundamentals of Optical Fiber Sensors* (John Wiley & Sons, 2012).
9. S. Sun, Y. Liu, and M. A. Sharaf Eldean, "Design and implementation of an optical fiber sensing based vibration monitoring system," Journal of Vibroengineering 23, 496–511 (2021).
10. L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, and R. Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers," Sensors 12, 12184–12207 (2012).
11. S. Binu, V. P. M. Pillai, V. Pradeepkumar, B. B. Padhy, C. S. Joseph, and N. Chandrasekaran, "Fibre optic glucose sensor," Materials Science and Engineering: C 29, 183–186 (2009).
12. K. S. C. Kuang, S. T. Quek, and M. Maalej, "Assessment of an extrinsic polymer-based optical fibre sensor for structural health monitoring," Meas Sci Technol 15, 2133 (2004).
13. M. M. Werneck and R. C. S. B. Allil, *Plastic Optical Fiber Sensors: Science, Technology and Applications* (CRC Press, 2019).
14. N. G. FLETES-CAMACHO, C. PAREDES-VÁZQUEZ, and J. VACA-ROSAS, "Diseño e implementación de un prototipo de automatización y control sustentable para invernadero," (2017).
15. J. Ceja, R. Renteria, R. Ruelas, and G. Ochoa, "Módulo ESP8266 y sus aplicaciones en el internet de las cosas," Revista de Ingeniería eléctrica 1, 24–36 (2017).
16. P. Sharmila, S. Shobhana, M. Abirami, and U. Eswaran, "Realizing Internet Of Things Using Arduino, ESP8266 & Iis Server And Mysql Db For Real-Time Monitoring & Controlling Multiple Fire Alarm Systems Over A Wireless Tcp/Ip Network," Journal on Software Engineering 11, (2016).
17. F. Asadi, *Electric Circuit Analysis with EasyEDA* (Springer, n.d.).

18. E. U. Omede, A. E. Edje, M. I. Akazue, H. Utowen, and A. A. Ojugo, "IMANoBAS: An Improved Multi-Mode Alert Notification IoT-based Anti-Burglar Defense System," Journal of Computing Theories and Applications 2, 43–53 (2024).

CARACTERIZACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN TI-6AL-4V GRADO ELI RECUBIERTA CON PLASMA MEDIANTE PE-CVD

Víctor Jesús Sagrero-Mora[1], Héctor Guillermo Carreón Garcidueñas[1], María de Lourdes Carreón Garcidueñas[2], Rufino Osorio Márquez[1], Maricela Durán Ríos[1], Jesús Iván Mejía Navarro[1], Martha Angélica Lemus Solorio[1]

[1]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [2]University of Arkansas
vsagreromora@gmail.com

RESUMEN

La aleación Ti-6Al-4V grado ELI posee una alta resistencia a la corrosión, sin embargo, esta propiedad se ve superada en entornos biológicos, por lo que es necesario utilizar recubrimientos superficiales para aumentar dicha resistencia; además, es de utilidad usar ensayos no destructivos para su caracterización y monitoreo, pues estos no comprometen las propiedades mecánicas del material. El principal objetivo de esta investigación es analizar por medio de técnicas no destructivas tales como corrientes de Eddy y Potencial Termoeléctrico los cambios microestructurales de la aleación Ti-6Al-4V grado ELI tratada térmicamente por envejecimiento variando los tiempos de permanencia, así como correlacionar el tratamiento superficial de plasma con las propiedades observadas, y su sometimiento a ensayos de corrosión. Para lograrlo, se realizaron tratamientos térmicos a 1075 - 950 °C para generar la microestructura acicular, y un posterior envejecido a 545 °C variando el tiempo de permanencia. Después, se realizó la deposición del recubrimiento de Si por 30 minutos a 400 °C, en todas las muestras; posteriormente se realizaron los ensayos no destructivos. Finalmente, las muestras fueron sometidas a pruebas de corrosión en solución Hank a 37 °C. Mediante el proceso experimental, se obtuvieron capas micrométricas de Si en la superficie de las probetas, además, se identificó una tendencia en decremento en el potencial termoeléctrico absoluto conforme se incrementa el tiempo de envejecido, mientras que no se observaron cambios significativos en conductividad respecto a este tiempo de envejecido. En cuanto al potencial de corrosión se observó que los cambios microestructurales provocados por los tratamientos térmicos varían sus valores, teniendo potenciales desde -0.28 V hasta -0.79 V.

INTRODUCCIÓN

El titanio y sus aleaciones poseen una excelente resistencia a la corrosión, debido a la alta afinidad del titanio con el oxígeno, la cual produce una delgada capa superficial de óxido de titanio que protege al material.

La aleación Ti-6Al-4V es ampliamente utilizada en el sector biomédico debido a que, además de la resistencia a la corrosión previamente mencionada, también posee una gran biocompatibilidad.

Esta aleación se caracteriza por ser sensible a variaciones microestructurales dependiendo de las condiciones de tratamiento térmico aplicadas, con lo cual se pueden obtener microestructuras de tipo acicular, equiaxial y bimodal [1].

TEORÍA

El proceso de corrosión es responsable de la toxicidad celular, e inhibe su adhesión y proliferación, por lo que se necesita una mayor resistencia a la corrosión para mejorar la eficiencia de los implantes biológicos. Además, dado que los fluidos fisiológicos son soluciones que contienen cloruros y se mantienen a 37 °C, la resistencia a la corrosión también es una propiedad vital para los materiales utilizados en los implantes.

Aunque las aleaciones de titanio presentan muchas ventajas, también presentan ciertas limitaciones, como la disolución del titanio, corrosión por fatiga y la potencial alteración de sus propiedades superficiales [2].

En los últimos años, se ha estudiado el uso de recubrimientos orgánicos e inorgánicos en sustratos metálicos para aumentar su resistencia a la corrosión. Dependiendo de la naturaleza del gas alimentado, se pueden depositar películas delgadas en prácticamente todos los sustratos sólidos mediante la técnica de deposición química de vapor mejorada por plasma (PECVD). La mayor ventaja de esta técnica frente a otras técnicas de deposición, es que permite depositar recubrimientos de alta calidad con gran adherencia, a temperaturas relativamente bajas del sustrato (300 °C) [3].

La técnica de corrientes de Eddy permite una inspección adecuada para detectar defectos superficiales y subsuperficiales, por lo que es posible medir espesores de recubrimientos, detectar presencia de precipitados, y medir cambios en la conductividad eléctrica [4].

Los ensayos de potencial termoeléctrico se basan en el efecto Seebeck, y permiten detectar variaciones en la microestructura debidos a defectos, precipitados o esfuerzos residuales mediante mediciones de potencial termoeléctrico en materiales metálicos conductores [5].

Tomando como base la información previamente mencionada, la presente investigación se enfoca principalmente, a incrementar la resistencia a la corrosión en piezas con microestructura acicular de aleación Ti-6Al-4V grado ELI, mediante un tratamiento superficial de deposición química de vapor mejorada por plasma, y su caracterización mediante técnicas no destructivas, tales como los ensayos de Corrientes de Eddy, así como la técnica de Potencial Termoeléctrico.

PARTE EXPERIMENTAL

Para realizar este trabajo, se utilizó una aleación Ti-6Al-4V grado ELI. De una placa de este material, se cortaron probetas con dimensiones de 1.6 mm x 30 mm x 10 mm, para poder generar en cada una de ellas microestructura acicular, y someterlas a distintos tiempos de envejecimiento.

Con la finalidad de obtener la microestructura acicular en las probetas de Ti-6Al-4V grado ELI, se llevó a cabo un tratamiento térmico de solubilizado a 1075 °C por 15 minutos, con un posterior recocido a 950 °C por 2 horas y un temple en agua. Después de generar la microestructura deseada, se realizó un envejecido, el cual se llevó a cabo a una temperatura de 545 °C, variando los tiempos de permanencia los cuales fueron: 1 minuto, 15 minutos, 1 hora, 2 horas, 16 horas, 2 días, 6 días, 12 días, 18 días y 24 días.

El recubrimiento superficial del material, se realizó mediante un tratamiento de deposición química de vapor mejorada por plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition – PECVD), usando una mezcla de gas silano (SiH_4) + (H_2) con un tiempo de permanencia en el reactor de 30 minutos para todas las probetas, esto a una temperatura de 400 °C, una potencia en el reactor de 30 W y una presión de trabajo dentro del reactor de 0.1 torr.

El reactor en el cual se llevaron a cabo los tratamientos superficiales de las muestras, es un Reactor de Plasma de Radio Frecuencia (PR-RF), el cual se presenta en la Figura 1.

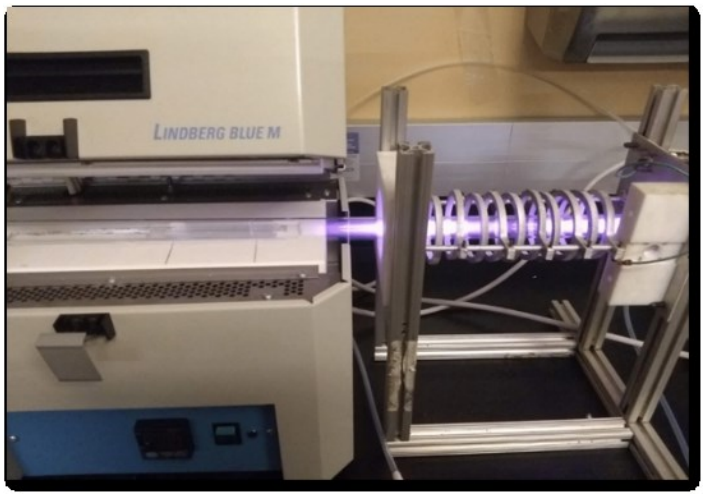


Fig. 1. Reactor de plasma de radio frecuencia.

Las mediciones del espesor de capa fueron realizadas mediante el procesamiento de imágenes obtenidas con la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), utilizando el software ImageJ.

Para medir la conductividad eléctrica en las piezas tratadas térmica y superficialmente, se utilizó el equipo de Corrientes de Eddy, esto es, el instrumento NORTEC 500D marca OLYMPUS, en el cual se usó una sonda tipo lápiz con una frecuencia de trabajo de 4 MHz. Se realizaron 5 mediciones en todas las probetas en la modalidad de medición de voltaje con la finalidad de obtener un promedio de dichas mediciones y posteriormente convertir mediante software los valores de voltaje a conductividad. En la Figura 2 se muestra un esquema que detalla el funcionamiento de esta técnica de Corrientes de Eddy, ejemplificando el uso de una sonda tipo lápiz para la inspección en la superficie de un material conductor.

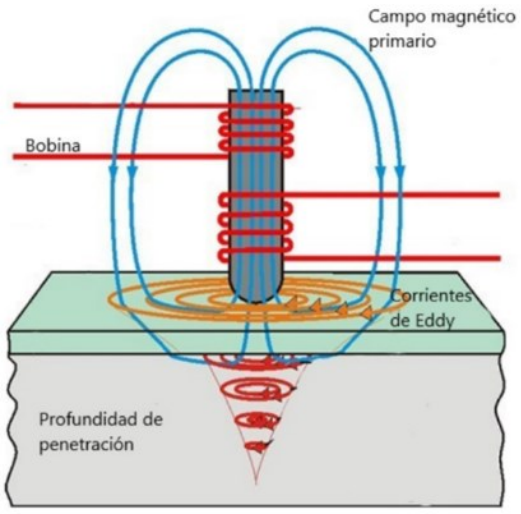


Fig. 2. Esquema de principios básicos de Corrientes de Eddy.

Por otro lado, la propiedad de termoelectricidad se midió con la técnica de potencial termoeléctrico, empleando el método de punta caliente con punta de cobre, en un equipo Thermo-Sorter Walker Scientific Inc., tal como se muestra en la Figura 3.

Para obtener datos estadísticamente significativos, se realizaron 50 mediciones en la superficie sin recubrimiento, y 50 mediciones en el extremo con recubrimiento en cada una de las probetas con diferentes tiempos de envejecido.

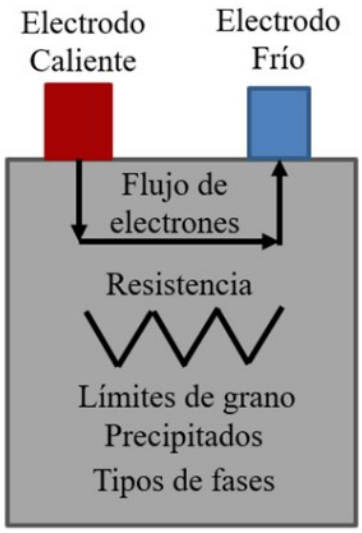


Fig. 3. Esquema de la técnica de potencial termoeléctrico.

En cuanto a la caracterización electroquímica se realizaron las técnicas de polarización potenciodinámica, para dichas pruebas se utilizaron potenciales de circuito abierto en solución de Hank con pH 7.4 a una temperatura de 37 °C ± 1 °C. Además, también se usaron un electrodo saturado de calomel como electrodo de referencia, y las muestras como electrodos de trabajo, tal como se muestra en la Figura 4.

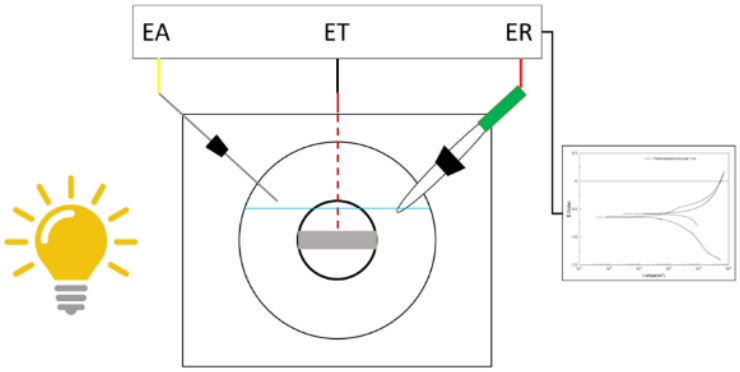


Fig. 4. Esquema de celda electroquímica con electrodos y fuente de calor.

RESULTADOS

Microestructura Y Medición De Recubrimiento

En la Figura 5 se muestra una imagen obtenida con microscopio óptico donde se observa la microestructura acicular de una pieza sin envejecido y sin recubrimiento, es decir, únicamente con el tratamiento térmico pertinente para la formación de la morfología acicular.

Respecto a lo observado en la figura anterior, la fase α corresponde a las zonas claras, mientras que las zonas oscuras corresponden a la fase β. Sin embargo, en la microestructura acicular, la fase α nuclea en los límites de grano de la fase β y crece en forma de láminas. Este tipo de microestructura

se caracteriza por la combinación de las agujas gruesas de α y β, las cuales se unen, dando lugar a la formación de colonias, las cuales, debido a su morfología, provocan que el material sea más frágil, debido a que tal microestructura también posee una mayor dureza [6, 7].

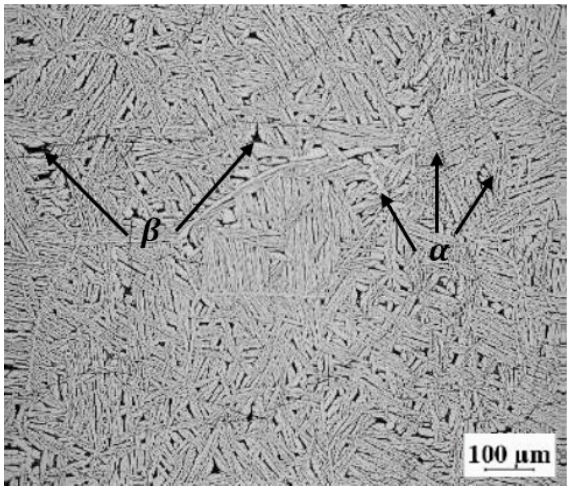


Fig. 5. Microestructura acicular de la aleación de Ti-6Al-4V grado ELI.

Antes de realizar las mediciones del espesor del recubrimiento mediante el software, primero se corroboró la certeza de estar midiendo la capa de silicio depositada, para tal efecto, se realizó un análisis de mapeo EDS en la zona cercana a la capa en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de las imágenes presentadas en la Figura 6, tomando como único elemento de análisis el silicio; de esta manera se obtuvieron las imágenes, donde se logra observar el recubrimiento en las probetas con 16 horas y 24 días de envejecido.

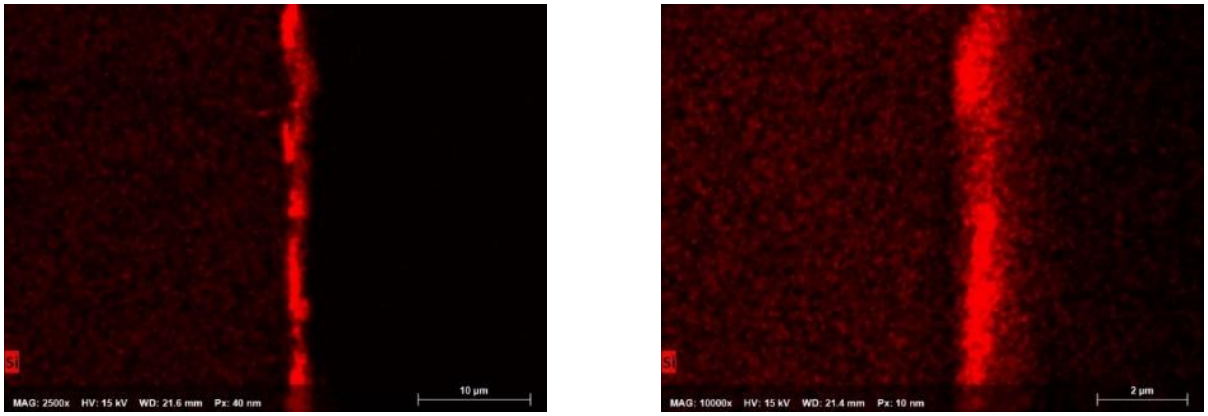


Fig. 6. Imágenes de análisis EDS para recubrimiento de silicio, izquierda: Probeta con 16 horas de envejecido, y derecha: Probeta con 576 horas de envejecido.

Una vez realizado este proceso, se hicieron las mediciones correspondientes para caracterizar en cuanto a espesor las muestras previamente mencionadas, esto con las 30 mediciones mediante el software ImageJ. De esta manera, se obtuvieron los datos necesarios para realizar cálculos estadísticos como el valor promedio de la capa, la desviación estándar, y posteriormente, se calculó el error estándar con un nivel de confianza del 95% mediante tablas de valores *distrubición normal y la puntuación Z,* lo que permitió identificar un intervalo de confianza, dando como resultado las imágenes correspondientes a la Figura 7.

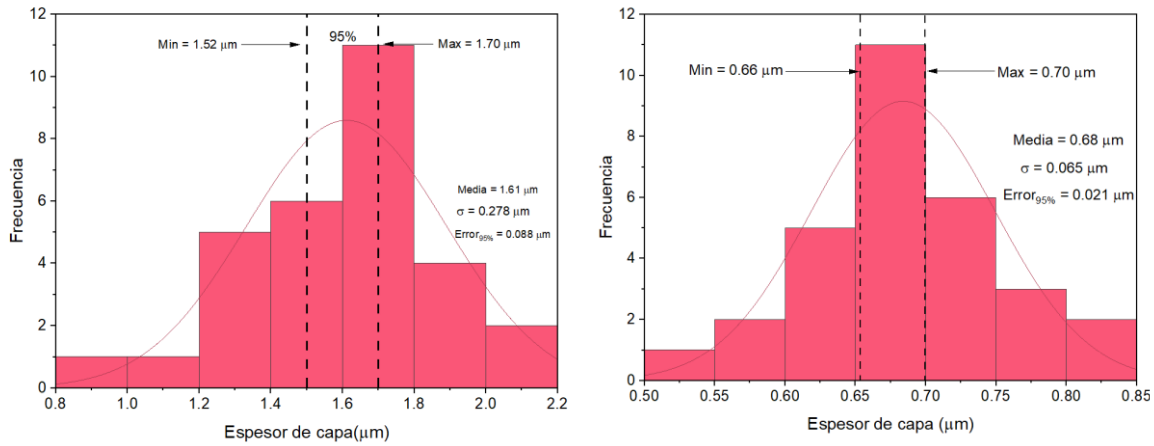


Fig. 7. Izquierda: Distribución estadística del espesor de capa para probeta con 16 h de envejecido. Derecha: Distribución estadística del espesor de capa para probeta con 576 h de envejecido.

Respecto a los datos obtenidos de espesor para estas dos probetas, los valores de 1.61 µm y 0.68 µm para dichas muestras, se encuentran bastante similares a los obtenidos por Kyziol y col. [8], quienes depositaron capas de Si, C y N sobre un sustrato de Ti-6Al-4V mediante una técnica similar (CVD Asistida por Plasma con Microondas), obteniendo espesores de 0.64 µm en sus recubrimientos; estas ligeras variaciones se atribuyen a distintos factores, desde el método que no es exactamente el mismo, pues a pesar de que ambas son deposiciones químicas de vapor asistidas por plasma, la frecuencia aplicada para la generación de dicho plasma es diferente, lo cual causa que las interacciones del plasma con las moléculas del gas sean distintas y por ende, la interacción con el sustrato varíe. Además de esto, los parámetros de operación al interior del reactor durante la deposición también difieren, pues en el presente trabajo se usa un gas acarreador de hidrógeno, en condiciones de baja presión y una temperatura de 400 °C, mientras que Kyziol utilizó diversos gases de aporte, tales como Ar, N_2 o CH_4, y una temperatura de 200 °C.

Caracterización Por Ensayos No Destructivos

En cuanto a la técnica de Corrientes de Eddy, se obtuvieron datos de voltaje para cada una de las piezas previo a los ensayos de corrosión, y dichos valores de voltaje fueron utilizados para obtener los valores de conductividad en unidades de MS/m, mediante una curva de calibración para el Ti-6Al-4V. Esta información se representa en la Figura 8, la cual muestra la tendencia que tiene la conductividad respecto al tiempo de tratamiento térmico en estas probetas. En dicha figura, se observa que no hay una tendencia definida de la conductividad respecto al tiempo de tratamiento térmico, sino que sus aumentos y decrementos son irregulares. Este comportamiento demuestra que, si bien existen cambios en la conductividad eléctrica del material al variar los tiempos de tratamiento térmico de envejecido, no hay un orden bien definido en dichos cambios, pues esta propiedad aumenta y disminuye de manera irregular. Dicho comportamiento se debe a que la formación de los precipitados y las alteraciones en la red cristalina del material no son lineales con el tiempo y la temperatura, sino que, al ser fenómenos afectados por múltiples factores (composición química, segregación, esfuerzos residuales, dislocaciones, vacancias, entre otros), estos varían continuamente durante las diversas etapas del tratamiento térmico, como lo indican varios autores [9].

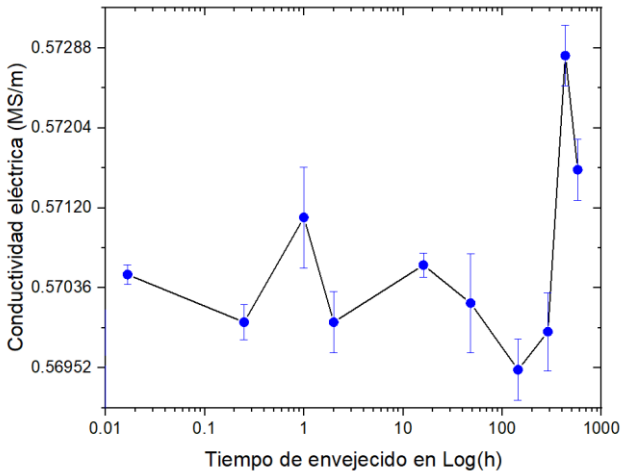


Fig. 8. Gráfica de conductividad vs tiempo de envejecido para probetas de Ti-6Al-4V grado ELI con microestructura acicular.

Respecto a la técnica de potencial termoeléctrico, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 9, la cual permite observar el comportamiento del potencial termoeléctrico absoluto respecto al tiempo de envejecido en esta aleación. En este caso, muestra un comportamiento en donde a tiempos cortos de tratamiento térmico incrementa su potencial rápidamente, y una vez alcanzado su punto máximo en ese periodo de tiempo corto, conforme más se prolonga el tiempo de tratamiento térmico, el potencial decrementa de manera uniforme.

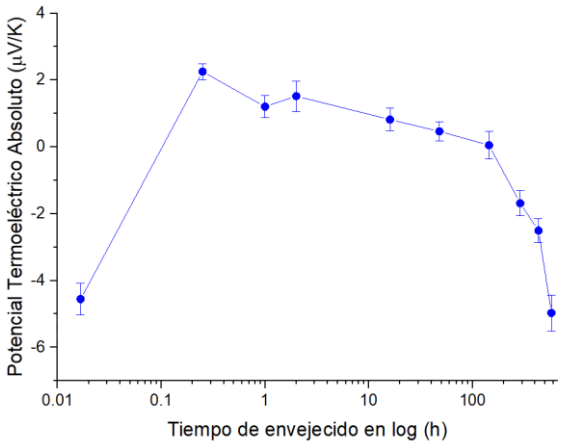


Fig. 9. Gráfica de PTE Absoluto vs Tiempo de envejecido en probetas con microestructura acicular.

Carreón y col. [5] reportaron valores de potencial termoeléctrico absoluto en piezas de Ti-6Al-4V con microestructura acicular a distintos tiempos de envejecido, para el caso de una muestra con la microestructura mencionada y sin tratamiento térmico reportan valores de -6.53 µV/K, mientras que para una pieza con un envejecido de 144 h a 515 °C la magnitud de dicho parámetro decrementa hasta -7.27 µV/K; en contraste con lo obtenido en el presente trabajo donde el valor de PTE absoluto más bajo se encuentra en la muestra con 576 h de envejecido, siendo de -4.97 µV/K su valor. Tal diferencia puede atribuirse tanto a la temperatura de envejecido, la cual, al ser distinta, genera un grado distinto de distorsión en la red cristalina del material por acción de la precipitación, ya que la cinética de formación de dichos precipitados varía con el tiempo y la temperatura, sin embargo, la diferencia de valores de PTE absoluto entre el trabajo previamente mencionado y el presente siguen siendo bastante notables en comparación a los reportados por Carreón en su investigación; en este

caso, tal variación puede explicarse por la anisotropía del material, ya que dependiendo de la dirección en que sea medido el potencial termoeléctrico, éste presentará también variaciones en su valor debido a la propiedad de anisotropía, así como por la orientación cristalográfica del material, tal y como lo menciona Carreón [10] en su trabajo, donde estudia el efecto de la anisotropía en el potencial termoeléctrico en piezas de Ti-6Al-4V.

Comportamiento Ante La Corrosión

En la Figura 10 se presenta el cambio en el potencial de corrosión obtenido a partir de las curvas de polarización potenciodinámicas para cada una de las muestras analizadas, respecto al tiempo de tratamiento térmico aplicado a cada una de ellas, donde la tendencia aleatoria en estos valores, se asemeja a lo presentado en la Figura 8, es decir, tiene una tendencia similar a la presentada por la propiedad de conductividad, medida mediante la técnica de corrientes de Eddy, lo cual es coherente, pues la corrosión depende en gran medida de la conductividad eléctrica del material en cuestión, ya que facilita la movilidad de los electrones involucrados en los sistemas de reacción electroquímicos; además del medio en el que se encuentra inmerso.

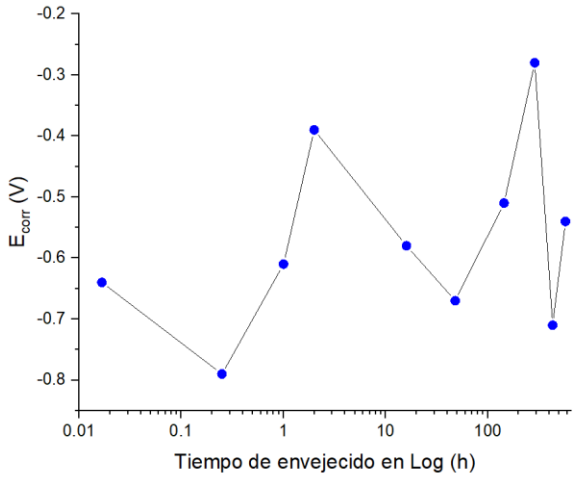


Fig. 10. Comportamiento del potencial de corrosión frente al tiempo de envejecido.

De acuerdo a los resultados reportados por Karimzadeh y col. [11], la microestructura acicular tiene una mayor tendencia a la corrosión debido a que las láminas características de dicha microestructura generan pares galvánicos, provocando que tenga mayor tendencia a corroerse, lo cual es coherente con los resultados presentados en este trabajo, pues pese a las variaciones en los potenciales de corrosión, todos los datos obtenidos se mantienen con valores negativos, indicando así ser más activos que incluso aleaciones de Co o Ni, pues éstas presentan valores de -0.27 V y -0.23 V, respectivamente.

Los valores obtenidos de potencial de corrosión en este trabajo, son similares a los reportados por Cheng y col. [12] para la aleación de Ti-6Al-4V, sin embargo, en dicho trabajo solo se midió el potencial de corrosión en este tipo de aleación sin ningún tipo de recubrimiento, es por ello que los valores son ligeramente distintos.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- La técnica de Corrientes de Eddy con frecuencia de 4 MHz no presenta gran sensibilidad a los cambios microestructurales generados por los tratamientos térmico y superficial, pues los valores de conductividad se mantienen similares.

- El potencial termoeléctrico demuestra mayor sensibilidad a los cambios producidos en el material debido al conjunto de tratamientos térmico y superficial con la punta de cobre.
- De las dos técnicas no destructivas empleadas, ambas resultaron poco sensibles a cambios en los valores medidos por cada una de ellas, de las muestras antes y después de los ensayos de corrosión.
- El potencial de corrosión se ve afectado por el tiempo de tratamiento térmico, ya que los cambios microestructurales provocados por dicho tratamiento cambian los valores del potencial de manera muy similar a la conductividad eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. F.J. Gil, J.A. Planell. *Biomecánica* 1 (1993) p.34-42.
2. R. Karpagavalli, A. Zhou, P. Chellamuthu, K. Nguyen. *Journal of Biomedical Research* 83-A (2007) p.1087-1095.
3. V. Togan, G. Ioniţă, I. Antoniac. *Key Engineering Materials* 583 (2014) p.22–27.
4. Charles J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation,* United States of America, McGraw-Hill, 2003.
5. H. Carreón, D. San Martín, F.G. Caballero, V.E. Panin. *Physical Mesomechanics* 20 (2017) p.447-456.
6. Christoph Leyens, Manfred Peters, *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications,* Weinheim, Alemania, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
7. G. Lütjering. *Materials Science & Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing* 243-A (1998) p.32-45.
8. K. Kyziol, L. Kaczmarek, G. Brzezinka. *Chemical Engineering Journal* 240 (2014) p.516-526.
9. David A. Porter, Kenneth E. Easterling, Mohamed Y. Sherif, *Phase transformations in metals and alloys,* 3rd Edition, United States of America, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
10. H. Carreón. *NDT&E International* 39 (2006) p.433-440.
11. F. Karimzadeh, M. Heidarbeigy, A. Saatchi. *Journal of Materials Processing Technology* 206 (2008) p.388-394
12. J. Cheng, J. Li, S. Yu, Z. Du, F. Dong, J. Zhang, X. Zhang. *Metals* 11 (2021) p.11-25.

SENSOR DE FUERZA CON LAZO DE FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

Yeraldyn Guzmán Castro, Alfredo Murrieta Loyde, José Manuel López Villagómez, Mónica Trejo Durán, Carlos Rodríguez Doñate, Igor Guryev, Ruth Ivonne Mata Chávez

Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Departamento de Estudios multidisciplinarios, sede Yurira, Guanajuato
y.guzmancastro@ugto.mx, a.murrieta.loyde@ugto.mx, jm.lopezvillagomez@ugto.mx, mtrejo@ugto.mx, c.rodriguezdonate@ugto.mx, guryev@ugto.mx, ruth@ugto.mx

RESUMEN

Los sensores en base a fibras ópticas son de gran interés en la investigación debido a que ofrecen alternativas tecnológicas y confiables para su aplicación en diferentes sectores como el industrial, el automotriz, en medicina, en la industria de alimentos, entre otros. Hace más de una década se conocen las fibras ópticas de plástico (POF) cuyos núcleos son más grandes que los de las fibras fabricadas en base a vidrio, por lo que se conocen como fibras multimodales. Se usan principalmente con fuentes de luz visible como LEDs, láseres de baja potencia y su diseño estructural se base a polímeros como el PMMA (polimetilmetacrilato), acrilatos, y poliimidas, siendo el núcleo de PMMA y con revestimiento de polímeros fluoruros. Este tipo de fibras son más baratas de fabricar, más fáciles de trabajar y más flexibles en comparación con algunos tipos de vidrio. Aunque pueden tener un índice de refracción más alto que las fibras de vidrio, no pueden transmitir datos a larga distancia. Esta diferencia llama la atención para proponerlas como sensores de luz en el espectro visible y que no requieran características sofisticadas ni métodos o equipos costosos para su fabricación y medición de alguna variable física.

En este trabajo se presenta de forma preliminar un sensor de fuerza fabricado con fibra óptica plástica de 1mm de diámetro con luz visible como fuente. Se basa en la modulación del pico de intensidad a 632 nm, y se registra su respuesta espectral en un rango de fuerza de 0-500N la cual se aplica de forma gradual sobre la fibra óptica. En el esquema experimental se utiliza un acoplador de puertos 2x2 a un factor de acoplo de 50:50 unido a un lazo de fibra de 10cm. Se prueba con desbastes diametrales diferentes en cortes con figuras típicas como D y V. Los resultados muestran variaciones del comportamiento del ancho del pico en función de la presión aplicada, lo que muestra variación en las lecturas de intensidad de la salida del lazo con ambos tipos de desbastes siendo el de mayor sensibilidad el desbaste tipo D al 30% al presentar una sensibilidad de 14.2pm/N en un intervalo de 7.1 nm.

INTRODUCCIÓN

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo cuyo estudio sigue vigente gracias al constante desarrollo tecnológico de las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones. Las características que pueden observarse para este tipo de sensores dependen del tipo de fibra óptica, el material de fabricación, las características ópticas, la sensibilidad y su costo. Usualmente su estudio se basa en su respuesta a cambios en intensidad o variaciones en longitud de onda. Los sensores de fibra óptica basados en intensidad siguen siendo una alternativa económica para medir algunas variables físicas como presión, torsión, temperatura, y fuerza. La necesidad de detectar y medir diferencias o cambios conlleva a tener un mejor control y calidad en procesos industriales, en una mejor detección y seguimiento en la salud pública, así como en prevención de desastres por cambios medio ambientales y climáticos. Sin embargo, para que la medición sea confiable es necesaria una referencia para calibrar la respuesta de salida del sensor. Se conoce que las variaciones de potencia óptica que se producen por la fuente de luz, de los acopladores, los conectores o cualquier otro componente del sistema óptico introducen errores a la lectura. Además, haciendo pruebas en el laboratorio, los cambios suelen ser a veces muy pequeños, cuyas graficas varían muy lentamente hasta parecer imperceptible dicha variación. Alternativamente, los sensores ópticos en base a interferómetros son también muy utilizados, debido a la sensibilidad de las franjas de interferencia cuando reaccionan a pequeños cambios en alguna longitud de onda, con lo que puede hacerse una

medición de alguna variable física de interés. Sin embargo, frecuentemente desde la fabricación del sensor, es necesario equipo voluminoso y costoso, que no es tan fácil tener en un laboratorio o usarlo en campo para hacer registro de mediciones. Desde hace más de una década, el desarrollo y estudio de fibras ópticas plásticas es una constante, debido a que se pueden desarrollar dispositivos más económicos, cuyos equipos y elementos del sistema óptico, suelen ser compatibles con las características de la fibra óptica, además de ser pequeños y livianos, siempre que se requieran sensores sencillos y de corto alcance, es decir, de menos de 100Km. En la literatura se encuentran trabajos en los cuales para hacer un sensor con este tipo de fibra óptica se aplica un desbaste diametral a la FOP. Se usa el denominado corte o desbaste en D, con el cual se han hecho sensores de diferentes tipos. El otro es el desbaste mecánico en V, del cual también se han hecho sensores, usando varios cortes en serie. [1-6] Estos desbastes logran sacar parte del campo evanescente al medio circundante de la fibra y con esto se facilita el perturbar el campo electromagnético, causando variaciones en la luz. Esto conlleva a obtener a un dispositivo con el cual se puede medir una variable física deseable como temperatura, fuerza, tensión, etc.

En este trabajo se presenta, de forma preliminar, un sensor de fibra óptica plástica de 1mm de diámetro para medir cambios de fuerza en un rango de 0 a 500N, en donde se observan y miden cambios espectrales del pico de potencia como respuesta a variaciones de la fuerza aplicada sobre la POF con estructura de lazo, y con cortes longitudinales en V y D, además de estar unida a un acoplador del mismo tipo de FOP.

TEORÍA

Los acopladores se clasifican en componentes pasivos y activos. Como componentes pasivos se dividen en tres categorías principales basadas en las tecnologías utilizadas para producirlos: óptica integrada, micro-óptica y dispositivos todo-fibra. Los dispositivos todo-fibra ofrecen un alto rendimiento en aplicaciones donde se requieren bajas pérdidas por inserción, alta directividad y gran flexibilidad. Además de que están fabricados solo con fibra óptica, se pueden integrar fácilmente a redes o sistemas de fibra óptica de forma lineal y su uso resulta muy efectivo en cuanto a costos. Estos dispositivos son muy conocidos por dividir la luz en redes pasivas, multiplexado y demultiplaxado, filtrado, polarización, etc. Los acopladores de fibra óptica o divisores son dispositivos de fibra óptica especial con una o más entradas de fibra óptica para distribuir las señales ópticas a dos o más salidas del mismo dispositivo. La energía óptica de divide de forma pasiva en múltiples señales de salida, en donde cada una contiene luz con propiedades idénticas a la de la entrada, pero con amplitud reducida. Debido a que el acoplador es del tipo pasivo, este es inmune a la interferencia electromagnética, no consume energía eléctrica e idealmente no le agrega ruido al sistema óptico. Se basa en un diseño bidireccional y su operación no depende de la longitud de onda, y solo queda limitado únicamente por las propiedades físicas del núcleo de fibra de PMMA.

Estos dispositivos tienen diversas configuraciones de entrada y salida definidas como M X N. M es el número de puertos de entrada, los cuales pueden ser ≥ 1. N es el número de puertos de salidas y es siempre ≥ M. En múltiples entradas, las señales de salida pueden combinarse por lo cual, este tipo de dispositivos se consideran también como combinadores. Se utilizan frecuentemente en circuitos de control retroalimentado, como sensores ópticos, multiplexado en longitud de onda, ethernet, electrónica automotriz, sistemas de comunicación y audio, figura 1.

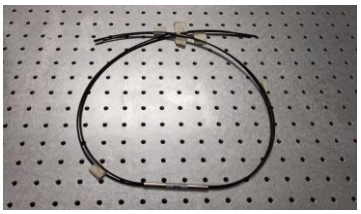


Figura 1. Acoplador de Fibra Óptica Plástica de 1mm de diámetro.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron muestras de 10 cm fibra óptica plástica (FOP) de 1mm de diámetro. A cada muestra se le aplico un desbaste mecánico en el centro a profundidades del 30 y 50% para obtener un ranurado parcial y permanente en el diámetro de la FOP a manera de ver una D o V formada en su estructura, como lo han reportado otros grupos de investigación [1-5]. En el esquema experimental se usa un láser He-Ne de 5mW a 632 nm, cuyo haz de luz se introduce a un acoplador FOP de factor de acoplamiento de 50:50 y 2x2 puertos por medio de un objetivo 40X. El lazo de fibra se conecta al acoplador y se aplica fuerza la cual se mide con un instrumento digital acoplado a un mecanismo que ayuda a emplear fuerza de forma manual y gradual como se muestra en la figura 2. Para asegurar un acoplamiento eficiente se colocó en la línea del esquema un polarizador a 60˚ entre la fuente laser y la FOP buscando que se generaran las menos pérdidas posibles.

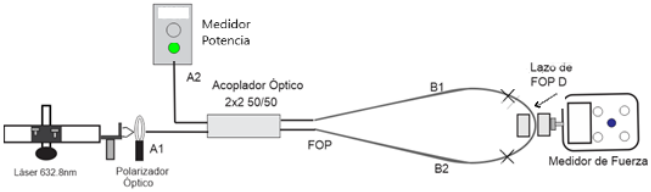


Figura 2. Esquema experimental utilizado para medir fuerza.

En las primeras pruebas se usó un medidor de potencia Modelo 843-R de Newport para observar los cambios en la intensidad de la luz y poder hacer ajustes como en las uniones, los cortes y además de limpieza de las puntas de la FOP. Después se cambió el medidor de potencia por un analizador de espectros ópticos modelo HR4000CG-UV-NIR marca Ocean Optics para observar los cambios en el espectro que se producían al aplicar presión de forma gradual en los lazos con desbaste como muestra la figura 3. Las mediciones se registran cada 10N de fuerza aplicados sobre la FOP.

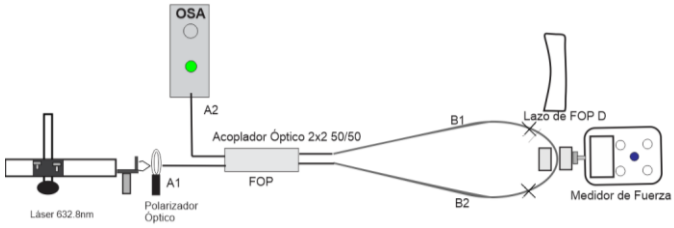


Figura 3. Esquema experimental usado para registrar cambios espectrales.

RESULTADOS

Los primeros resultados de las pruebas del lazo sin desbaste no mostraron cambios significativos en la intensidad medida en el puerto A2 del acoplador ni en el ancho del espectro. Sin embargo, el introducir y ajustar un polarizador a 60˚, aportó información interesante en el ancho espectral observado al variar la fuerza aplicada en el lazo de la FOP, lo que motivo a colocar y probar el lazo con la fibra desbastada.

El mejor resultado de las pruebas con desbaste en D y V al 30% y 50%, se detectó en el espectro logrado con la profundidad de desbaste al 30% y el corte en D. Inicialmente se midió un ancho espectral de 12.5nm en 0N, quedando en 5.4nm al aplicar 500N al terminar las pruebas. Comparando con la FOP en D al 50% de desbaste del diámetro, se observó un ancho espectral de 8.2nm en 0N, quedando de 4.6 nm al terminar de aplicar la fuerza en 500N. Se puede observar el registro de las variaciones espectrales en la gráfica con lo que se obtuvo una sensibilidad de 14.2 pm/N. Se observa que conforme se aplica la fuerza de forma gradual, la respuesta espectral tiende a estrecharse con

una tendencia lineal. En este trabajo las mediciones se hicieron solamente para fuerza en un rango de 0-500N. Figura 4.

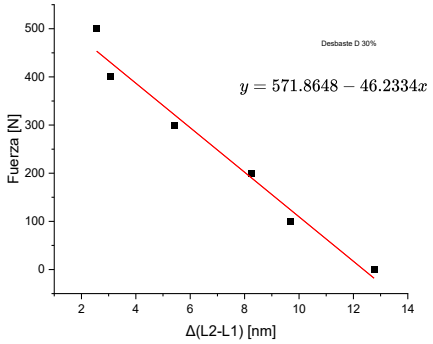


Figura 4. Reducción del espectro en un rango de 0 a 500N.

La siguiente tabla resume los resultados cuantitativos del experimento

Desbaste Tipo	**% Profundidad**	**Ancho Espectral (nm)** **0**N **500**N		Variación **(nm)**
V	30	1.3	1.1	0.2
	50	4.1	3.3	0.8
D	30	12.5	5.4	7.1
	50	8.2	4.6	3.6
s/d	ninguna	12.5	10.9	1.6

Tabla 1. Mediciones del espectro.

CONCLUSIONES

La fuerza gradual aplicada induce en el material PMMA un cambio de índice de refracción por compresión lo que conlleva a modificar relativamente la transmitancia. Las muestras con corte en D son más susceptibles a la fuerza aplicada, por lo que el ancho espectral se estrecha más, esto debido a que se tiene un área de mayor contacto con el material de compresión el cual es de aluminio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ning Jing, Jie Zheng, Xiaowei Zhao, and Chuanxin Teng. Sensing based on a bide-polished macrobending plastic optical fiber. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 5, 2015, pp. 5665 – 5669.
2. Paulo Antunes, João Dias, Tiago Paixão, Esequiel Mesquita, Humberto Varum, Paulo André. Liquid level gauge based in plastic optical fiber. Measurement, 66, 2015, pp. 238–243.
3. Arnaldo G. Leal-Junior, Carlos Marques, Anselmo Frizera, Member, IEEE, and Maria José Pontes. Dynamic Mechanical Analysis on a PolyMethyl Methacrylate (PMMA) Polymer Optical Fiber. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 18, NO. 6, 2018, pp. 2353 – 2361.
4. Yanjun HU, Abdul GHAFFAR, Yulong HOU, Wenyi LIU*, Fei LI, and Jun WANG. A Microstructure POF relative humidity sensor modified with agarose based on surface plasmon resonance and evanescent wave loss. *Photonic Sens* 11, 2021, pp. 392–401.

5. Nunzio Cennamo, Maria Pesavento, Luigi Zeni. A review on simple and highly sensitive plastic optical fiber probes for bio-chemical sensing. Sensors & Actuators: B. Chemical 331, 2021, Vol. 129393, pp. 1-9.
6. Lian Liu , JieZheng ,ShijieDeng, LiboYuan , and Chuanxin Teng. Parallel polished plastic optical fiber-based SPR Sensor for simultaneous measurement of RI and temperature. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 70, 2021, pp. 1-8

BIORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS POR BACTERIAS EXTRAÍDAS DE BIOSÓLIDOS DE AGUAS RESIDUALES

Verónica Machorro Sánchez, Odilón Vázquez Cuchillo, Luis Ricardo Morales Juárez, Marco Antonio Meraz Melo, Martha Alvarado Arellano y Martha Patricia Pacheco Espejel.

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Puebla. Av. Tecnológico 420, Col. Maravillas, Puebla, Puebla. 72220. Laboratorio de Posgrado.
veronica.machorro@puebla.tecnm.mx

RESUMEN

Los metales de la serie d transición cuentan con el orbital d en su configuración electrónica y esto les permite tener diversos estados de oxidación. Por su capacidad de oxido-reducción son muy utilizados en la industria de manufactura, textil y producción de plásticos. Al término del proceso industrial son desechados, causando un alto impacto ambiental. La toxicidad y reactividad que presentan estos metales se relaciona con el incremento en el estado de oxidación, derivado de los procesos industriales. Al combinarse con otros compuestos el estado de oxidación cambia y puede elevar su toxicidad. El objetivo de esta investigación es biotransformar el estado de oxidación de cromo por medio de bacterias aisladas de biosólidos de aguas residuales. La metodología llevada a cabo consta de: 1) activar bacterias de biosólidos; 2) aislar y crecer bacterias; 3) preparar solución madre de $K_2Cr_2O_7$; 4) realizar diluciones de solución madre a concentraciones de 10ppm, 20ppm y 30 ppm; 5) colocar en 100 ml de agar liquido una determina concentración de $K_2Cr_2O_7$ e inocular con bacterias. Después de 72 horas con una temperatura de 20 ^{0}C, se observó a nivel macroscópico precipitación y transparencia, lo cual indica que el microrganismo biotransformo el estado de oxidación de Cr^{+6} a Cr^{+3}. El tiempo de biodegradación fue aproximadamente el mismo para las tres concentraciones. La ventaja del uso de bacterias es que éstas pueden acumular o metabolizar metales pesados sin ocasionarle daño al medio ambiente como ocurriría con productos químicos, por lo cual son útiles para limpiar ambientes contaminados y reducir el grado de toxicidad causante de enfermedades cancerígenas. Posteriormente, se pretende probar con otros metales de transición e ir escalando el experimento.

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son contaminantes tóxicos que han sido liberados al ambiente como resultado de actividades humanas desde la revolución industrial Estos elementos químicos, con propiedades metálicas como conductividad y densidad, presentan riesgos para los ecosistemas y la salud humana (Beltrán y Gómez, 2016). Aunque son necesarios para el desarrollo de organismos vivos en cantidades adecuadas, su acumulación en altas concentraciones puede resultar en efectos citotóxicos y letales. En este trabajo se explora el uso de metabolismo microbiano para reducir el estado de oxidación de cromo (VI) a cromo (III), utilizando soluciones de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) a nivel laboratorio.

TEORÍA

El término “metales de transición” se refiere a los metales de transición *d*, se ubican entre los grupos 2 A y 3 A de la tabla periódica. En sentido estricto, un metal de transición *d* debe tener parcialmente ocupada la serie de orbitales *d*. Algunas de sus propiedades generales de los metales de transición son: 1) sus iones y compuestos suelen tener color, 2) forman iones complejos, 3) exhiben varios estados de oxidación, 4) muchos son paramagnéticos, 5) son catalizadores eficaces.

La mayoría de los metales de transición tienen más de un estado de oxidación diferente de cero. Particularmente, el cromo presenta +2, +3 y +6 estados de oxidación, siendo el estado de oxidación +3 el más estable (Figura 1). Las especies de cromo (VI) son agentes oxidantes. Las soluciones básicas que contienen iones cromato, CrO_4^{-2}, son oxidantes débiles. Su acidificación produce el ion dicromato, $Cr_2O_7^{-2}$, y oxido de cromo (VI), ambos agentes oxidantes fuertes (Whitten *et al*, 2015).

Figura 1. Distribución electrónica del metal cromo (Cr).

Derivado a que el cromo (VI) es una especie fuertemente oxidante, es frecuentemente utilizado en la industria de manufactura, textil y producción de plásticos. Al término del proceso industrial los residuos que contienen especies de cromo (VI) son desechados al drenaje, causando un alto impacto ambiental. La toxicidad y reactividad que presentan estos metales se relaciona con el incremento en el estado de oxidación. Al combinarse con otros compuestos u especies, el estado de oxidación cambia y puede elevar su toxicidad.

De acuerdo con Beltrán y Gómez (2016), las estrategias de remediación basadas en procesos microbianos (micro remediación) pueden minimizar la toxicidad y la biodisponibilidad de los metales pesados. Los microorganismos juegan un rol vital en la transformación de elementos traza incluidos los metales ya que influencian su biodisponibilidad y remediación, pueden alterar la toxicidad, solubilidad en agua y la movilidad del elemento. Los microorganismos modifican la concentración de metales pesados en el ambiente, pues estos cuentan con mecanismos enzimáticos y no enzimáticos para remover metales en solución. La capacidad de remoción de metales por bacterias, microalgas y hongos es superior a la reportada con métodos fisicoquímicos convencionales, también se conoce que la adquisición y remoción de los metales pesados puede ser selectiva teniendo en cuenta la capacidad metabólica de cada especie biorremediadora y el tipo de metal (Hernández *et al*, 2018).

La reducción del Cr (VI) por bacterias, puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas y puede estar asociada a la fracción soluble o a la membrana celular. Por consiguiente, la reducción extracelular o periplásmica de Cr (VI) a Cr (III), que genera un compuesto impermeable y no tóxico a nivel extracelular, puede ser considerada como un mecanismo de resistencia a cromato. En bacterias, los mecanismos de resistencia a cromato pueden ser codificados por genes plasmídicos o cromosómicos. Los sistemas de resistencia codificados en el cromosoma se han relacionado generalmente con la reducción extracelular del Cr (VI) a Cr (III), tanto por enzimas específicas como no específicas. En la figura 2, se muestra el transporte y toxicidad del cromato en la célula bacteriana. A) Captación del Cr (VI) [(CrO_4^{-2})] a través del sistema de transporte del sulfato (SO_4^{-2}). B) Las membranas biológicas son impermeables al Cr (III), por lo que éste resulta inocuo extracelularmente. C) Reducción intracelular de Cr (VI) a Cr (III). D) Estrés oxidativo causado por la generación de especies reactivas de oxígeno como consecuencia de la reducción de Cr (VI). E) Daño ocasionado por la interacción del Cr (III) con las proteínas o F) con el DNA (Ramírez *et al*, (2009).

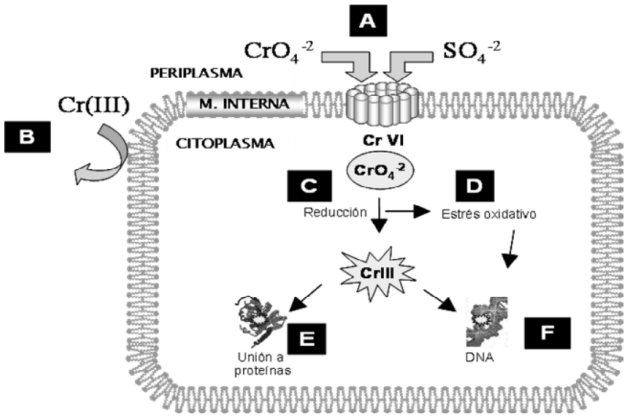


Figura 2. Transporte y toxicidad del cromato en la célula bacteriana. Imagen tomada de Ramírez et al, 2009.

PARTE EXPERIMENTAL

Aislamiento microbiano

En un matraz Erlenmeyer se preparan 100 ml de agar nutritivo y se preparan cajas Petri con agar bacteriológico. Posteriormente, se activan bacterias, para lo cual, en un tubo de ensayo se agrega 1g de biosólido proveniente de aguas residuales y 10ml de solución de cloruro de sodio al 0.9%, se mezcla en Vortex por 2 minutos (Figura 3a), después de 5 minutos se toman 100 microlitros de sobrenadante y se depositan en el matraz Erlenmeyer que contiene agar nutritivo, en el caso de las cajas Petri, con un asa bacteriológica se toma sobrenadante y se siembran los microorganismos (Figura 3b). Después de 48 horas a 20°C, se observó crecimiento bacteriano.

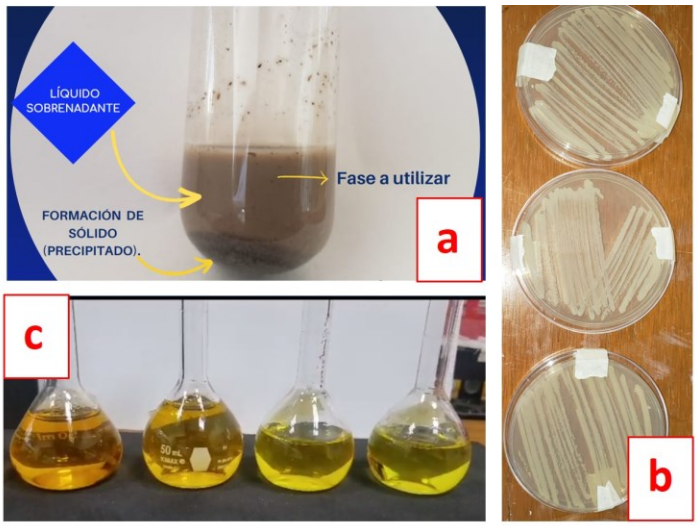


Figura 3. a) Biosólido b) Bacterias aisladas, c) Solución madre y diluciones de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).

Prueba de resistencia y crecimiento de bacterias en $K_2Cr_2O_7$

Se determino resistencia y crecimiento de bacterias a las 72 horas a 20 °C en soluciones que contienen Cr^{+6} hexavalente, utilizando agar nutritivo con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), se examinaron tres concentraciones de Cr (VI) de 10, 20 y 30 ppm (Figura 1c).

RESULTADOS

Después de 72 horas con una temperatura de 20 ^{0}C, se obtuvo crecimiento bacteriano (Figura 4), observando a nivel macroscópico precipitación y transparencia (Figura 5), lo cual indica que el microrganismo biotransformo el estado de oxidación de Cr^{+6} a Cr^{+3} (reducción). El tiempo de biodegradación fue aproximadamente igual para las tres concentraciones visualizando el mismo comportamiento.

Figura 4. Crecimiento de bacterias en disolución de $K_2Cr_2O_7$.

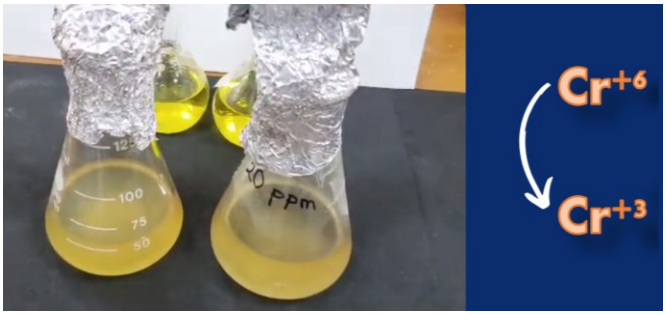


Figura 5. Precipitación y transparencia en medio de cultivo con $K_2Cr_2O_7$

CONCLUSIONES

La ventaja del uso de bacterias es que éstas pueden acumular o metabolizar metales pesados sin ocasionarle daño al medio ambiente como ocurriría con productos químicos, por lo cual son útiles para limpiar ambientes contaminados y reducir el grado de toxicidad causante de enfermedades cancerígenas. Posteriormente, se pretende: 1) realizar pruebas de espectroscopia UV Visible, 2) usar bacterias aisladas de biosólidos en la biotransformación de diferentes metales pesados e ir escalando el experimento.

AGRADECIMIENTOS

Instituto Tecnológico de Puebla. Laboratorio de Posgrado

BIBLIOGRAFÍA

[1] Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, *12*(2), 172–197. https://doi.org/10.18359/rfcb.2027

[2] CU Emenike , B. Jayanthi , P. Agamuthu y SH Fauziah. (2018). Biotransformación y eliminación de metales pesados: una revisión de la evaluación de la fitorremediación y la

remediación microbiana en suelos contaminados. Revisiones ambientales. 26 (2): 156-168. https://doi.org/10.1139/er-2017-0045

[3] Hernández-Peña, C & Lares-Villa, Fernando & de los Santos-Villalobos, Sergio & Estrada Alvarado, Maria & Luna, M & Flores Tavizón, Edith & Solís, Sergio & Domínguez-Acosta, Miguel & Soto-Padilla, M & Yadira, Marisela & Soto Padilla, Marisela. (2018). REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE Y DEGRADACIÓN DE ROJO DE METILO POR BACTERIAS AISLADAS DE SEDIMENTOS DEL LAGO DE CHAPALA, MÉXICO HEXAVALENT CHROMIUM REDUCTION AND METHYL RED DEGRADATION BY SEDIMENT ISOLATED BACTERIA FROM THE CHAPALA LAKE, MÉXICO. https://www.researchgate.net/publication/312318722_Reduccion_bacteriana_de_cromo_hexavalente_mecanismos_y_aplicaciones

[4] Whitten, K. W., Davis, R. E., Peck, M. L. & Stanley, G. G. (2015). *Química (10ª edición)*. México D.F. Cengage Learning.

EXTRACCIÓN DE CELULOSA A PARTIR DE CÁSCARA DE PAPAYA

Isaura Felix-Serrano, Dámaso Navarro-Rodríguez, Leticia Larios-López, Rosa J. Rodríguez González y Maricela García-Zamora

Centro de Investigación en Química Aplicada
isaura.felix.pd@ciqa.edu.mx

RESUMEN

La papaya (*Carica Papaya*) es un fruto tropical consumido en la mayor parte del mundo por sus propiedades alimentarias, nutricionales y medicinales. Se reporta que la producción mundial de papaya en el año 2022 fue de 13.8 millones de toneladas métricas. Esto implica la generación de una gran cantidad de residuos o cascará de papaya, biomasa orgánica que podría ser una buena opción para obtener productos de valor agregado cambiando el modelo lineal de gestión de residuos por un modelo de economía circular. Investigaciones recientes muestran que, en promedio, la cáscara de papaya representa el 12 % del peso total de la fruta y, un análisis químico muestra un contenido de 11.7 % de proteínas, 32.5 % de fibra, 47.3 % de carbohidratos, 6 % cenizas y 2.5 % de grasas[1]. Por otro lado, se sabe que sólo el 7 % de las fibras utilizadas en las diferentes industrias provienen de fuentes no madederas como son gabazo de caña, cascarilla de arroz, trigo, etc. El presente trabajo muestra la metodología para la obtención y cuantificación de fibras obtenidas a partir de cáscara de papaya. La biomasa de papaya fue secada, molida y tamizada para posteriormente ser deslignificada en medio básico, finalmente al material se le realizó un blanqueamiento con hipoclorito de sodio. En cada etapa del procedimiento la celulosa fue caracterizada por espectroscopia infrarroja de transformadas de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados indican la obtención de material celulósico blanco de aspecto físico esponjoso, estable a temperatura ≤ 200 °C con picos de difracción característicos de celulosa de tipo I y con un grado de cristalinidad de 23 a 31 % y presentando una morfología fibro-laminar. La fibra de papaya tiene muchas aplicaciones[2] y tiene potencial aplicación como material de relleno y refuerzo en sistemas poliméricos utilizados en la industria médica, automotriz y agrícola.

INTRODUCCIÓN

La celulosa es el polímero más abundante en la tierra, es producida por las plantas, microrganismo y sistemas in vitro “cell-free systems”. Químicamente la celulosa es una macromolécula constituida por unidades repetitivas de β-d-glucosa unidas por un enlace glucosídico β-(1,4). La morfología de la celulosa generalmentes es fibrosa con cristales intercalados y zonas amorfas. La separación de las fibras da como resultado, celulosa a nanoescala, conocida como nanocelulosa la cual existe en diferente morfología, nanocristales de celulosa (CNCs) o “nanowhiskers” (CNWs) y nanofibras de celulosa (CNF). La nanocelulosa ha sido ampliamente estudiada por sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas, biológicas, además de ser una fibra tridimensional reticulada en forma de red presenta alta cristalinidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad, trasparencia óptica, polifuncionalidad, hidrfilicidad y moldeabilidad en estructuras 3D. La nanocelulosa o compositos de celulosa han sido ampliamente estudiados y empleados en la industria textil, cosmética, medica, en energía, optoelectrónica, biorremediación ambiental, etc. Como material sustentable la nanocelulosa es un material que puede ser obtenidos de la desintegración de biomasa como las cascaras de frutas. Es por ello, que el presente trabajo muestra la obtención de nanocelulosa a partir de cáscara de papaya, generando una opción para obtener productos de valor agregado cambiando el modelo lineal de gestión de residuos por un modelo de economía circular.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

Cáscara de papaya obtenida de fruta madura y fresca (negocio TNT jugos y licuados). NaOH, H_2SO_4, hipoclorito de sodio.

Deslignificación (sB)
Pesar 500 kg de cáscara de papaya previamente seca y cortada en piezas de aproximadamente 1 cm. El proceso de deslignificación de llevo a cabo en medio básico, colocar 1.5 L de solución 5M de NaOH, dejar en agitación constante por 2 h a 80 °C. Dejar que el sistema alcance la temperatura ambiente y filtrar, realizar lavados con agua destilada hasta pH neutro. El material fue secado en un leofilizador por 3 días.

Blanqueamiento (B)

En un vaso de precipitados de 2 L, colocar 500 g de cascara de papaya deslignificada, adicionar 17 % p/v de hipoclorito de sodio al 3 %. Dejar a 80 °C por 4 h con agitación constante. Trascurrido el tiempo del proceso filtrar y lavar con agua destilada. Secar a 40 °C por tres días en atmosfera reducida.

Lavado con solventes (Bs)

El material deslignificado, blanqueado y seco se dejó en agitación por 30 mn a temperatura ambiente en cloroformo Transcurrido el tiempo mencionado proceder a filtrar y secar a 40 °C por 2 h. Realizar el mismo procedimiento con acetona.

Hidrolisis (BsH)

En un vaso de precipitados de 1 L colocar 300 g de material Bs, colocar H_2SO_4 al 60 % p/p con respecto a la muestra. Dejar en agitación constante a 45 °C por 60 min. Lavar la celulosa con agua destilada hasta pH neutro, secar a 40 °C en atmosfera reducida por dos 48 h.

Molienda y tamizado (BsHM)

Colocar 1 g de material en un contenedor de Ziconia cerrar y programar la molienda por 30 mn a 1500 rpm, posteriormente, tamizar el material a 58 micras.

Determinación de índice de cristalinidad

La determinación del índice o grado de cristalinidad se llevo a cabo mediante

$$\boldsymbol{CrI}\ (\%) = \mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{I_{Am}}}{\boldsymbol{I_{002}}}$$

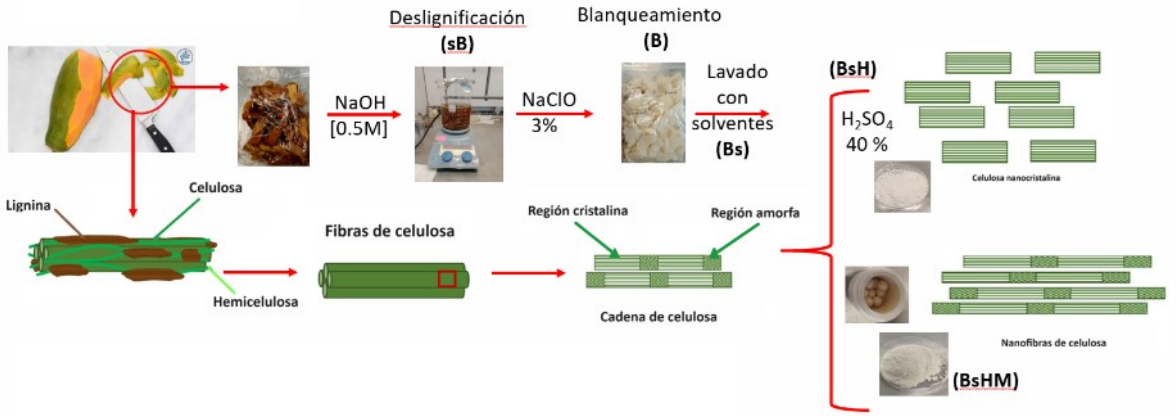
$_{(\%)}$= Grado de cristalinidad en %
I_{Am}= Intensidad máxima del pico amorfo en 16 °
I_{002}= Intensidad máxima del pico cristalino en 22 °

Instrumentación

Los grupos químicos característicos de las celulosas se estudiaron por espectroscopía infrarra de transformada de Fourier (FT-IR) haciendo un barrido de 4000 y 500 cm^{-1}. El FT-IR utilizado fue un Thermo-Nicolet (Magna 550). La estabilidad térmica de los compuestos se determinó en un analizador termogravimétrico (TGA 951 de DuPont Instruments) conectado a un vector de gas de N2, calentando de 30 a 700 °C a 10 °C min^{-1}. Los estructura cristalina se determinó a partir de los patrones de difracción de rayos X registrados a temperatura ambiente, utilizando un difractómetro de rayos X marca Rigaku ultima IV. Para los analisis de microscopia electronica de barrido, se empleo un equipo marca JEOL JCM-6000 a 15 KV. Para la molienda del materal se utilizó un contenedor de zirconia y un molino de bolas Spex Mixcel Mill 8000M.

RESULTADOS

La metodología que se plantea para la obtención de celulosa a partir de cáscara de papaya es mostrada en el Esquema 1. Se muestran los procesos que se siguieron desde la obtención de la cáscara hasta el proceso de molienda y tamizado de la celulosa. Durante el secado de la cáscara de papaya se pierde un 36 % en peso de agua. Posteriormente, durante el proceso de deslignificación en promedio se pierde un 30 % en peso de la muestra, obteniéndose un sólido de color café posteriormente durante el blanqueamiento se obtiene un material sólido blanco y esponjoso que se hidrata fácilmente. Este material esponjoso durante el proceso de hidrolisis ácida se compacta dando como resultado un material blanco y duro. El proceso de molienda y tamizado se realizo por 30 min en un molino de bolas de zirconio y un tamiz de 58 micras.



Esquema 1. Metodología establecida para obtener celulosa a partir de cáscara de papaya.

En cada uno de los procedimientos se realizó un seguimiento de su composición y morfología. La caracterización química de la cáscara de papaya en los diferentes procesos para obtener celulosa se llevó a cabo por espectroscopia infrarroja de transformadas de Fourier (FTIR). Los espectros FT-IR (de 4000 a 500 cm^{-1}) de las celulosas en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM), se muestran en la Figura 1. Los espectros FTIR de la cáscara de papaya en los diferentes procesos muestran bandas correspondientes a los grupos funcionales que componen la celulosa. Los espectros FTIR de las celulosas, sB, B y Bs muestras de manera general las mismas bandas una banda ancha correspondiente al estiramiento de tensión del grupo OH en 3334 cm^{-1}, dos bandas en 2918 y 2850 o una banda ancha centrada en 2898 cm^{-1} características del estiramiento simétrico y asimétrico de C-H, dos bandas en 1414 y 1315 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de flexión de los enlaces

C-H de los grupos CH y CH_2, finalmente en los tres espectros se puede observar una banda amplia y grande en 1021 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de los enlaces C-O-C (*v* C-O-C).

Por otro lado, comparando los espectros de Bs y BsH, en zona hulla digital se observa una banda en 1609 cm^{-1} correspondiente al estiramiento de tensión del ion enolato que se desplaza 14 cm^{-1} a mayor número de onda (1623 cm^{-1}).De igual manera, en el espectro correspondiente a BsH se observa una banda en 1724 cm^{-1}, características del estiramiento de tensión del grupo C=O lo que confirma que se llevó a cabo de manera satisfactoria una hidrolisis de la celulosa.

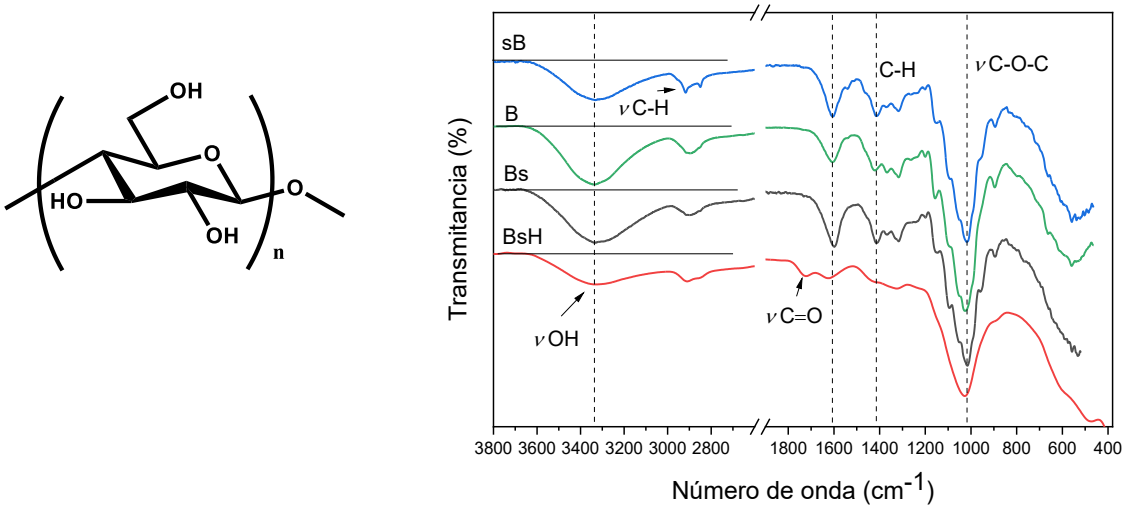


Figura 1. Izquierda, imagen de la estructura de la celulosa. Derecha, espectros FT-IR de la celulosa en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM).

Con la finalidad de completar la caracterización química de las celulosas en sus diferentes procesos se les realizó análisis térmogravimétrico**.** La caracterización por TGA se realizó para determinar su estabilidad térmica (Figura 2b). Los termogramas de los materiales muestran una primera etapa entre 35 a 150 °C atribuida a la perdida de humedad contenida en las muestras, siendo del 3 al 11% donde la muestra sometida a tratamiento ácido muestra el porcentaje menor de contenido de agua. En la figura 2b esta primera etapa se observa durante la formación de una curva entre 30 a 100 °C. Los materiales muestran la etapa de liberacion de volatiles ente 200 y 350 °C con esepción de BsH el cual muestra una curva ancha de 150 a 400 °C. Estos maetriales muestran una $T_{5\%}$ de 232 a 317, °C lo que podría estar sugiriendo que los cambios de masa en una segunda etapa podrian ser debidos a la degradaci{on termica de material lignocelulósico (hemicelulosa, celulosa y lignina)

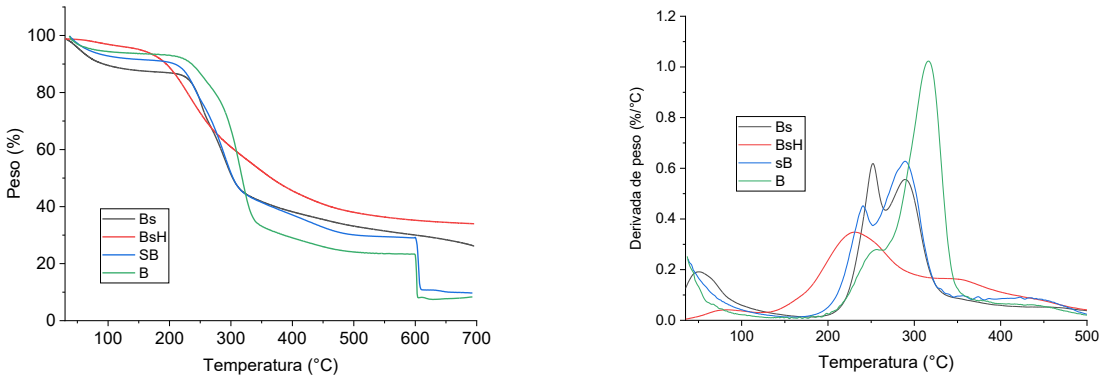


Figura 2. Izquierda, termogramas de TGA de materiales lignocelulósicos. Derecha, derivada de perdida en peso vs temperatura de celulosa en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM).

La caracterización morfológica de los materiales se estudió mediante la obtención de sus patrones de difracción de rayos X. Los patrones de difracción de rayos X de la celulosa en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM) son mostrados en la Figura 3. Los patrones muestran una serie de picos típicos de la cristalinidad de la celulosa tipo I. En los patrones de difracción de las celulosas se pueden observar picos centrados en 13 °16 ° y 35 ° 2θ indicando celulosa tipo I.

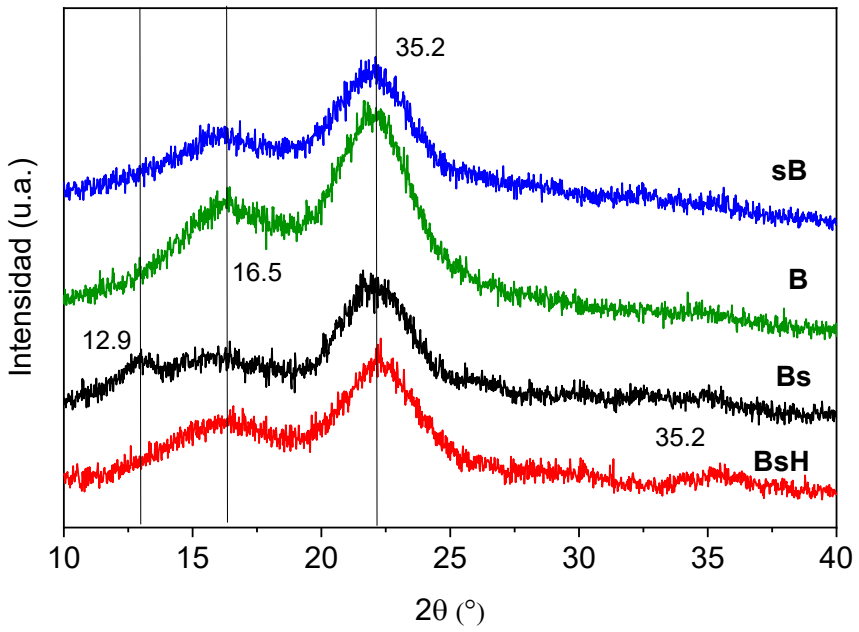


Figura 3. Patrones de difracción de Rayos-X de celulosa en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM)

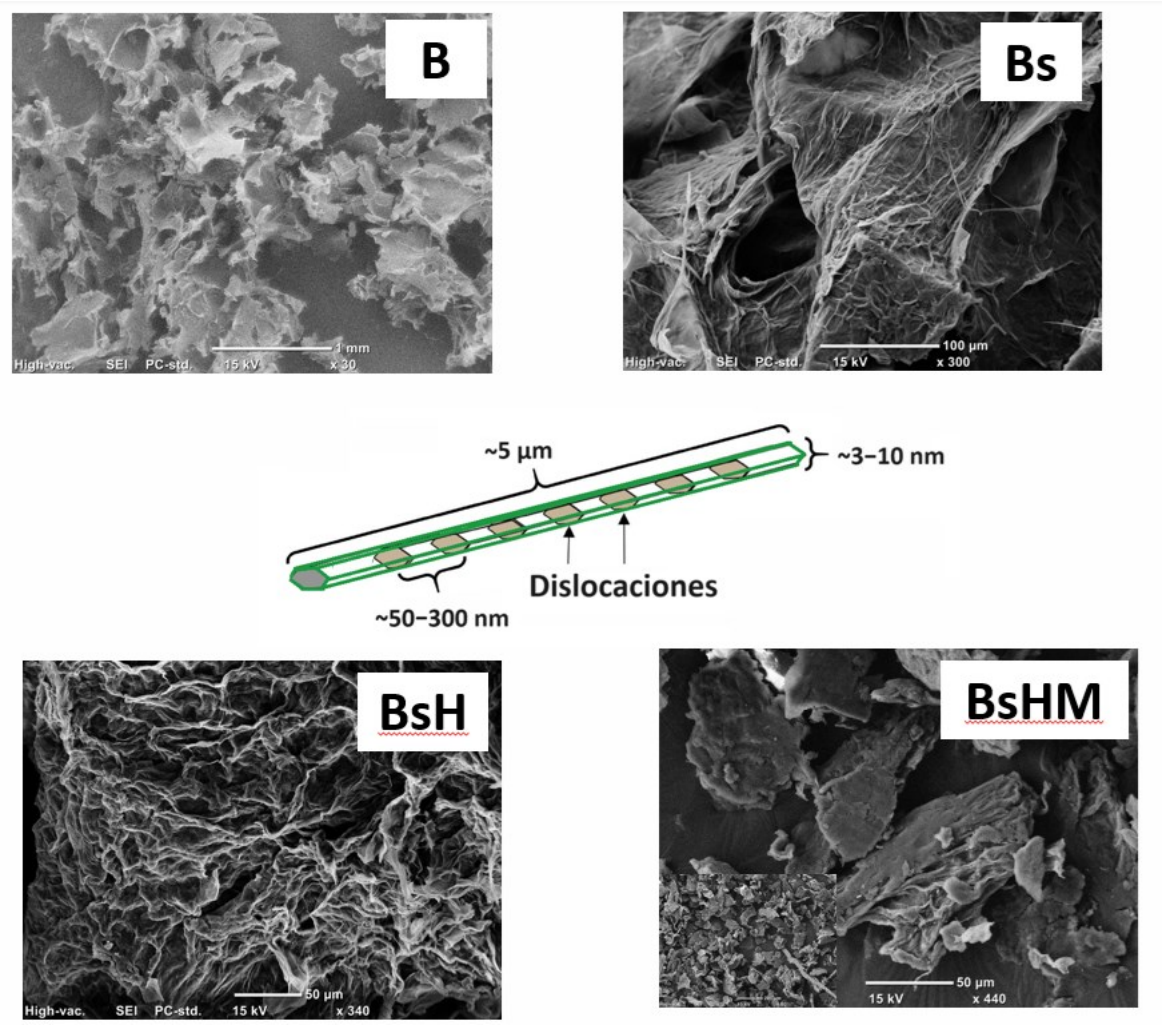


Figura 4. Micrografías de SEM de celulosa en el proceso de deslignificación (sB), blanqueamiento (B), lavado con solventes (Bs), hidrolisis ácida (BsH) y molienda (BsHM)

CONCLUSIONES

Se obtuvieron materiales celulósicos blancos de aspecto físico esponjoso y estables a temperatura ≤ 200 °C. La obtención de celulosa se comprobo por FTIR.
Las celulosas obtenidas no son solubles en diferentes solventes orgánicos.
Los materiales mostraron ser celulosa de tipo I y con un grado de cristalinidad de 23 a 31 %
Los materiales presentan una morfología fibro-laminar que durante la molienda se ve afectada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Martial-Didier et al. “Phytochemical Properties and Proximate Composition of Papaya (*Carica papaya* L. var solo 8) Peels”, Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 5(6), 2017, pp.676-680.
2. Pranav et al. “Waste to Wealth: A Case Study of Papaya Peel” Waste and Biomass Valorization, 10, 2019 pp.1755–1766

EFECTO DE LA ADICIÓN DE UN INHIBIDOR NATURAL ELABORADO A BASE DE HOJAS DE PIRUL SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE UN ACERO API 5L X65 EN AGUA CONGÉNITA

Fernando González Torres [a], Arturo Cervantes Tobón [a*], Manuela Díaz Cruz [a], Héctor Herrera Hernández [b], Antonieta García Murillo [c], Felipe de Jesús Carrillo Romo [c].

[a] Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.
[b] Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Valle de México, Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Industriales, Atizapán de Zaragoza, Estado de México, México.
[c] Instituto Politécnico Nacional-CIITEC Azc., Cerrada de Cecati s/n, Sta. Catarina, Azc., C.P. 02250, Ciudad de México, México.
arcervmx@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación está enfocada en estudiar el comportamiento electroquímico del efecto que tiene la adición de un inhibidor natural sobre la velocidad de corrosión de un acero API 5L X65 expuesto a un medio corrosivo (agua congénita) con un flujo de 18 litros/min en un modelo físico denominado cámara de impacto en el cual además se puede variar el ángulo de incidencia del fluido corrosivo para 90, 60 y 30°. El inhibidor se obtuvo a partir de hojas de un árbol llamado pirul, el cual se adicionó al medio corrosivo para observar el efecto de este con respecto a la velocidad de corrosión del acero antes mencionado, de manera adicional se determinó la velocidad de corrosión sin la presencia del inhibidor para poder observar posteriormente la eficiencia con la presencia del inhibidor natural en presencia de agua congénita.

La prueba electroquímica utilizada para determinar la velocidad de corrosión fue; la técnica de la Resistencia a la Polarización Lineal (RPL). Con esta técnica, se pudo observar para el acero API 5L X65 una disminución de la velocidad de corrosión de manera considerable en cada uno de los ángulos empleados en la investigación. Por otra parte, la caracterización de los productos de corrosión se llevó a cabo mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos x (DRX) donde se determinó que los principales productos de corrosión formados son principalmente sulfuros, óxidos y carbonatos, los cuales resultaron ser muy estables y adherentes capaces de brindar una protección adecuada para la superficie del acero en presencia del inhibidor empleado.

En términos generales se puede afirmar que es muy notable el efecto de la disminución de la velocidad de corrosión con el empleo de las hojas de pirul, por lo cual podrían ser utilizadas como un inhibidor natural en alguna aplicación futura para la industria del acero grado tubería para el transporte de hidrocarburos.

INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales metálicos facilita las condiciones actuales de vida para la mayoría de las personas. Se cree que se ha creado una dependencia tal, que sería prácticamente imposible hablar de desarrollo, avance y modernidad sin el uso de los materiales metálicos [1]. La mayoría de los materiales metálicos tiene una elevada susceptibilidad para corroerse.

Los metales tienden a deteriorarse por un proceso electroquímico, que puede iniciarse por la presencia de oxígeno, ya que este elemento favorece la oxidación superficial de los materiales y se encuentra presente prácticamente en cualquier ambiente terrestre: aire, agua o suelo, por lo que la corrosión de los metales es un proceso inevitable.

La intención de mitigar los procesos de corrosión ha propiciado la apertura y expansión de un tema relevante, en el intento de conservar y preservar los materiales metálicos, principalmente por los altos costos que supone el reemplazo total de piezas corroídas, así como para garantizar la seguridad en la prevención de accidentes, pues estos frecuentemente conllevan la pérdida de vidas humanas.

Entre las alternativas más empleadas para preservar la vida útil de los materiales metálicos se encuentra el uso de inhibidores de la corrosión. Un inhibidor de la corrosión es una sustancia que, agregada en pequeñas concentraciones en el medio corrosivo, disminuye o previene la reacción entre el metal y el medio, produciendo un cierto nivel de protección [2].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La preparación del inhibidor natural a partir de hojas de pirul se llevó a cabo mediante el procedimiento que se describe en la Figura 1.

Figura 1. Obtención de Inhibidores naturales.

Para llevar a cabo las pruebas electroquímicas para obtener la velocidad de corrosión del acero empleado en la presente investigación (acero API 5L X65) se elaboraron probetas rectangulares, las cuales fueron sometidas a un medio corrosivo en este caso se trata de agua congénita cuya composición se describe en la Tabla 1. Posteriormente se adicionan 200 ppm de inhibidor natural elaborado a partir de hojas de pirul y se obtienen los valores de la velocidad de corrosión, empleando un dispositivo denominado cámara de impacto el cual se muestra en la Figura 2.

Tabla 1. Composición del agua congénita.

Compuesto	Cantidad
Cl-	9952 mg
CO3	13.4 mg
SO4	20.7 mg
Ácido acético	1.89 ml
Aforar a un litro	

En la Figura 2, se observa además el arreglo de los cupones montados, en donde, el electrodo de Calomel saturado (KCl) hace la función de Electrodo de Referencia (ER), el acero API 5L X65 de Trabajo (ET) y la barra de grafito como Contra electrodo (CE).

Figura 2. Arreglo de electrodos dentro de la cámara de impacto (celda electroquímica).

Finalmente se llevó a cabo la caracterización de los productos de corrosión que se formaron en la superficie de las probetas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Metodología experimental para obtener la velocidad de corrosión y caracterización de los productos de corrosión.

RESULTADOS OBTENIDOS

La Figura 4 muestra la velocidad de corrosión para los diferentes ángulos utilizados para un caudal o flujo de 18 l/min empleando solamente agua congénita como medio corrosivo. De manera general se observa que la velocidad de corrosión se incrementa con respeto al tiempo para los tres ángulos utilizados, en un orden de 200 hasta 925 mpy (milipulgadas por año).

Es importante recalcar que en las primeras 5 horas, los 3 ángulos muestras un comportamiento muy similar, sin embargo, hasta ese tiempo el ángulo a 90º presenta la mayor velocidad de corrosión, pero después el ángulo de 60º muestra un incrementa considerablemente de la velocidad de corrosión y finalmente quien posee el mejor comportamiento es el de 30°.

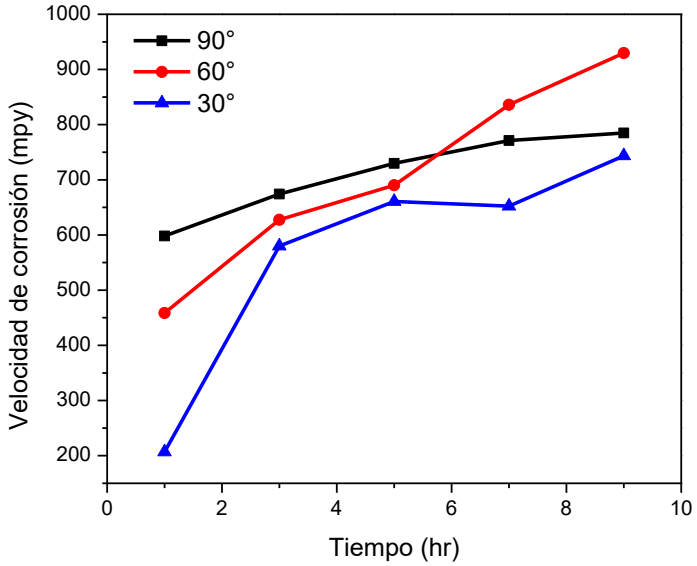


Figura 4. Velocidad de corrosión a un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita.

La Figura 5 muestra a detalle el comportamiento que tuvo el inhibidor (200 ppm) al ser adicionado al medio corrosivo en este caso agua congénita, para cada uno de los ángulos empleados en la presente investigación, observándose para todos los casos una disminución considerable de la velocidad de corrosión con respecto al tiempo, por lo que se podría considerar como altamente eficiente al inhibidor ya antes mencionado.

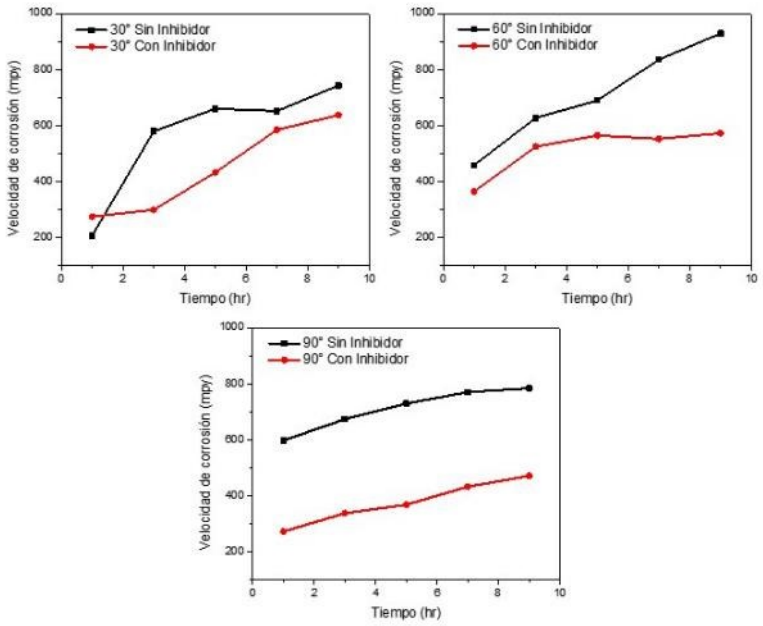


Figura 5. Gráfica de Velocidad de corrosión a un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita adicionada con 200 ppm de inhibidor natural elaborado con hojas de pirul.

La Figura 6 muestra los patrones de difracción, en los cuales se observa la presencia de la mackinawita (Fes) que de acuerdo a la literatura actúa como base precursora, así como el crecimiento por capas de los productos de corrosión, tales como: magemita cúbica (Fe_2O_3), magemita ortorrómbica (Fe_2O_3), magnetita cúbica (Fe_3O_4), marcasita ortorrómbica (FeS_2) y pirita cúbica (FeS_2). Estos productos son sulfuros de hierro reportados por Smith y Rickard [3,4].

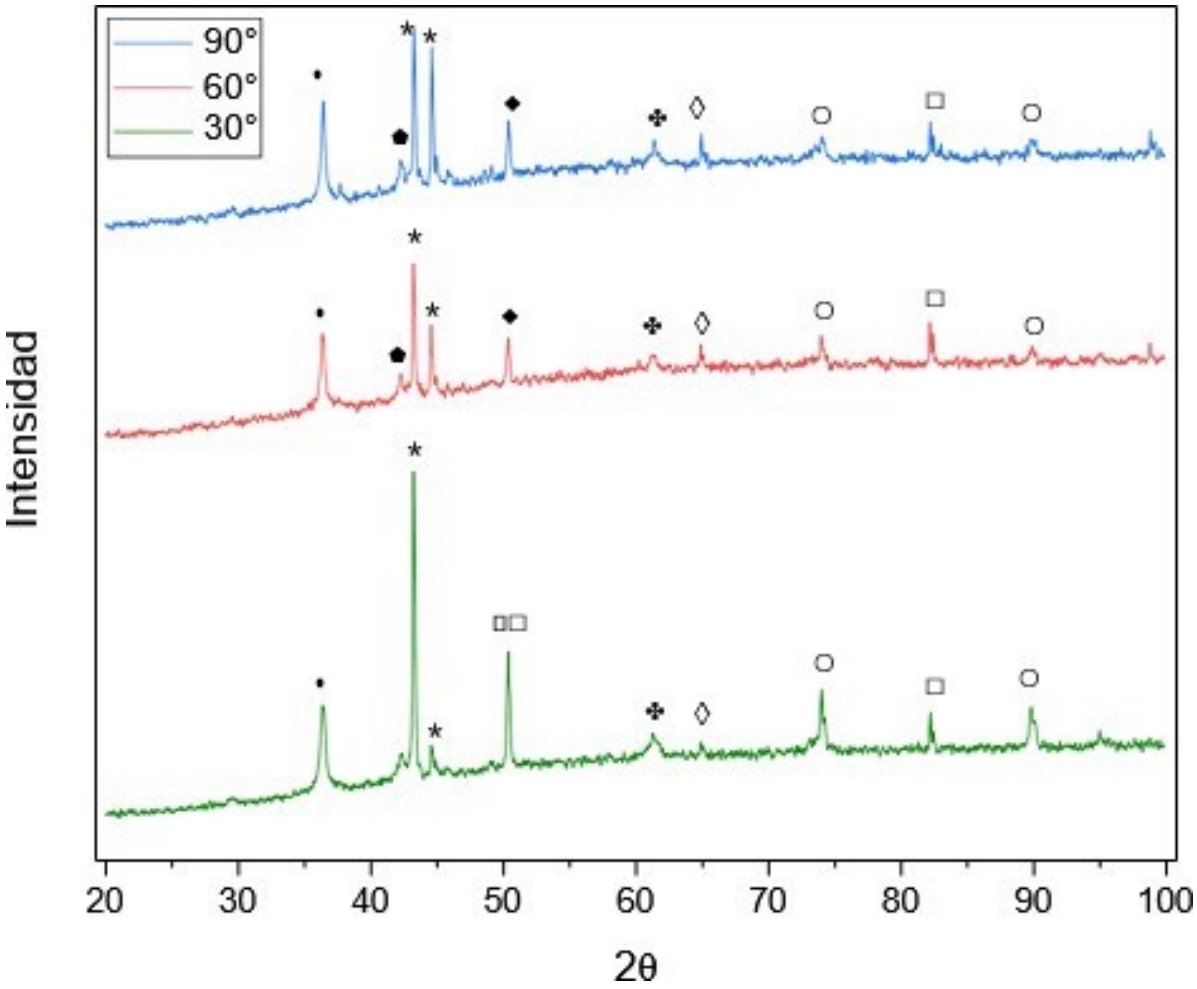


Figura 6. Patrones de Difracción a 90°, 60° y 30° expuestas a un flujo de 18 l/min en presencia solamente de agua congénita.

La Figura 7 muestra los patrones de difracción para un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita adicionada con 200 ppm de inhibidor natural elaborado a base de hojas de pirul, en donde se puede observar la presencia de algunas fases cristalinas que se forman en la superficie de los cupones del acero sin inhibidor pero en menor intensidad es decir hay una menor presencia, pero estos resultan ser mucho más estables y adherentes lo cual puede brindar una mayor protección del acero contra la corrosión siendo más notable para el ángulo de 30°.

Cabe hacer notar que para el ángulo de 30° se observa una mayor gama de productos de corrosión con respecto a los otros dos ángulos, destacando además una mayor intensidad y por ende una mayor cantidad de siderita y mackinawita los cuales de acuerdo a la literatura resultan ser protectores contra la corrosión en este caso en presencia de un medio agresivo como lo fue el agua congénita.

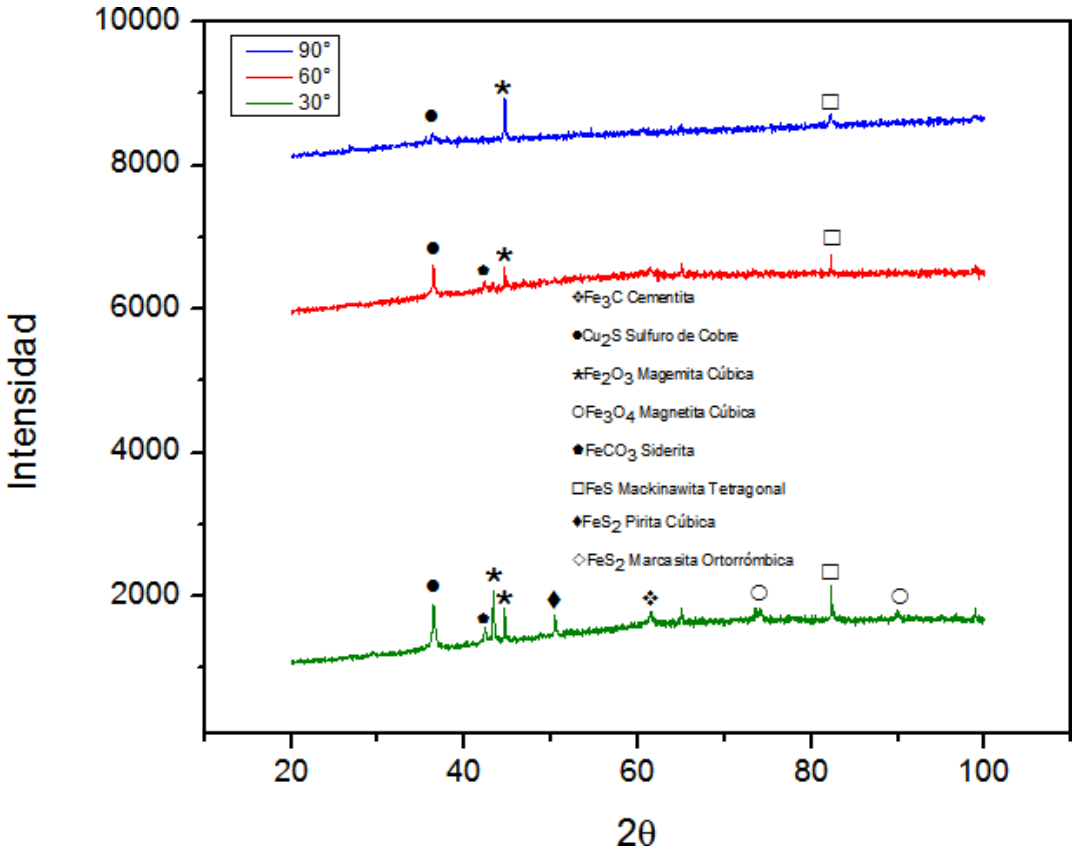


Figura 7. Patrones de Difracción de superficies a 90°, 60° y 30° expuestas a un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita adicionada con 200 ppm de inhibidor.

La Figura 8 (a) muestra la distribución de los productos de corrosión en la superficie del acero para un flujo de 18 l/min para para el ángulo de 30° que fue el que obtuvo el mejor comportamiento sin la adición del inhibidor y la (b) muestra los productos de corrosión con inhibidor, donde se observa el efecto del mismo el cual permite que se forme una capa mucho más uniforme aunque presenta un agrietamiento la velocidad de corrosión disminuye considerablemente, ambas imágenes fueron obtenidas a 1000 aumentos.

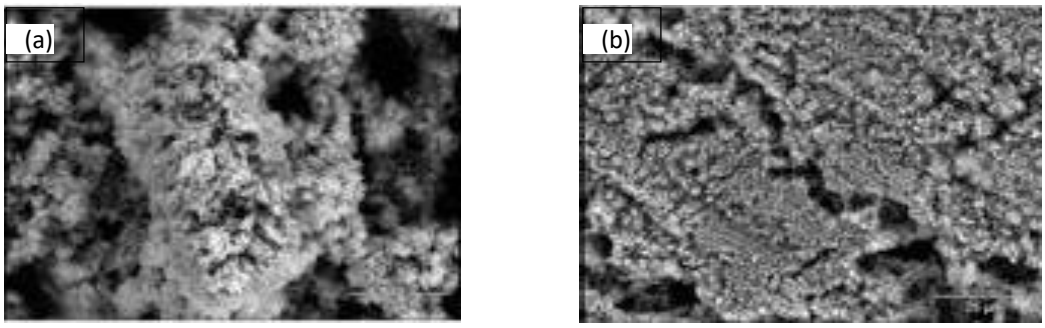


Figura 8. Micrografías de la superficie del acero a 30º expuestas a un flujo de 18 l/min (a) sin inhibidor y (b) con inhibidor natural elaborado con hojas de pirul.

CONCLUSIONES

1. Fue posible elaborar un inhibidor natural a base de hojas de pirul.
2. Conforme se agrega una cantidad de inhibidor (200 ppm), la formación de productos de corrosión tienden a formar una capa uniforme y adherente, por lo que la velocidad de corrosión tienda a disminuir para todos los ángulos empleados en la investigación.
3. Los principales productos de corrosión que se forman son una mezcla de óxidos, sulfuros y carbonatos, los cuales tienden a adherirse en la superficie del acero, dando como resultado un mejor comportamiento sobre la velocidad de corrosión, ya que los sulfuros y los carbonatos son más protectores de acuerdo a la literatura.

REFERENCIAS:

[1] Joan Genescá, Más allá de la herrumbre, III. Corrosión y medio ambiente, FCE, México DF, pp. 6-9, (1994).

[2] William D. Callister y David G. Rethwisch, Materials science and engineering an introduction, Wiley, Nueva York, pp. 675-682 (2009).

[3] Smith, J. S and Miller, J.D. A. Nature of Sulphides and their Corrosive Effect on Ferous Metals: A Review British Corrosion Journal 10, 136-143 (1975).

[4] Rickard, D. and Luther, G. W. Chemestry of Iron Sulfides, Chem. Rev. 107, 514-562 (2007).

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN QUÍMICA DE PROTECTORES SOLARES COMERCIALES BASE ORGÁNICA E INORGÁNICA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE UV-VIS

Sujey G. Castellanos-Reyes*, Thaily A. Reyes-Santiago, Daniel R. Guevara- Ramírez, Mónica E. Vázquez-Jiménez, Danna P. Sánchez- Mariles, María Eugenia Sánchez-Morales

Departamento de Ciencias Tecnológicas, Universidad de Guadalajara, Av. Universidad #1115, 47820 Ocotlán, Jalisco, México
sujey.castellanos@academicos.udg.mx

RESUMEN

La sociedad actual, es cada vez más consiente sobre los problemas de salud ocasionados por la exposición prolongada a la radiación solar. Los daños en la piel producidos por la radiación ultravioleta (UV) procedente de la luz solar son amplios y variados, desde quemaduras en la piel con diferente grado de consideración hasta cáncer de piel. El uso y comercialización de productos tópicos de protección solar es amplio y correlacionado a los buenos hábitos de higiene y salud. Para establecer la eficacia de un protector solar tópico, ha sido establecido el parámetro factor de protección solar (del inglés, sun protector factor, SPF), el cual, aborda la radiación ultravioleta del tipo B (UVB, 290 - 320 nm) y del tipo A (UVA, 340 - 400 nm). Continúa siendo actualmente debatible la capacidad fotoprotectora, correlacionando a su degradación química, del uso tanto de sustancias orgánicas e inorgánicas en los protectores solares comerciales. El presente trabajo evalúa la degradación química de un protector solar orgánico, a base de palmitato de retinol y un protector solar inorgánico, a base de óxido de zinc [1,2].

INTRODUCCIÓN

La exposición prolongada e intensa a la radiación solar ha sido atribuida a la gran mayoría de casos de cáncer de piel detectados en países de América del norte. Las agencias medicas oficiales de dermatología recomiendan buenas prácticas de protección solar, tales como, evitar las horas de radiación máxima emitida, el uso de protectores físicos como gorras o sombreros y el uso de protectores solares de piel. Estos últimos, considerados como parte de la farmacopea disponible al público. Los protectores solares utilizan agentes de bloqueo ultravioleta para atenuar el daño de la radicación antes de que interactúe con la piel [3].

Los protectores solares se encuentran entre los contaminantes emergentes que causan efectos ecológicos adversos. En años recientes los efectos medioambientales de algunos ingredientes utilizados en la preparación de protectores solares una vez que ellos son liberados en el medio ambiente acuático han sido discutidos por la comunidad científica. El análisis y modelado químico de la descomposición, liberación, comportamiento y destino de los ingredientes contenidos de los protectores solares permite predecir el impacto negativo tanto en ambientes acuáticos como en el usuario [3, 4].

Los protectores solares son clasificados de acuerdo al ingrediente activo contenido siendo los compuestos activos orgánicos como oxibenzona o palmitatos e inorgánicos como TiO_2 o ZnO. La liberación y descomposición de los protectores solares depende del medio donde se encuentren, y la serie de interacciones fisicoquímicas entre el medio y el mismo protector. Todos estos procesos pueden causar que los ingredientes se mantengan en el medio sin cambiar, cambien su especificidad o se transformen en otros compuestos a velocidades variables. Una vez en el medio ambiente, los ingredientes originales pueden interactuar directa o indirectamente con el medio ambiente y la vida marina, causando series de efectos adversos [5].

METODOLOGÍA

Los experimentos fueron efectuados en las horas de radiación máxima solar, de 12 p.m. hasta 4 p.m. El seguimiento a la degradación química frente a la exposición solar de los protectores solares se efectuó mediante un espectrofotómetro de UV-Vis, el espectrofotómetro compacto marca THORLABS MOD CCS200. Masas constantes de protector solar fueron colocadas en láminas comerciales de polipropileno de 4 cm^2. El sensor del espectrofotómetro fue colocado debajo de la lámina que contenía el protector solar, las mediciones se realizaron cada 30 min. Los experimentos fueron realizados por triplicado. El análisis de los espectros resultando fue realizado en las dos regiones principales de relevancia, de 290 - 320 nm y de 340 - 400 nm. **La Figura 1**, esquematiza la colocación del sensor debajo de la superficie de polipropileno cubierta con los protectores solares. El protector solar inorgánico a base de ZnO fue etiquetado como protector A, el protector solar base orgánica de palmitato fue etiquetada como protector solar B.

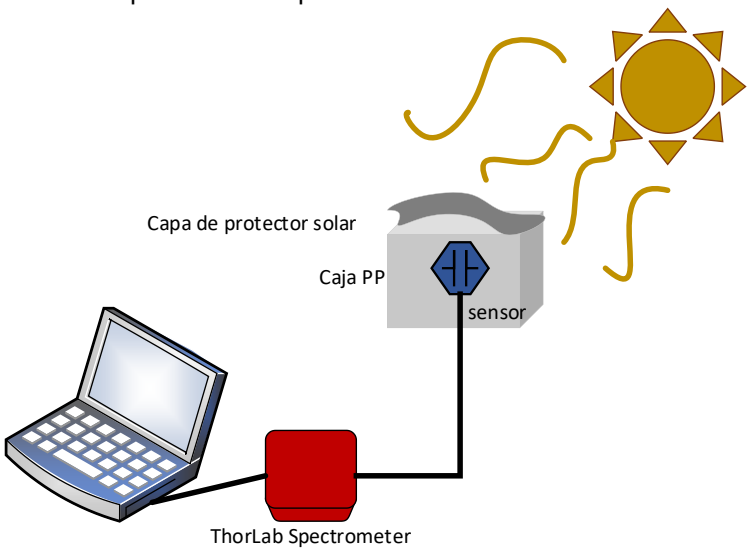


Figura 1. Esquematización del montaje experimental.

RESULTADOS

El seguimiento a la degradación química se efectuó en las bandas principales de UVA a 354, 379 y 390 nm. Los resultados muestran curvas de menor intensidad con respecto al tiempo de exposición solar, tanto en las mediciones sin protector solar como en ambos fotoprotectores. La **Figura 2** presenta los espectros de UV detectados el día de la experimentación, dichos espectros son considerados como blancos de referencia para la comparación con el espectro medido en la presencia del protector solar. Como se observa en la Figura 2, los espectros medidos tienden a disminuir de intensidad con respecto al transcurso del tiempo, habiendo un alta de intensidad a los 90 min de transcurrido el experimento. Las principales bandas de absorción para dar seguimiento cualitativo a la degradación química se encuentran en longitudes de onda de 303, 354, 379 y 390 nm.

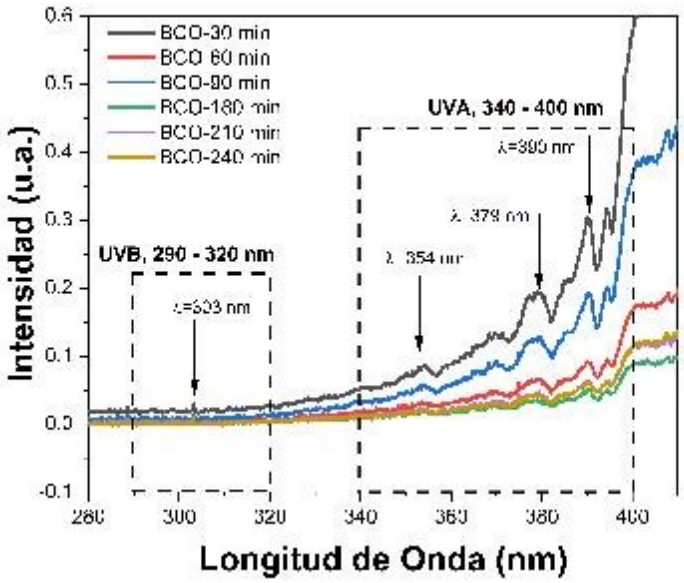


Figura 2. Espectros de UV de irradiación solar sin protector solar.

La **Figura 3**, presenta los espectros de absorción medidos en la presencia del protector solar A, la forma de los espectros cambia significativamente, comprobando el bloqueo de la radiación a la cual fue expuesta, principalmente en bandas a 303 y 354 nm. La intensidad de los espectros disminuye con el tiempo en concordancia con la disminución de la radiación UV presentada el día de la experimentación. El seguimiento principal a las bandas de absorción puede compararse a 379 y 390 nm.

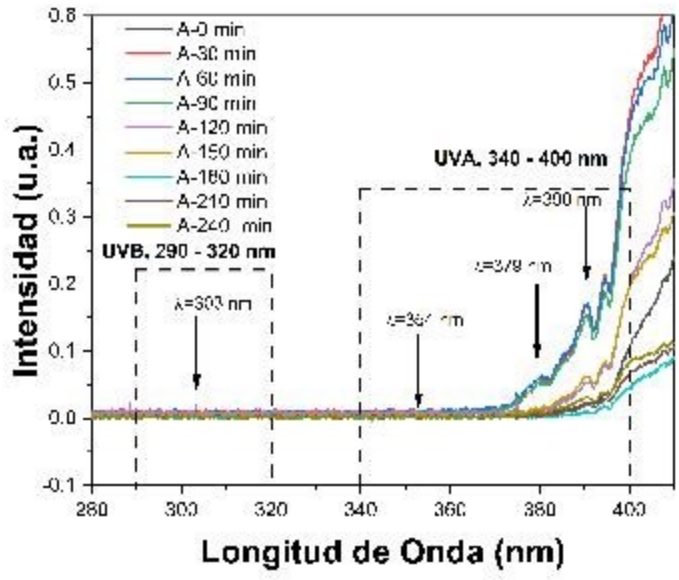


Figura 3. Espectros de UV detectados con protector solar inorgánico (A).

La **Figura 4** presenta los espectros de absorción medidos en la presencia del protector solar B, al igual que la Figura 3, los espectros cambian de forma significativamente con respecto a los espectros blanco, la disminución de intensidad de las bandas ubicadas a 303, 354 y 379 nm demuestra la efectividad adicional del protector solar B con respecto a su contraparte, el protector A. La disminución de la intensidad de los espectros también se encuentra en concordancia con respecto a la disminución de la radiación con respecto al tiempo.

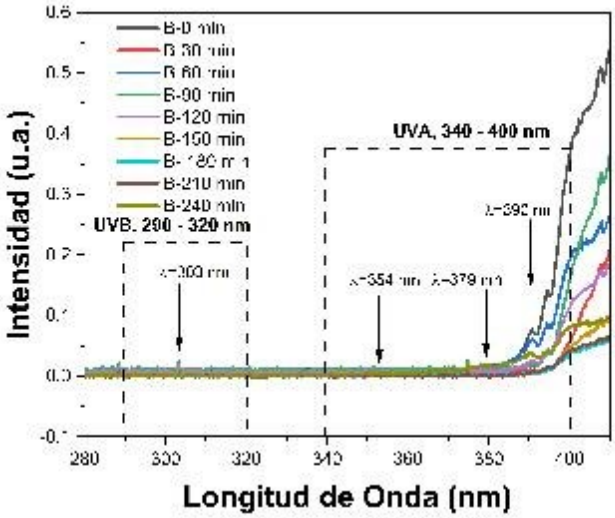


Figura 4. Espectros de UV detectados con protector solar inorgánico (B).

A partir de la **Figura 5** a la **Figura 7** se presenta la comparativa del espectro blanco con los espectros detectados con los protectores A y B a tiempos cortos de exposición a la radiación solar de 30 a 90 min de exposición. La **Figura 5** presenta los espectros detectados al haber transcurrido 30 min de exposición a la radiación solar, donde se observa la efectividad del protector solar B de inhibir la aparición de bandas de absorción tanto en la región UVB y la región UVA. El protector solar A, disminuye la intensidad de las bandas, sin embargo, prevalece la presencia de dos bandas en la región UVA.

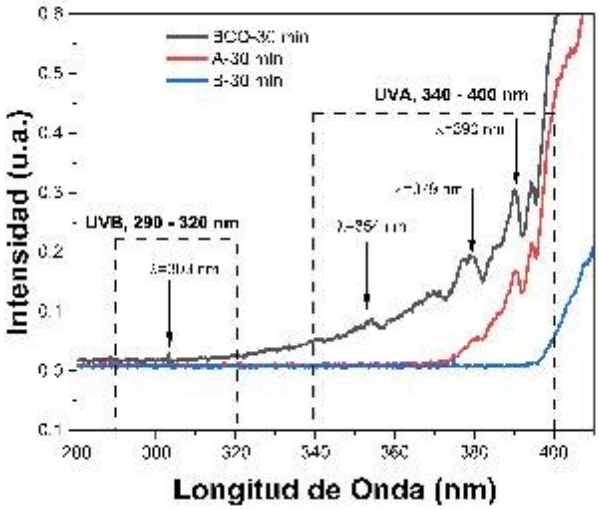


Figura 5. Comparación de espectros de irradiación a 30 min de exposición solar.

La **Figura 6**, a 60 min de exposición a la radiación solar compara el espectro referencia con los espectros de los protectores solares al mismo tiempo de irradiación. La disminución de la efectividad del protector solar A, se comprueba con el aumento en la intensidad de la radiación detectada por la referencia.

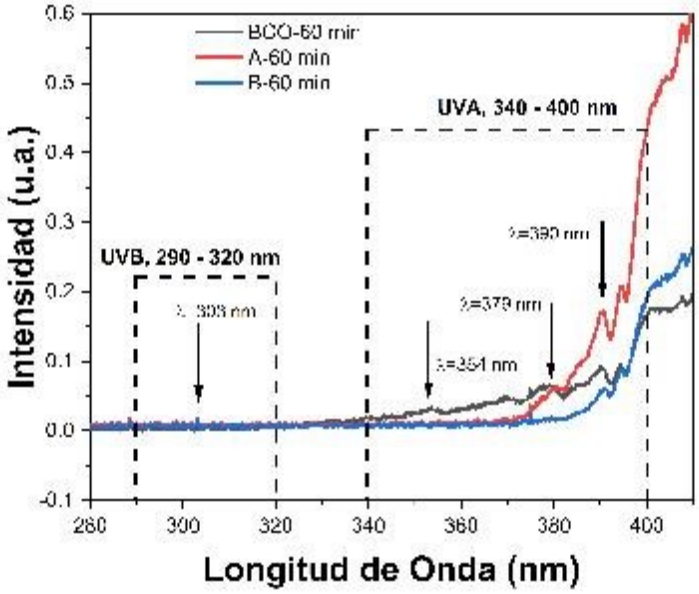


Figura 6. Comparación de espectros de irradiación a 60 min de exposición solar.

La **Figura 7**, presenta la comparación de espectros de absorción a los 90 min de exposición a la radiación solar, la intensidad del espectro del protector A comparada con el blanco de referencia es prácticamente la misma, a partir de este punto se comienzan a percibir los cambios en la efectividad del protector solar inorgánico. El protector solar B base orgánica, continúa inhibiendo las principales bandas de absorción de radiación ultravioleta.

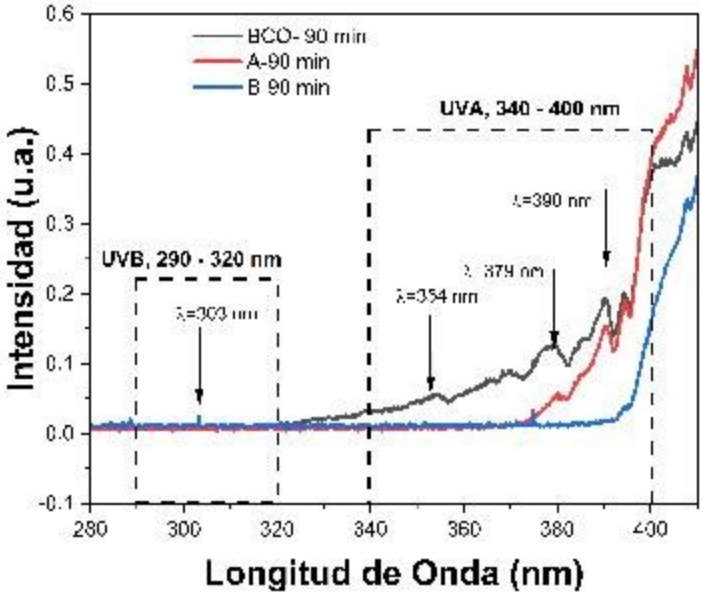


Figura 7. Comparación de espectros de irradiación a 90 min de exposición solar.

A partir de la **Figura 8** a la **Figura 10** se presenta la comparativa del espectro blanco con los espectros detectados con los protectores A y B a tiempos cortos de exposición a la radiación solar de 180 a 240 min de exposición. La **Figura 8** presenta los espectros de radiación medidos a 3 horas de exposición solar, 180 minutos de radiación. Ambos protectores continúan inhibiendo bandas de absorción UV. En ambas regiones principales de longitud de onda.

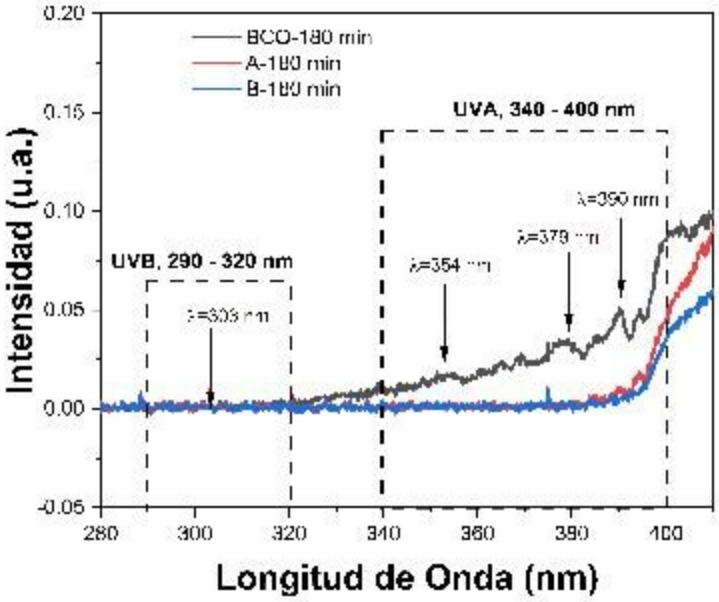


Figura 8. Comparación de espectros de irradiación a 180 min de exposición solar.

La **Figura 9** presenta los espectros de radiación medidos a 210 minutos de radiación solar. Ambos protectores continúan inhibiendo bandas de absorción UV.

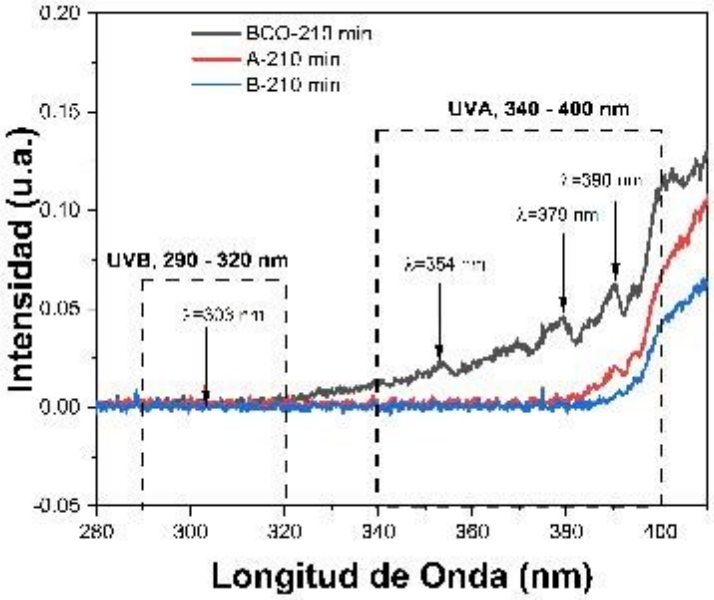


Figura 9. Comparación de espectros de irradiación a 210 min de exposición solar.

La **Figura 10** presenta los espectros de radiación medidos a 240 minutos de radiación solar. Ambos protectores continúan inhibiendo bandas de absorción UV, sin embargo, la intensidad comparada con la referencia se observa muy similar.

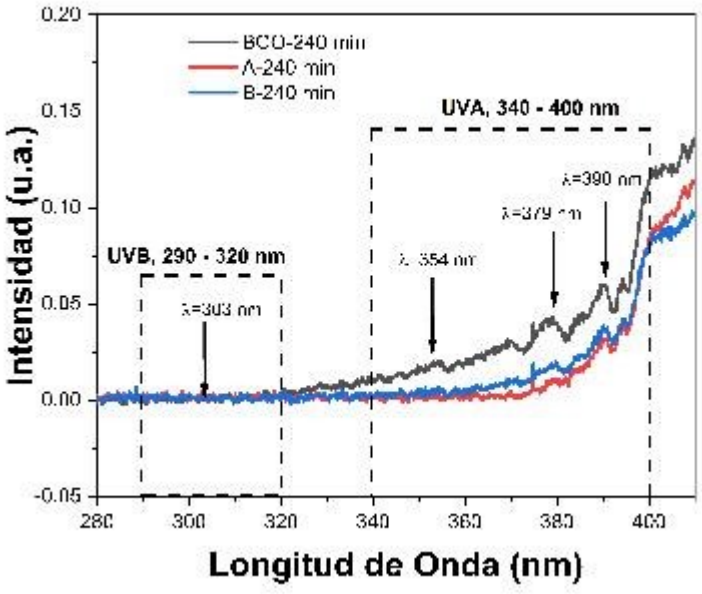


Figura 10. Comparación de espectros de irradiación a 240 min de exposición solar.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la comparativa realizada, el protector solar inorgánico a base de óxido de zinc, demuestra menor rango de protección con respecto a la radiación UVA comparado con su contraparte orgánica, el palmitato de retinol. El cambio en la intensidad de la radiación solar detectada en el transcurso del día y el efecto positivo de la protección a la radiación UV y la degradación química de ambos fotoprotectores puede percibirse aun después de 4 horas de exposición, sin embargo, a partir de los 90 min puede notarse la disminución de sus efectos protectores.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mark E. Burnett & Steven Q. Wang: Current sunscreen controversies: a critical review. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine (2011) 27, 58–67*
2. Francis P. Gasparro, Mark Mitchnick and J. Frank Nash: Review of Sunscreen Safety and Efficacy. *Photochemistry and Photobiology, (1998) 68(3): 243-256*.
3. Zuzanna A. Lewicka, William W. Yu, Brittany L. Oliva, Elizabeth Quevedo Contreras, Vicki L. Colvin. Photochemical behavior of nanoscale TiO_2 and ZnO sunscreen ingredients Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 263 (2013) 24– 33.
4. Gema Ruiz-Gutiérrez, Araceli Rodríguez-Romero, Antonio Tovar-Sánchez and Javier R. Viguri Fuente, Analysis and Modeling of Sunscreen Ingredients' Behavior in an Aquatic Environment Oceans 3 (2022) 340–363.
5. Yuefei Ji, Lei Zhou, Ya Zhang, Corinne Ferronato, Marcello Brigante, Gilles Mailhot, Xi Yang, Jean-Marc Chovelon: Photochemical degradation of sunscreen agent 2-phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid in different water matrices. Water Research 47 (2013) 5865-58775.

ESTUDIO BIOMECÁNICO COMPARATIVO DEL LEVANTAMIENTO DE PESO MUERTO CON LA ESPALDA RECTA Y LA ESPALDA FLEXIONADA

Saúl Gutiérrez Pérez1, Jonathan Tomas Cocina Guadarrama1, Cuauhtémoc Acosta Lúa1, María Eugenia Sánchez Morales1 y Claudia Carolina Vaca García1

1Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara
carolina.vaca@academicos.udg.mx

RESUMEN

El estudio biomecánico de movimientos consiste en examinar las fuerzas y momentos que afectan al cuerpo humano mientras lleva a cabo distintas actividades. Su propósito radica en interpretar la mecánica del cuerpo humano para disminuir la fatiga, evitar lesiones e incrementar la eficiencia de las tareas. En este estudio, se analizaron levantamientos de pesos muertos efectuados por estudiantes universitarios, mediante el sistema de cámaras Motio de STTSYSTEMS y el software 3DMA de análisis y captura de movimiento óptico 3D, reproduciendo en un ambiente controlado el levantamiento de cargas de 10 y 20 kg con la espalda recta y con la espalda flexionada. En los levantamientos con la espalda flexionada se observaron alteraciones en los movimientos debido a la afectación de la carga en los discos intervertebrales y en las estructuras de soporte de la columna, como los ligamentos y los músculos, siendo más notoria esta alteración a mayor carga. A largo plazo, levantar pesos de manera inadecuada, puede provocar hernias discales, desgarros musculares, compresión de los nervios y dolor crónico en la espalda. Es fundamental mantener una postura correcta al levantar pesos, lo que implica mantener la espalda recta y utilizar los músculos de las piernas y la cadera para levantar la carga, distribuyendo así el peso de manera más segura y reduciendo el riesgo de lesiones.

INTRODUCCIÓN

En el centro Universitario de la Ciénega (CUCIÉNEGA) se realizó la investigación sobre el estudio biomecánico comparativo del levantamiento de peso muerto con la espalda recta y la espalda flexionada. Donde los puntos a resaltar es sobre las posibles afectaciones que se puede producir en el cuerpo al momento de realizar levantamientos de cargas.

El levantamiento de pesos en entornos laborales es una actividad común que puede implicar riesgos biomecánicos significativos si no se realiza correctamente. Este estudio biomecánico comparativo se centra en analizar dos técnicas principales: levantar con la espalda recta y levantar con la espalda flexionada. Se examinan aspectos como la activación muscular, la distribución de cargas en la columna vertebral y el riesgo de lesiones asociadas con cada técnica.

MARCO REFERENCIAL

El levantamiento de cargas en el trabajo se refiere al proceso de mover objetos pesados de un lugar a otro dentro del entorno laboral. Este proceso puede involucrar levantar, transportar, y depositar objetos pesados o voluminosos de manera segura y eficiente (E-FACTS, 2007).

El contexto en el que se realiza el levantamiento de cargas en el trabajo puede variar dependiendo de la actividad laboral. Por ejemplo:

- Industria de la construcción: Los trabajadores en este sector a menudo levantan cargas pesadas como materiales de construcción, herramientas y equipos.
- Sector manufacturero: Los empleados pueden estar involucrados en levantar y mover productos terminados, materias primas, o componentes de maquinaria.

- Sector logístico y almacenes: Los trabajadores en almacenes y centros de distribución pueden estar involucrados en la manipulación de mercancías para su almacenamiento y envío, lo que implica levantar cajas, paletas y otros objetos pesados.
- Sector de la salud: El personal médico y de enfermería puede estar involucrado en el levantamiento de pacientes, equipos médicos y suministros.
- Oficinas y entornos corporativos: Aunque menos común, incluso en entornos de oficina pueden surgir tareas que impliquen levantamiento de cajas de archivos, equipos de oficina o suministros.

Esto puede incluir el uso de equipo de protección personal, la capacitación adecuada en técnicas de levantamiento seguro y la implementación de medidas ergonómicas en el lugar de trabajo.

Levantamiento de peso muerto incorrecto

Una mala postura al momento de levantar un objeto pesado puede llevar a ocasionar lesiones graves por ello algunos errores que la mayoría comete al levantar peso muerto:

- Mal agarre del objeto.
- Espalda baja flexionada.
- No flexionar las rodillas.
- No ejercer fuerza en la cadera.
- Mala posición.

Levantamiento de peso muerto correcto

Levantar un objeto pesado de manera correcta no solo ayuda a prevenir lesiones, sino que también hace que la tarea sea más eficiente y menos agotadora para el cuerpo (TSM, 2024).

Al seguir una técnica adecuada de levantamiento, puedes distribuir la carga de manera más equitativa entre los músculos del cuerpo y minimizar la tensión en áreas específicas, como la espalda baja. El levantamiento correcto es el siguiente:

- Una amplia base de apoyo, donde los pies deberán estar separados a la distancia de los hombros.
- Estar lo más cercas posible del objeto.
- Flexionar las rodillas en una posición en cuclillas.
- Levantar lentamente, enderezando las rodillas y la cadera.
- Mantener una postura recta, donde la carga deberá estar lo más cerca al cuerpo.
- Bajar lentamente el objeto flexionando las rodillas.

Biomecánica de levantamiento de peso muerto

La ecuación de NIOSH es la que nos ayuda a evaluar las tareas que se tienen que realizar mediante levantamiento de cargas.

El resultado de la aplicación de la ecuación es el Peso Máximo Recomendado o el peso máximo que es recomendable levantar en las condiciones del puesto para evitar el riesgo de lumbalgias o problemas de espalda (Diego-Mas, 2015).

El criterio biomecánico establece que cuando se levanta de manera incorrecta una carga pesada o ligera, se generan fuerzas y momentos mecánicos que se transmiten a través de los segmentos corporales hasta las vértebras lumbares, lo que resulta en un estrés considerable en la columna vertebral.

El peso recomendado de levantamiento es de 23 Kg. Ya sea que la capacidad de una persona para levantar más o menos peso se deba a su entrenamiento físico o a las habilidades especiales de un

trabajador, ambos factores pueden influir en su capacidad para realizar tareas relacionadas con la fuerza física.

Normativa

Norma Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018, Factores de riesgo ergonómico en el trabajo - Identificación, análisis y prevención. Parte 1 – Manejo manual de cargas (STPS, 2020).

Definición: riesgos que pueden conllevar sobre-esfuerzo físico, movimientos repetitivos o posturas forzadas en el trabajo, con la consecuente fatiga, errores, accidentes y enfermedades de trabajo, derivado del diseño de las instalaciones, maquinaria, equipo, herramientas o puesto de trabajo.

Objetivo: Establecer los elementos para identificar, analizar, prevenir y controlar los factores de riesgo ergonómico en los centros de trabajo derivados del manejo manual de cargas, para prevenir alteraciones a la salud de los trabajadores.

Software 3DMA de análisis y captura de movimiento óptico 3D

3DMA es un sistema de análisis biomecánico que utiliza la captura óptica del movimiento. Ofrece distintos módulos adaptados a aplicaciones específicas, como análisis de la marcha, carrera y evaluación de articulaciones, para cubrir diversas necesidades (SYSTEMS, 2023).

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta investigación fue necesario el siguiente procedimiento:

- Instalar el sistema de cámaras Motio de STTSYSTEMS y el software 3DMA.
- Conectar las cámaras a la computadora donde se encuentre el software previamente instalado.
- Calibrar: una vez dentro del programa hay que dirigirse a la parte de Configuration > Calibrate, en la cual se hará uso de la varilla con seis marcadores (figura 1), asegurando que cada marcador se encuentre a la misma distancia uno de otro. Para calibrar se necesitan 16 posiciones y la opción más recomendable del calibrado es hacerlo en forma de rectángulo y que todas las cámaras logren visualizar cada marcador (figura 2).

Figura 1. Varilla de calibración.

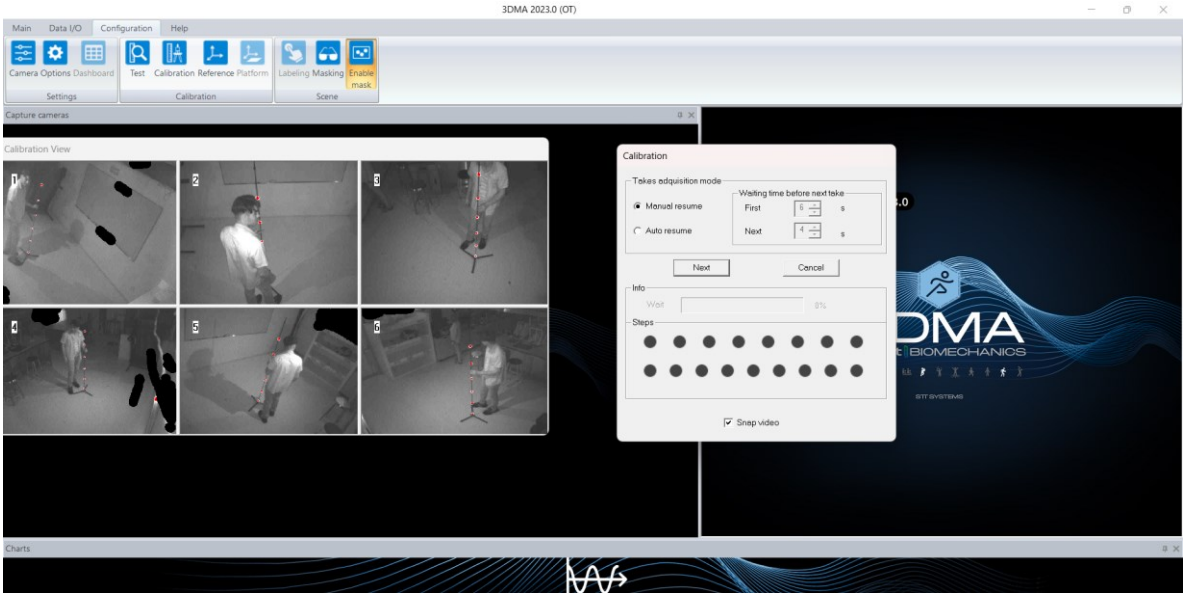


Figura 2. Calibración del sistema.

- Enmascarar puntos no requeridos en el lugar: este punto es opcional, ya que si en el lugar no se encuentran puntos de luz que interfieran con la investigación entonces no es requerido este punto. Pero si hay puntos de luz en el lugar que interfieran, con la opción de enmascarar hará que el programa no los tome en cuenta. Esta opción se encuentra en la parte de Configuration > Masking.
- Establecer el modo con el que se trabajará. En este caso se utilizó Full-body analysis (19p).
- Colocar los marcadores requeridos a la persona que efectuará la prueba, en este caso 19 marcadores (figura 3).
- Iniciar la prueba (figura 4).
- Después de terminar con la prueba se generará el reporte en el mismo software.

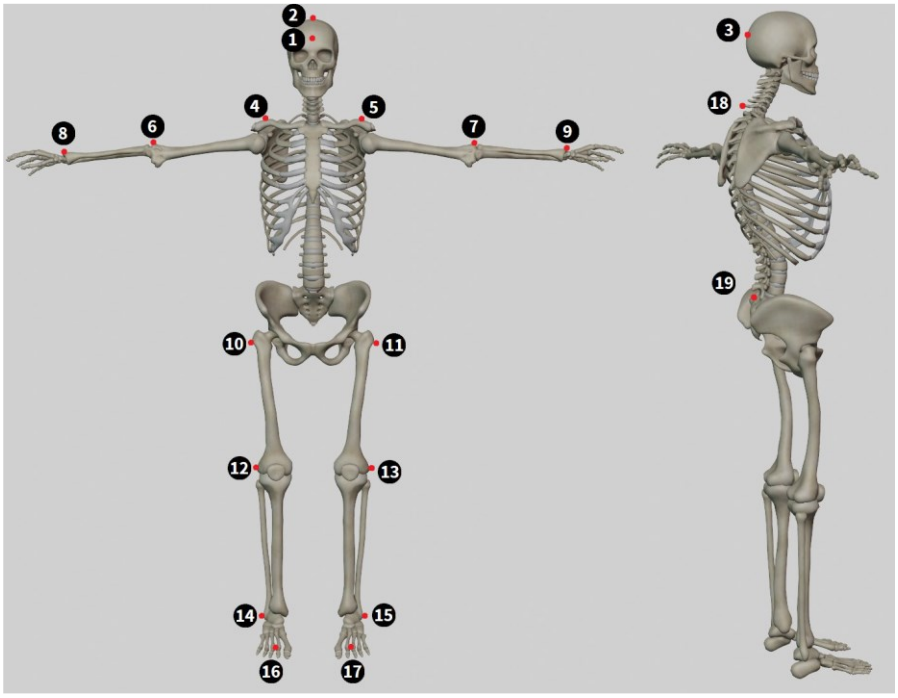


Figura 3. Posiciones de los 19 marcadores.

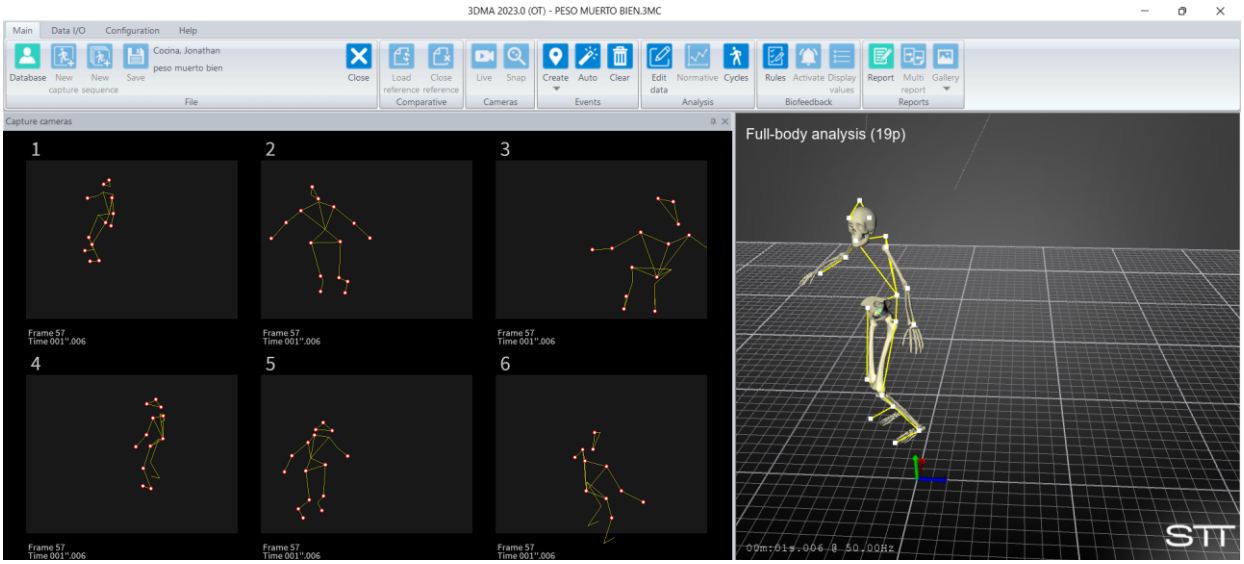


Figura 4. Prueba de levantamiento de peso muerto.

Para esta investigación se llevaron a cabo un total de 60 pruebas capturadas, de las cuales se realizaron 30 con la espalda flexionada y 30 con la espalda recta. Otra de las variables fue el peso del objeto a levantar que fue de 10 y 20 Kg. El objeto levantado fue una caja, tal como se muestra en las figuras 5 y 6. Fueron 15 personas voluntarias, para cada una de ellas se tomaron 4 pruebas con un agarre normal y 3 repeticiones, de 14 segundos por prueba.

Figura 5. Levantamiento de peso con espalda flexionada

Figura 6. Levantamiento de peso con espalda recta.

RESULTADOS

Levantamiento con la espalda recta

Cargas de 10 Kg:

1. La mayoría de los estudiantes mantuvieron una alineación adecuada de la columna vertebral, con mínima desviación lateral.
2. Se observó una activación muscular más uniforme en los músculos de la espalda y las piernas.
3. El centro de gravedad se mantuvo más estable, reduciendo el riesgo de pérdida de equilibrio.

Cargas de 20 kg:

1. Aunque hubo una mayor tensión muscular, los estudiantes continuaron mostrando una alineación vertebral adecuada.
2. Aumentó la activación de los músculos estabilizadores, especialmente en la región lumbar.
3. Se registró un incremento en la flexión de las rodillas, lo que indica un mayor uso de los músculos de las piernas para soportar el peso adicional.

Levantamiento con la espalda flexionada

Cargas de 10 kg:

1. Se observó una mayor curvatura en la columna lumbar, lo que incrementa el riesgo de lesiones.

2. La distribución del esfuerzo muscular fue menos uniforme, con una mayor carga en la parte baja de la espalda.
3. Hubo una tendencia a la pérdida de equilibrio, con un desplazamiento del centro de gravedad hacia adelante.

Cargas de 20 kg:

1. La curvatura lumbar aumentó significativamente, evidenciando una postura inadecuada.
2. Se registró una mayor tensión y fatiga en los músculos de la espalda baja.
3. El riesgo de lesiones aumentó debido a la combinación de peso elevado y postura incorrecta.

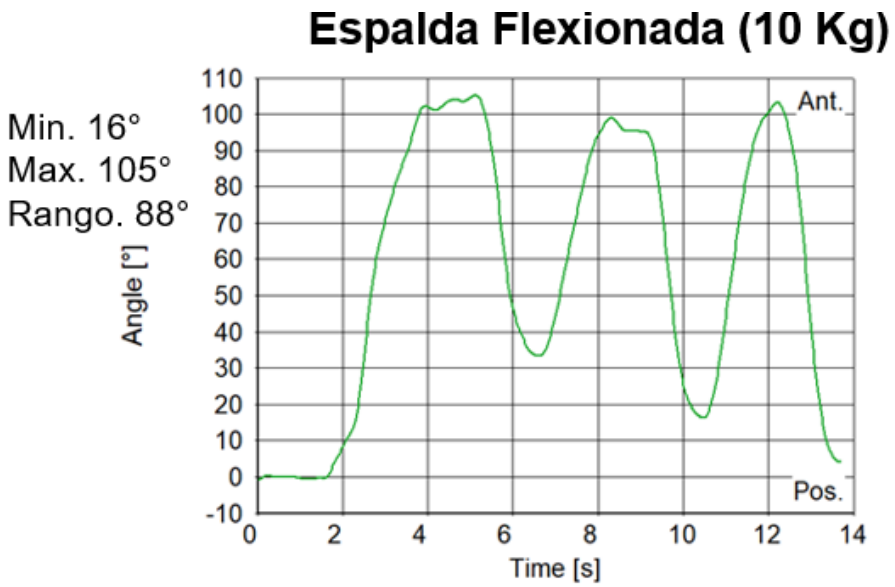


Figura 7. Levantamiento de caja con 10 kg y espalda flexionada.

En la figura 7, se muestra el levantamiento de 10 kg con la espalda flexionada, mientras que en la figura 8 se muestra el levantamiento de 20 kg con la espalda flexionada.

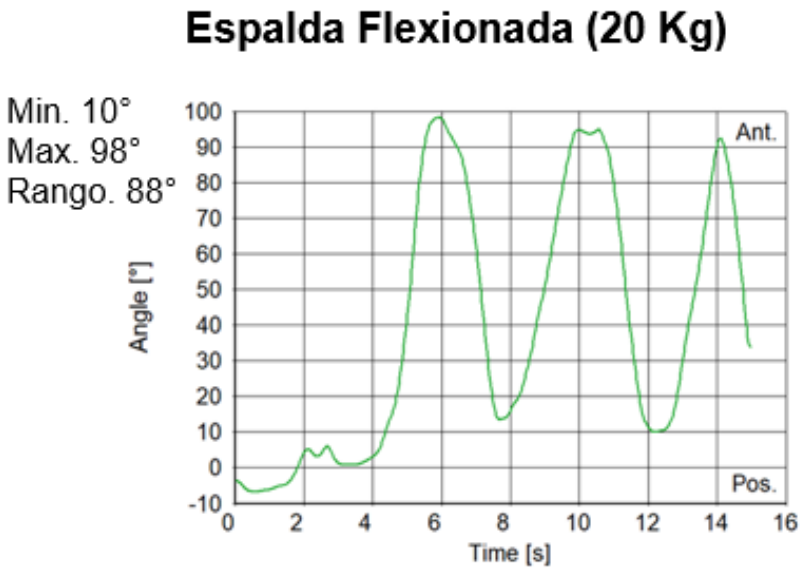


Figura 8. Levantamiento de caja con 20 kg y espalda flexionada.

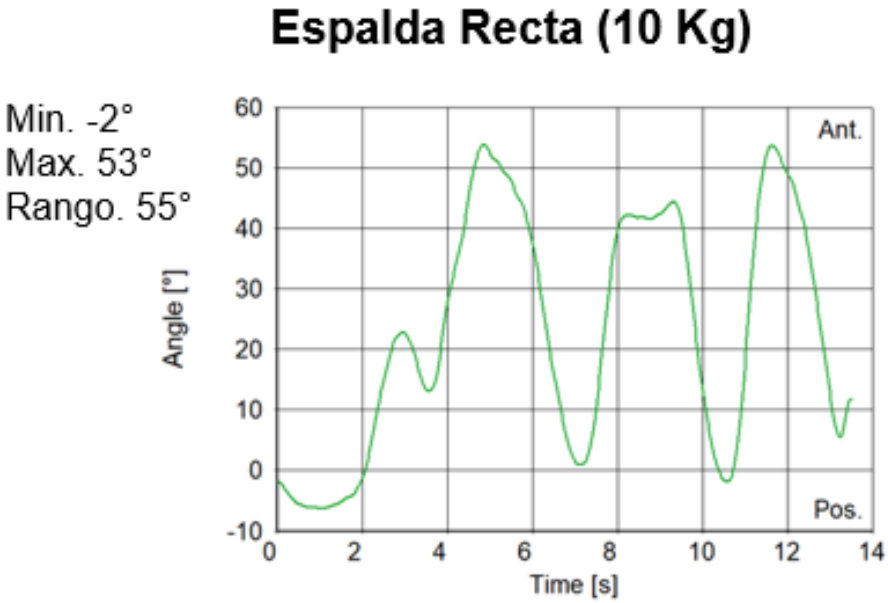


Figura 9. Levantamiento de caja con 10 kg y espalda recta.

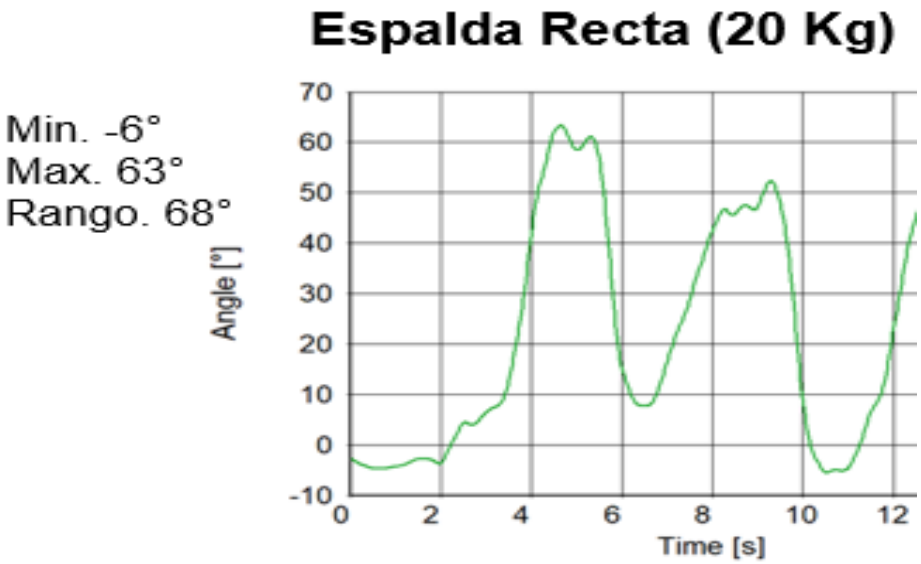


Figura 10. Levantamiento de caja con 10 kg y espalda recta.

En la figura 9 se muestra el levantamiento de 10 kg con la espalda recta y en la figura 10 el levantamiento de 20 kg también con la espalda recta. En todos los casos se observa una modificación de la postura para compensar la carga, inclinándose hacia atrás y, a mayor peso, el ángulo de inclinación es mayor.

CONCLUSIONES

El análisis de los levantamientos de pesos muertos mediante el sistema de cámaras Motio y el software 3DMA demuestra claramente la importancia de mantener una postura adecuada durante el levantamiento de cargas. Levantar con la espalda recta no solo distribuye el esfuerzo de manera más uniforme entre los diferentes grupos musculares, sino que también reduce significativamente el riesgo de lesiones. Por otro lado, levantar con la espalda flexionada aumenta la carga en la región lumbar y el riesgo de desequilibrios, especialmente con cargas más pesadas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de educar a los estudiantes y a la población en general sobre las técnicas correctas de levantamiento para promover la salud y la seguridad en las actividades diarias y laborales.

Algunas de las lesiones más recurrentes a la hora de levantar peso muerto son las hernias de disco, esguinces, dolor lumbar, lesiones en músculos y articulaciones.

REFERENCIAS

Diego-Mas, J. A. (2015). Evaluación ergonómica del levantamiento de carga mediante la ecuación de Niosh. Obtenido de Ergonautas: https://www.ergonautas.upv.es/metodos/niosh/niosh-ayuda.php

E-FACTS. (2007). Hazards and risks associated with manual. osha.europa.eu.

STPS. (2020). Norma Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018,. Mexico: Comité Consultivo Nacional de Normalización en.

SYSTEMS, S. (2023). motio.stt. Obtenido de motio.stt: https://motio.stt-systems.com/es/3dma-captura-y-analisis-de-movimiento-optico-3d/

TSM. (12 de 02 de 2024). thesafetymaster. Obtenido de thesafetymaster: https://www.thesafetymaster.com/manual-material-handling-techniques-for-lifting-and-moving-heavy-loads-safely-the-safety-master/

GENERACIÓN DE BASES DE DATOS PARA ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES: COMPARATIVA Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN DE IMÁGENES CON LLUVIA

J. Manuel Morales-Babines[1], Sebastián Salazar-Colores[1], Daniel A. Gutiérrez-Jimenez[1] Diana Jazmin Torres-López[1] Alejandra Aguilera-Barrientos[2]

[1]Centro de Investigaciones en Óptica A.C., [2]Instituto Tecnológico de León.
josemb@cio.mx, sebastian.salazar@cio.mx, daniel.gutierrez@cio.mx, dianatl@cio.mx, Alejandra.AguileraB@outlook.com

RESUMEN

Las bases de datos desempeñan un papel crucial en el entrenamiento de las redes neuronales, una rama de gran relevancia en la inteligencia artificial en la actualidad. A medida que la red abarca una diversidad y calidad mayores de escenarios, su entrenamiento se vuelve más completo, aumentando la eficacia de la red neuronal para su tarea específica. Por ende, la creación de bases de datos de alta calidad se erige como una tarea fundamental en el ámbito de las redes neuronales. En este estudio son propuestos métodos de distintos paradigmas para la creación de lluvia sintética con el propósito de crear una nueva base de datos. Para la generación de imágenes con lluvia sintética, se emplearon cinco métodos: un método heurístico basado en la modificación de parámetros en las imágenes, como profundidad de imagen, densidad de lluvia, mapa de transmisión, luz atmosférica y racha de lluvia; un segundo método mediante software de creación de contenido 3D, Blender, que fueron utilizadas diversas herramientas para recrear lluvia sintética en las imágenes. Además, se implementó un método basado en inteligencia artificial a través de redes adversarias generadoras de ciclos llamadas CycleGAN, empleando técnicas de aprendizaje automático, lleva a cabo un proceso de traducción de imágenes [1], transformando imágenes sin lluvia a imágenes con lluvia. Los últimos métodos fueron aplicados primero mediante el método heurístico y el software de creación de contenido 3D, seguidos por la aplicación de CycleGAN. La evaluación del trabajo incluyó una encuesta empírica sobre los métodos propuestos de lluvia sintética y de imágenes con lluvia, con el objetivo de determinar cuál de estos métodos tienen una mayor aceptación desde la perspectiva del ojo humano. Los resultados revelaron una favorable aceptación de las imágenes modeladas con lluvia sintética. Se demuestra en el estudio que la generación de imágenes con lluvia sintética ha sido bien recibida por la perspectiva del ojo humano. Este enfoque proporciona una valiosa contribución para la optimización de bases de datos utilizadas en el entrenamiento de redes neuronales, destacando la importancia de la calidad de las imágenes sintéticas en este contexto.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos meteorológicos son situaciones que suponen desafíos para la imaginación y la inventiva humana, ya que son fenómenos bastante complejos con muchos efectos tanto positivos como negativos que pueden interferir en algunas de las actividades diarias de la humanidad. Uno de estos fenómenos es la lluvia, que ha sido objeto de estudio [2]. Este fenómeno natural, además de afectar diversas actividades diarias, también tiene un impacto significativo en la seguridad vial. Según algunas compañías de seguros, como BBVA [3], se ha identificado como una de las principales causas de accidentes automovilísticos. Esto subraya la importancia de tomar precauciones adicionales y considerar los efectos de este fenómeno meteorológico en la conducción y la seguridad vial.

La lluvia puede inducir varios artefactos en las imágenes capturadas por cámaras o sensores, como distorsiones causadas por gotas de agua en el lente, empañamiento debido a la niebla o el vapor, reducción de la calidad de la imagen debido a condiciones de poca luz, desenfoque por movimiento causado por las gotas de lluvia que caen, reflejos no deseados en superficies mojadas y alteraciones en la reproducción del color debido a la interacción de la luz con elementos mojados [4]. Todos estos factores son criterios a considerar en la adquisición y el procesamiento de imágenes en condiciones de lluvia, impactando negativamente los sistemas de visión artificial y sus aplicaciones. Los sistemas de vigilancia pueden experimentar distorsiones debido a las gotas en el lente, el reconocimiento

facial puede verse afectado por el empañamiento, la visión de los vehículos autónomos puede encontrar obstáculos debido a la baja visibilidad, el desenfoque inducido por la lluvia, los reflejos en superficies mojadas y las alteraciones del color debido a la interacción de la luz con elementos mojados [2].
Actualmente, no existen algoritmos capaces de eliminar completamente los efectos adversos de la lluvia en los sistemas [5]. Por esta razón, se están realizando investigaciones para desarrollar nuevos sistemas que mitiguen estos impactos. Una de las propuestas líderes para abordar este desafío se basa en el uso del aprendizaje profundo, con el objetivo de complementar las deficiencias existentes en los sistemas actuales. Estos sistemas se centran en eliminar la interferencia causada por la lluvia, un problema de investigación conocido como 'deraining'. Sin embargo, para que dichos sistemas sean significativamente efectivos, deben ser entrenados con bases de datos extensas y de alta calidad [6].
La creación de estas bases de datos presenta desafíos significativos, principalmente por dos razones. En primer lugar, la captura manual de imágenes en entornos no controlados es muy complicada, ya que requiere obtener imágenes tanto sin lluvia como con diferentes niveles de acumulación de lluvia en el mismo lugar para lograr un entrenamiento efectivo del sistema. En segundo lugar, la simulación realista de la lluvia a través de sistemas computacionales es compleja debido a las intricaciones del fenómeno.

Trabajos relacionados

En esta sección, se discuten enfoques y trabajos centrados en el desarrollo de simulaciones de lluvia sintética con un alto nivel de realismo. Algunos de estos trabajos, como "Rain rendering for evaluating and improving robustness to bad weather" [7], se basan en simulaciones físicas, utilizando modelos físicos que consideran aspectos como la velocidad y el tamaño de las gotas de lluvia, así como su interacción con la luz. Además, la simulación física no se limita solo a estos aspectos; hay modelos físicos que incluso recrean el sonido de la lluvia, como se demuestra en el trabajo "Physically-based statistical simulation of rain sound. ACM Transactions on Graphics (TOG)" [8].
Por otro lado, no todos los métodos dependen de modelos físicos, ya que estos pueden requerir una cantidad considerable de tiempo para la simulación. Por esta razón, se han desarrollado enfoques para lograr simulaciones en tiempo real utilizando hardware gráfico programable, como se ejemplifica en el trabajo "Realistic real-time rain rendering. Computers & Graphics" [9]. Además, los métodos basados en algoritmos que se centran en las características espaciotemporales y la intensidad de la lluvia, como se discute en el trabajo "Vision and rain. International Journal of Computer Vision" [2], han sentado las bases para futuras investigaciones en la simulación de este fenómeno.
De manera similar, algunos enfoques se basan en superponer mallas o capas de lluvia en la superficie de la imagen para lograr la simulación deseada. La creación de estas capas puede seguir diferentes métodos, incluyendo enfoques basados en Python, como se presenta en el trabajo "A method for simulating rain through Motion Blur and salt-and-pepper noise" [10].
Además, se han desarrollado métodos innovadores para mejorar la síntesis de imágenes de lluvia. Por ejemplo, SyRaGAN es un método que mejora la síntesis de imágenes de lluvia adaptándose al contenido de las imágenes originales. Utiliza la tecnología de Redes Generativas Antagónicas (GAN) para generar trazos de lluvia realistas, mapeando un espacio de ruido al espacio de representación de trazos de lluvia. Aprende de seis conjuntos de datos de lluvia existentes para lograr una mayor autenticidad en las imágenes de lluvia sintética [11].
Otro enfoque notable se propone en "Joint Rain Detection and Removal from a Single Image with Contextualized Deep Networks." Este método se compara con los métodos más avanzados en la eliminación de trazos de lluvia de las imágenes, utilizando varios conjuntos de datos de referencia, incluyendo Rain12, Rain100L, Rain20L y Rain100H. Se enfatiza la diversa síntesis de imágenes de lluvia para el entrenamiento, lo que puede mejorar la capacidad de la red. Las métricas de evaluación incluyen la Relación Señal-Ruido de Pico y el Índice de Similitud Estructural en el canal de luminancia [12].

Además, trabajos como "From Rain Generation to Rain Removal" crean un modelo generativo que representa la lluvia como un generador en un marco bayesiano. Se emplea un algoritmo de inferencia

especializado para aprender la distribución general de imágenes de lluvia y trazos de lluvia a partir de datos de entrenamiento, permitiendo la generación libre de imágenes de lluvia con diferentes formas [13].

Estos son solo algunos ejemplos de los trabajos que se han realizado hasta la fecha en el campo de la simulación de lluvia sintética.

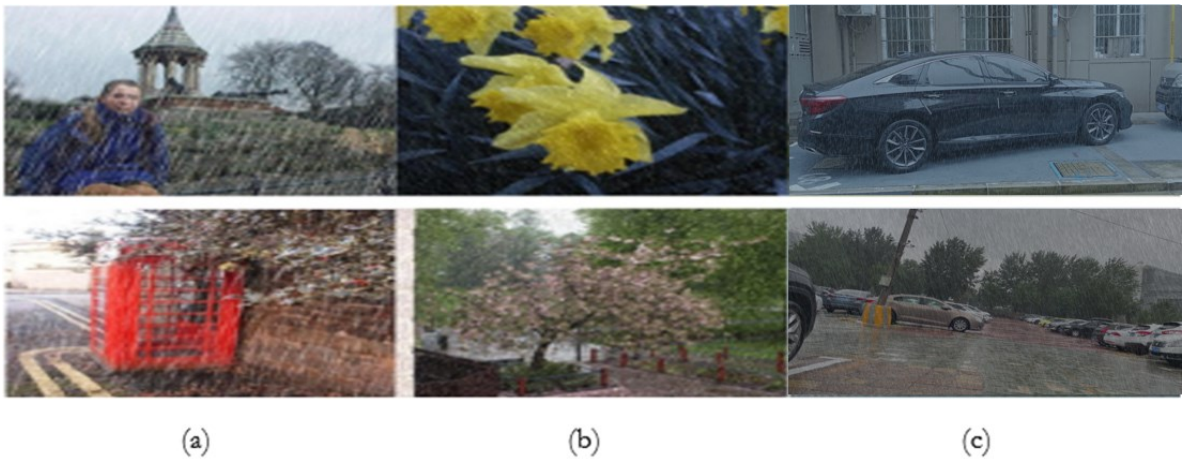


Fig. 1 Comparación de métodos anteriores con método de Blender, (a) método de Photoshop, (b) método de desenfoque de movimiento y ruido sal y pimienta, (c) método propuesto. Imágenes de (a) y (b) tomadas de Romero-Olmos, R. C., Salazar-Colores, S., Moreno-Jiménez, H., & Flores, G. Un método para simular lluvia utilizando desenfoque de movimiento y ruido sal y pimienta.

Motivación

Mejorar los métodos que pueden simular el efecto de la lluvia en imágenes y videos de manera cada vez más realista podría llevar a la creación de conjuntos de datos más robustos. Como se mencionó anteriormente, esto tendría un impacto significativo en el entrenamiento y el rendimiento de los métodos basados en aprendizaje profundo, que actualmente son una de las principales vías para abordar el problema de la eliminación de la lluvia, como se evidencia en los trabajos de [15], [15], [16]. La importancia de crear conjuntos de datos de alta calidad es crucial en este contexto.

Contribución

La creación de una base de datos diseñadas con herramientas novedosas como lo son un software de animación y gráficos tridimensionales como Blender y una red generativa adversarial como lo es CycleGAN permite trabajar en entornos más complejos y realistas. Esto se debe a que podemos abordar efectos que otros métodos no pueden tratar, ya que están limitados por un espacio bidimensional o delimitantes del software que se usa. Por lo tanto, estos enfoques pueden establecer una nueva dirección que permite un enfoque más integral para lograr una representación de lluvia sintética de alta calidad.

PARTE EXPERIMENTAL

En la próxima sección de este documento, se introducirá las ideas principales de los métodos propuestos para simular lluvia sintética. Se proporcionará una visión general de los procedimientos y se compartirán los resultados obtenidos, para que la encuesta sea lo más objetiva posible se usó la misma base de datos para las imágenes reales y la creación de las imágenes con lluvia sintética, la cual es LHP-Rain [17].

Método de Blender

La recreación de fenómenos naturales resulta ser una tarea compleja, ya que involucra situaciones en las que múltiples características se combinan para dar forma a un fenómeno particular, y la lluvia no es una excepción. Un aspecto que falta en los métodos anteriores de simulación de lluvia es la

incorporación del efecto tridimensional. Estos métodos anteriores se limitan a agregar una capa de lluvia a una imagen preexistente. En contraste, un enfoque que utilice software de modelado 3D, como Blender, permite la integración de esta característica en la recreación de la lluvia en la imagen. De esta manera, es posible crear una base de datos de mayor calidad que facilite un entrenamiento más efectivo para los sistemas basados en redes neuronales, como se ilustra en la Fig. 1, que proporciona una comparación con otros métodos ya existentes.

El método de Blender tiene, como una de sus principales características, el soporte del software de modelado 3D, como se explicó anteriormente. Esto es beneficioso al incorporar fenómenos como velocidad, luz, viento, entre otros factores, en la simulación de la lluvia, ya que software como Blender optimiza esta integración.

Primero, se crea un modelo 2.5-D de la imagen para obtener la profundidad dentro de ella, utilizando la imagen original y el mapa de profundidad, como se muestra en la Fig. 2-(a) y (b). Un código en Python en Blender automatiza la generación del modelo 2.5-D, incorporando características de profundidad, como se ve en la Fig. 2-(c). Luego, la imagen principal se superpone como textura en el modelo 2.5-D, resultando en modelos realistas útiles para el aprendizaje profundo, como se ilustra en la Fig. 2-(d).

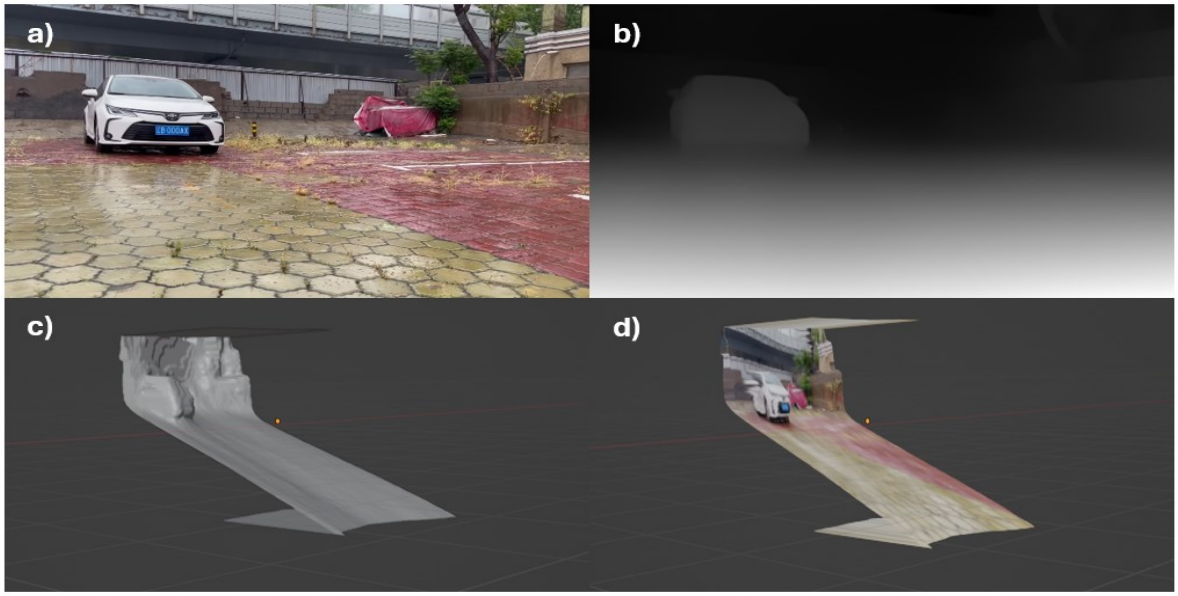


Fig. 2 Creación del Modelo 2.5-D, (a) Imagen original, (b) Mapa de profundidad, (c) Creación del modelo 2.5-D sin imagen, (d) Modelo 2.5-D con la imagen original colocada como textura.

A continuación, se simula la lluvia con alta fidelidad en Blender. Se generan partículas en un rango de 187.5 mil a 3 millones y se configura un emisor para recrear el efecto de la lluvia. Además, se aplican ajustes de textura y color para lograr una apariencia auténtica, como se muestra en la Fig. 3 Finalmente, se fusionan el modelo 2.5-D y la simulación de lluvia, ajustando la saturación para representar diferentes niveles de intensidad de lluvia. Se asegura una representación auténtica al capturar la imagen, como se detalla en la Fig. 4

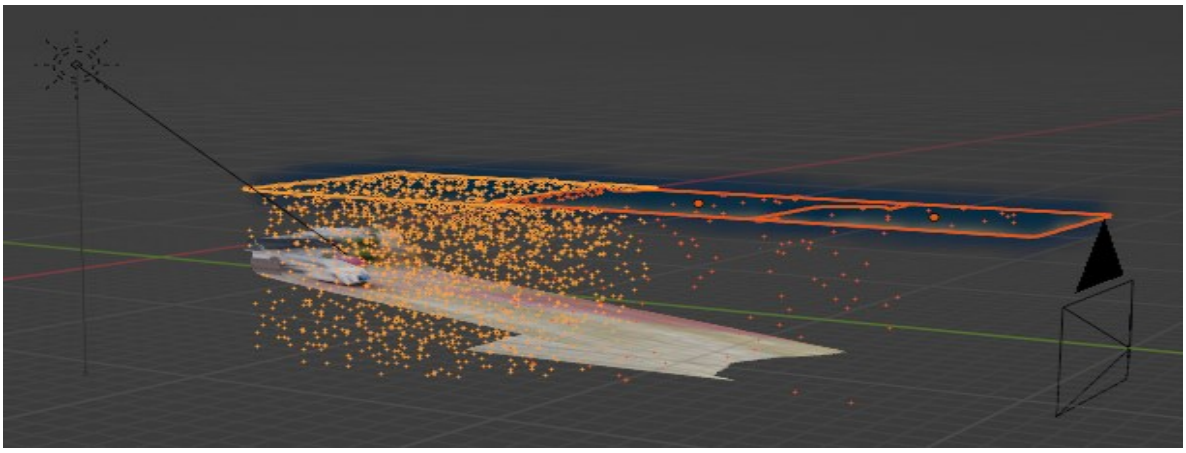


Fig. 3 Simulación de Lluvia, ensamblaje final de la escena incluyendo elementos como luz, cámara, modelo 2.5-D y emisor de partículas para recrear la lluvia.

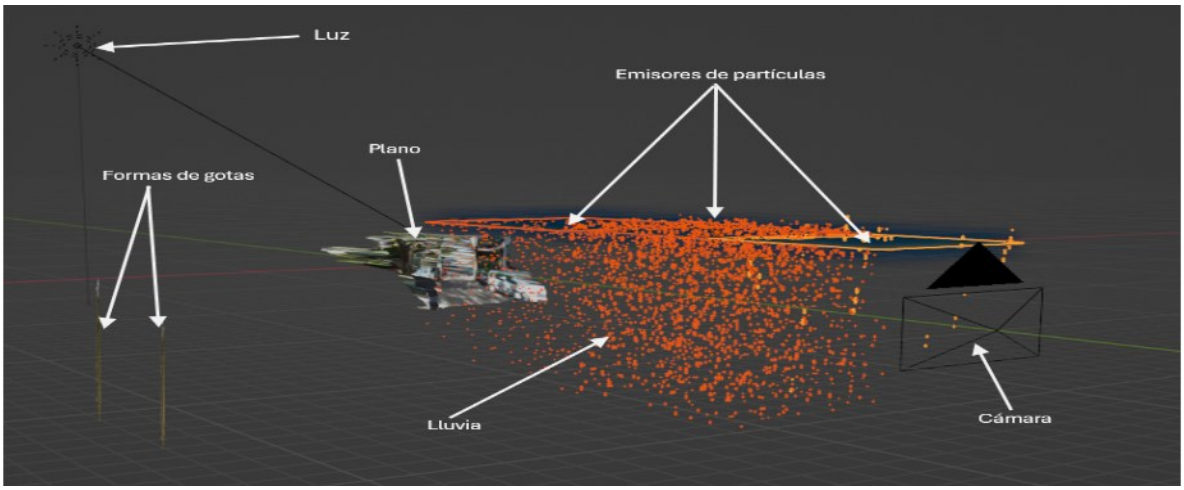


Fig. 4 Combinación de emisores de partículas con modelo 2.5D

Método de heurístico

Este método toma como base el modelo de lluvias intensas o HRM por sus siglas en ingles [18], basado en la ecuación que se muestra en la Fig. 5. Los significados de las variables son los siguientes:

- O: Imagen con lluvia.
- T: Mapa de profundidad.
- B: Imagen limpia o sin lluvia.
- S: Racha de lluvia.
- A: Luz atmosférica.

Estas variables son necesarias para el modelo de lluvias intensas, la variable de rachas de lluvia fue obtenida por medio de Blender el cual nos permitió trabajar diferentes tamaños, formas de gota, la dirección y la saturación en la racha de lluvia, la imagen sin lluvia fue obtenida por la base de datos que se uso para este trabajo. Ya que la base de datos LHP-Rain no contaba con mapas de profundidad de sus imágenes, se realizo un código con la librería torch que es parte del ecosistema PyTorch.

Teniendo todo esto, se diseñó un código en el lenguaje de Python que trabajara con una carpeta de las rachas de lluvia, colocando a la imagen real una o más capas de forma aleatoria de las rachas de lluvia, también pudiera modificar la luz atmosférica y el mapa de profundidad.

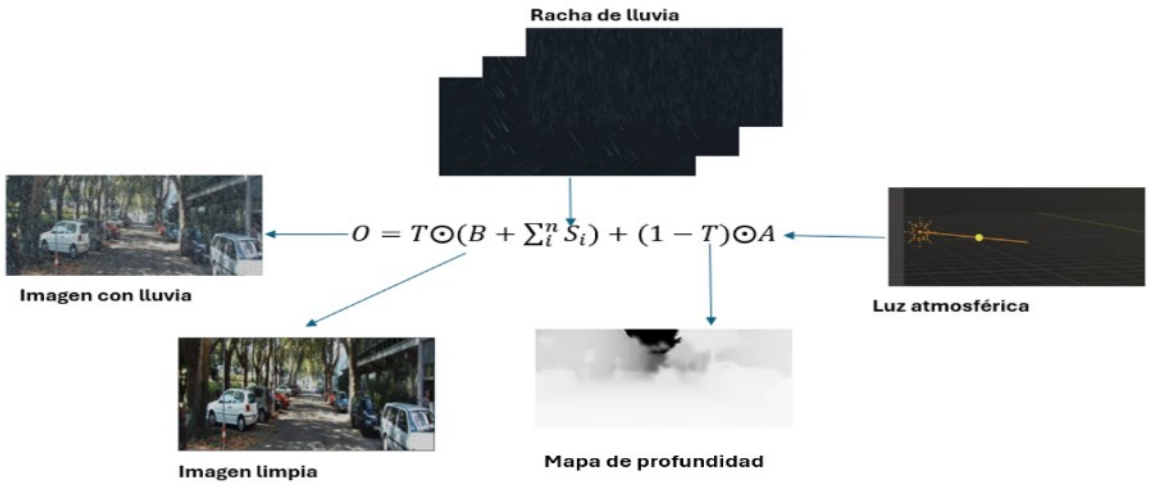


Fig. 5 Modelo de lluvias intensas (HRM).

Método de CycleGAN

Para el método de CycleGAN se utiliza el código de CycleGAN de Google Colab [19]. Dicha arquitectura se muestra en la Fig. 6. Para este método se vuelve a usar la base de datos LHP-Rain para el entrenamiento de la red, haciendo uso de las 2100 imágenes sin lluvia y las 2100 imágenes con lluvia. De los tres métodos ya mencionados, este fue el más sencillo de obtener. Una vez obtenida la base de datos con la que se entrenaría la red, se prepara el entorno para poder ejecutarla con un total de 1000 épocas. Lo que hace esta red es tener un generador que se encarga de crear datos sintéticos, los cuales son pasados a un discriminador que evalúa los datos del generador y los regresa mientras aún sepa que el trabajo del generador es falso, proporcionando retroalimentación para el generador. Este proceso continúa hasta que el discriminador no pueda distinguir si los datos son reales o no [20].

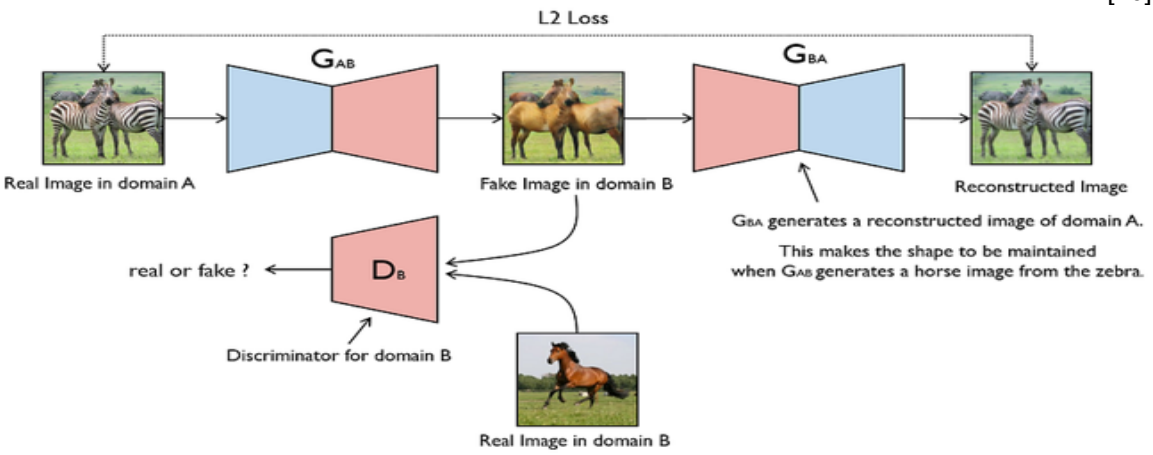


Fig. 6 Ejemplificación de la arquitectura de CycleGAN, recuperado de [20].

Para el cuarto método nombrado CycleGAN-Blender se modificó la carpeta de las imágenes con lluvia por imágenes de lluvia sintética hechas en Blender. De la misma forma se hizo con el quinto método nombrado CycleGAN-Heurística. El número de épocas fue 1000 para cada uno de los métodos mencionados.

Por último, para evaluar la aceptación de los métodos propuestos, se realizó una encuesta empírica, solicitando la opinión de una muestra de individuos sobre los cinco métodos propuestos versus imágenes reales, en la Fig. 7 se muestra una comparativa de la misma imagen real con lluvia y luego la modificación de la imagen sin lluvia con los 5 métodos mencionados en este trabajo. La motivación

para realizar esta encuesta empírica se basa en la efectividad de estudios previos que emplearon un enfoque similar, como se evidencia en el trabajo titulado "DeSmoke-LAP: improved unpaired image-to-image translation for desmoking in laparoscopic surgery". Este estudio incluyó un análisis cualitativo a través de un estudio de usuarios, en el cual los participantes evaluaron los videos generados por cada método [21].

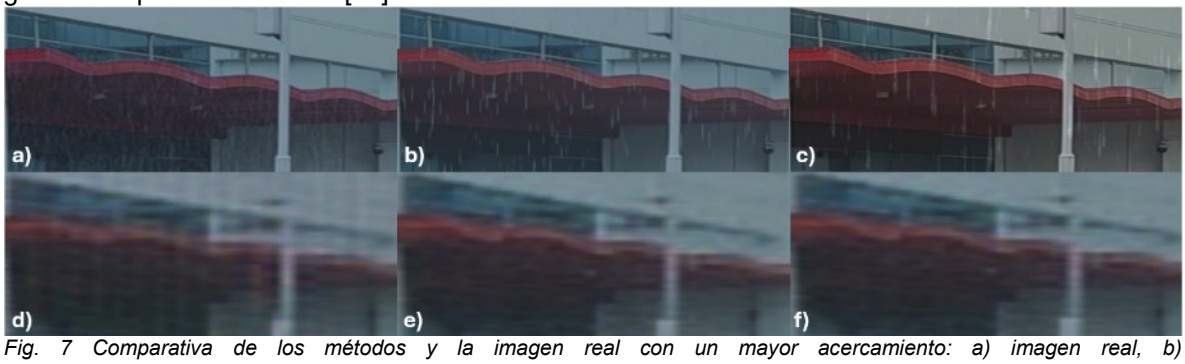


Fig. 7 Comparativa de los métodos y la imagen real con un mayor acercamiento: a) imagen real, b) método de Blender, c) método heurístico, d) CycleGAN, e) CycleGAN-Blender y f) CycleGAN.

RESULTADOS

Como parte integral de los resultados, las encuestas constaban de 12 reactivos y fueron realizadas por 100 personas, para que la muestra poblacional fuera significativa. Como se muestra en la figura Fig. 8, los métodos más aceptados por los encuestados fueron el método de Blender, el método heurístico y las imágenes reales, siendo estas dos últimas las más aceptadas, con un mínimo del 20% de los votos en cada uno de los reactivos de la encuesta. Desafortunadamente, los métodos que usaban CycleGAN fueron los menos aceptados, y esto se puede deber a la calidad de las imágenes generadas por estos métodos.

El método heurístico recibió una aceptación significativa. Este método, que se basa en reglas empíricas y ajustes manuales para simular la lluvia, ofrece un equilibrio entre complejidad y realismo, lo que lo hace favorable para ciertas aplicaciones. La capacidad de ajustar manualmente los parámetros permitió a los usuarios obtener resultados visualmente agradables y convincentes.

Por otro lado, el método de Blender fue también bien recibido debido a su capacidad para integrar fenómenos como velocidad, luz y viento en la simulación de lluvia, lo que resulta en imágenes muy realistas. Este método se destacó especialmente en términos de profundidad y efectos de iluminación, factores que fueron altamente valorados por los participantes.

Las imágenes reales, no obstante, siguen siendo el estándar de oro en términos de aceptación, ya que proporcionan la referencia más precisa y natural posible para la percepción de la lluvia en las imágenes. La preferencia por las imágenes reales destaca la importancia de la fidelidad visual y la autenticidad en la simulación de fenómenos naturales.

En contraste, los métodos basados en CycleGAN tuvieron una menor aceptación. Esto podría deberse a que las imágenes generadas por CycleGAN aún presentan ciertas imperfecciones y artefactos que afectan la percepción de realismo. A pesar de su potencial en la generación de datos sintéticos, es evidente que se requiere una mejora en la calidad de las imágenes producidas por estas redes para alcanzar un nivel de aceptación comparable al de los otros métodos evaluados.

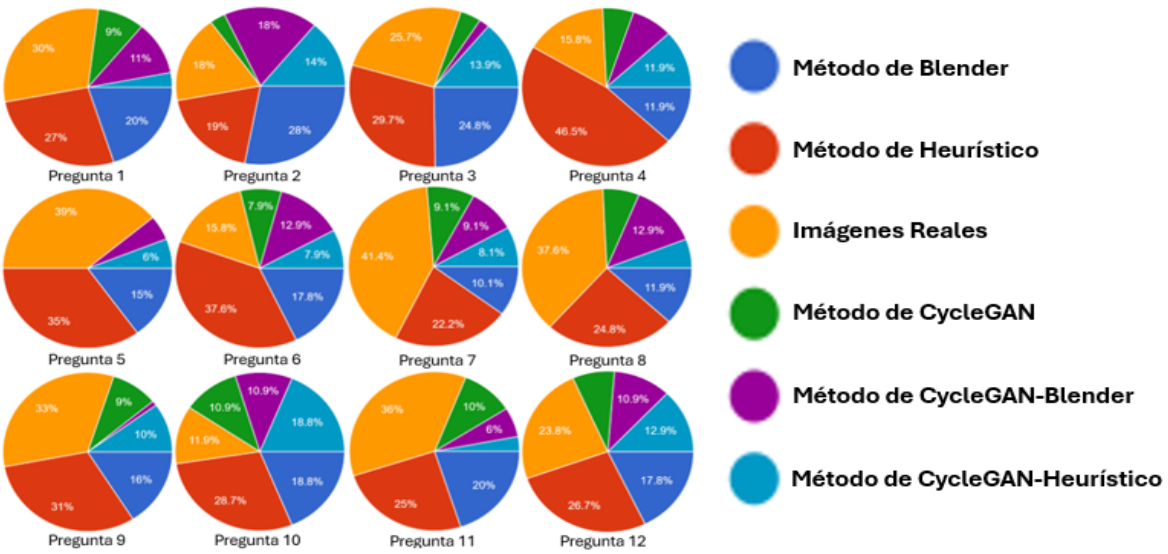


Fig. 8 Graficas de pastel de los 12 reactivos.

Analizando más a detalle los resultados de la encuesta, en la Fig. 9-(a) se observa que de los 12 reactivos, 6 fueron ganados por las imágenes reales, 5 por el método heurístico y 1 por el método de Blender. En la Fig. 9-(b), de los 1206 votos que se obtuvieron en la encuesta, un total de 356 votos fueron para el método heurístico, 329 para las imágenes reales, 213 para el método de Blender, y los métodos de CycleGAN obtuvieron valores cercanos a los 100 votos.

Lo interesante que se puede observar es que en la Fig. 9-(a), las imágenes reales son las que tuvieron un mayor número de reactivos a favor, pero en la Fig. 9-(b) fue el método heurístico el que recibió un mayor número de votos. Esto sugiere que, aunque las imágenes reales fueron las más preferidas en términos de número de reactivos, el método heurístico logró una mayor aceptación general en términos de votos totales. Esta disparidad podría ser indicativa de la versatilidad y efectividad percibida del método heurístico en una gama más amplia de situaciones o preferencias individuales. Por lo observado tanto en la Fig. 8 y la Fig. 9, de que sólo el método heurístico es muy similar a las imágenes reales, por lo que para la creación de la base de datos se crearon imágenes con el método heurístico e imágenes con el método de Blender el cual se encontrara en la siguiente liga https://drive.google.com/drive/folders/1rrzsX9GfVKPPQsSQLpvT4ZV9BknN1h44?usp=drive_link.

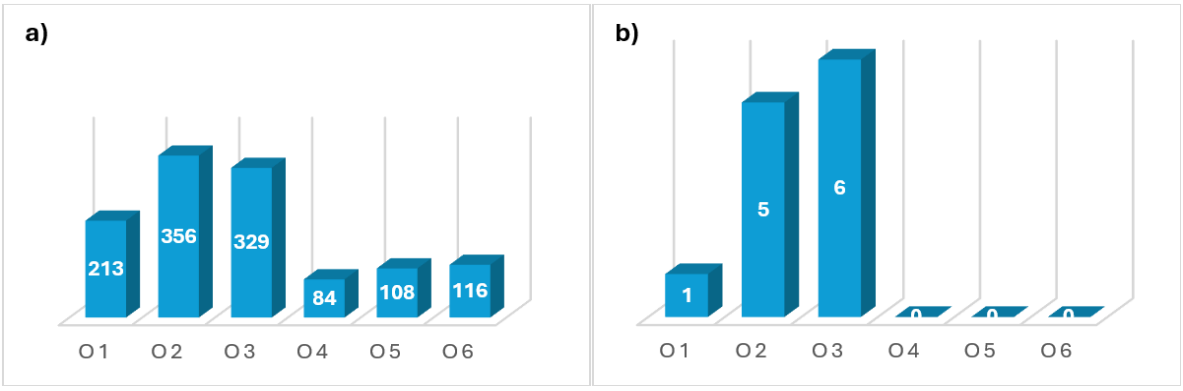


Fig. 9 Grafica de resultados, a) número total de votos, b) número de reactivos ganados por cada.

CONCLUSIONES

Este estudio marca buenas tendencias para la fabricación de bases de datos de lluvia sintética, el usar un software de modelado 3D como Blender, permite trabajar con fenómenos como lo son la lluvia, desde la materiales muy cercanos a la realidad, hasta las condiciones físicas que se sufren durante un fenómeno en este caso la lluvia, sólo que la creación de escenarios es complicada lo cual llevaría tiempo, por esta razón se usaron modelos 2.5-D, para aprovechar los diferentes escenarios que ofrecía la base de datos LHP-Rain, otro punto a tomar en cuenta es el poder de cómputo necesario y el tiempo de renderizado para imágenes de buenas calidad lo que podría hablar de una limitante, pero no de alta prioridad por el avance que se ha tenido en el hardware. Métodos como el heurísticos permite aprovechar las cualidades positivas de Blender y juntarlas todas en por medio de un programa en Python, lo cual permite eliminar el tiempo de renderizado y el poder de computo que son limitantes para el método de Blender, la deficiencia de este método es que no se trabaja en un entorno tridimensional, pero aún así este método fue el más aceptado junto con las imágenes reales, teniendo casi el mismo nivel de aceptación si tomamos en cuenta los resultados obtenidos en las gráficas de la Fig. 9.

Lamentablemente los métodos basados en CycleGAN no tuvieron una buena aceptación y esto se debe a la baja calidad de las imágenes, lo que se puede deber a la base de datos utilizadas para el entrenamiento, aumentando esta misma se puede mejor los resultados o mejorando la red para diseñarla en la tarea exclusiva de creación de lluvia sintética.

Este trabajo no solo presenta una metodología detallada para la simulación de lluvia sintética, sino que también establece una dirección clara para el desarrollo futuro y el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo utilizando la base de datos prevista. Al continuar construyendo sobre estos fundamentos, se espera abrir nuevas posibilidades para el campo de la inteligencia artificial aplicada en esta área.

BIBLIOGRAFÍA

1. Feldman, I., Afonso, M. E., Rangel Ortega, E. I., Varisco, S., Peralta Arriaga, W., & Anaya Baldeón, M. J. (2019). CycleGAN. Grupo Gemis. https://grupogemis.com.ar/wp-content/uploads/2021/08/CycleGAN.pdf
2. Garg, K., & Nayar, S. K. (2007). Vision and rain. International Journal of Computer Vision, 75, 3-27.
3. BBVA. (2023). Principales causas de los accidentes automovilísticos. Educación Financiera BBVA México. https://www.bbva.mx/educacion-financiera/seguros/principalescausas-de-los-accidentes-automovilisticos.html.
4. Garg, K., & Nayar, S. K. (2004, June). Detection and removal of rain from videos. In Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. (Vol. 1, pp. I-I). IEEE.
5. Fu, X., Huang, J., Ding, X., Liao, Y., & Paisley, J. (2017). Clearing the skies: A deep network architecture for single-image rain removal. IEEE Transactions on Image Processing, 26(6), 2944-2956.
6. Rasley, J., Rajbhandari, S., Ruwase, O., & He, Y. (2020, August). Deepspeed: System optimizations enable training deep learning models with over 100 billion parameters. In Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (pp. 3505-3506).
7. Tremblay, M., Halder, S. S., De Charette, R., & Lalonde, J. F. (2021). Rain rendering for evaluating and improving robustness to bad weather. International Journal of Computer Vision, 129, 341-360.
8. Liu, S., Cheng, H., & Tong, Y. (2019). Physically-based statistical simulation of rain sound. ACM Transactions on Graphics (TOG), 38(4), 1-14.
9. Rousseau, P., Jolivet, V., & Ghazanfarpour, D. (2006). Realistic real-time rain rendering. Computers & Graphics, 30(4), 507-518.

10. Romero-Olmos, R. C., Salazar-Colores, S., Moreno-Jiménez, H., & Flores, G. (2022). Un método para simular lluvia mediante Motion Blur y ruido sal y pimienta.
11. Choi, J., Kim, D. H., Lee, S., Lee, S. H., & Song, B. C. (2022). Synthesized rain images for deraining algorithms. Neurocomputing, 492, 421-439.
12. Yang, W., Tan, R. T., Feng, J., Guo, Z., Yan, S., & Liu, J. (2019). Joint rain detection and removal from a single image with contextualized deep networks. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 42(6), 1377-1393.
13. Wang, H., Yue, Z., Xie, Q., Zhao, Q., Zheng, Y., & Meng, D. (2021). From rain generation to rain removal. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 14791-14801).
14. Yang, W., Tan, R. T., Wang, S., Fang, Y., & Liu, J. (2020). Single image deraining: From model-based to data-driven and beyond. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 43(11), 4059-4077.
15. Lin, C. Y., Tao, Z., Xu, A. S., Kang, L. W., & Akhyar, F. (2020). Sequential dual attention network for rain streak removal in a single image. IEEE Transactions on Image Processing, 29, 9250-9265.
16. Wang, H., Wu, Y., Li, M., Zhao, Q., & Meng, D. (2019). A survey on rain removal from video and single image. arXiv preprint arXiv:1909.08326.
17. Guo, Y., Xiao, X., Chang, Y., Deng, S., & Yan, L. (2023). From sky to the ground: A large-scale benchmark and simple baseline towards real rain removal. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 12097-12107).
18. Zhang, Z., Wei, Y., Zhang, H., Yang, Y., Yan, S., & Wang, M. (2023). Data-driven single image deraining: A comprehensive review and new perspectives. Pattern Recognition, 109740.
19. Google Colab. (n.d.). CycleGAN tutorial. GitHub. Retrieved Feb 14, 2024, from https://colab.research.google.com/github/tensorflow/docs/blob/master/site/en/tutorials/generative/cyclegan.ipynb.
20. Sushen, D. (2020, May 18). Image-to-image translation using CycleGAN model. Towards Data Science. Retrieved May 1, 2024, from https://towardsdatascience.com/image-to-image-translation-using-cyclegan-model-d58cfff04755.
21. Pan, Y., Bano, S., Vasconcelos, F., Park, H., Jeong, T. T., & Stoyanov, D. (2022). DeSmoke-LAP: improved unpaired image-to-image translation for desmoking in laparoscopic surgery. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 17(5), 885-893.

ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA MARCHA CON PESO EN ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS

Pedro Tule Murillo[1], José Juan León Meza[1], Cuauhtémoc Acosta Lúa[1], Claudia Carolina Vaca García[1] y María Eugenia Sánchez Morales[1].

[1]Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara
eugenia.sanchez@academicos.udg.mx

RESUMEN

El análisis biomecánico de movimientos implica el estudio de las fuerzas y los momentos que actúan sobre el cuerpo humano durante la realización de diversas actividades o movimientos. Este análisis tiene como objetivo comprender la mecánica del cuerpo humano para optimizar el rendimiento, prevenir lesiones y mejorar la eficiencia del movimiento. En este estudio, se analizó la marcha de una muestra de estudiantes universitarios, mediante el sistema de cámaras Motio de STTSYSTEMS y el software 3DMA de análisis y captura de movimiento óptico 3D, reproduciendo en un ambiente controlado la carga de mochilas tipo backpack de varios pesos en posiciones diferentes. En comparación de la marcha normal sin peso, se pudieron observar cambios en el ritmo y la longitud de la zancada, presentando un decremento inversamente proporcional al peso cargado, así como una alteración en la postura para equilibrar el peso adicional. En un estudio previo (Solís et al, 2023), se efectuó un análisis similar utilizando goniómetros colocados en las rodillas y conectados a una Xplorer GLX Datalogger de PASCO, donde se observó que cuando se carga la mochila en uno de los hombros, aumenta el apoyo en la rodilla contraria, lo cual es corroborado con lo obtenido en este estudio. Esta demanda adicional en el sistema musculoesquelético provoca fatiga que afecta la eficiencia de la marcha y, a largo plazo, genera lesiones oseomusculares que requieren atención médica. Para atenuar el impacto negativo al que se ve sometido el cuerpo, se recomienda utilizar mochilas con diseños ergonómicos, distribuir el peso de manera uniforme, reducir la carga eliminando artículos no indispensables, ajustar apropiadamente las correas en ambos hombros y evitar cargar la mochila en un solo hombro.

INTRODUCCIÓN

En el centro Universitario de la Ciénega (CUCIÉNEGA) se realizó la investigación sobre el análisis biomecánico de la marcha con peso en estudiantes universitarios en el cual la comparativa a resaltar van ser sobre la marcha que ejerce el estudiante sin un peso adicional y al estar afectado con un peso adicional y analizar que detalles pueden que ocasionen una lesión.

El caminado es una parte esencial en nuestras vidas que conlleva la gran parte de las actividades que realizamos, es así que tener una carga en los hombros a la hora de efectuar un recorrido hace que se tengan modificaciones, ya sea en la postura o en la forma del caminado.

MARCO TEÓRICO

La marcha humana es un proceso biomecánico y fisiológico que permite a una persona desplazarse de un lugar a otro de manera rítmica y secuencial. Este proceso involucra una serie de movimientos coordinados del cuerpo, incluyendo tanto las extremidades como el tronco. Uno de los objetivos principales de la marcha es minimizar el gasto energético. Además, es fundamental que los movimientos sean simétricos y armoniosos para lograr una marcha eficiente y equilibrada (Ranz, 2023).
Si se realiza una marcha incorrecta se puede generar graves consecuencias en la condición física, como la osteoartritis y los desequilibrios musculares, lo que incrementa la propensión a caídas. Además, afecta la postura y puede causar problemas en la espalda, el cuello y los hombros, provocando dolor crónico. También puede contribuir al aumento de peso y afecciones cardiovasculares.

Una marcha inapropiada puede causar incomodidad y dolor físico, lo que genera irritabilidad, estrés y ansiedad. Estos factores pueden afectar negativamente el estado de ánimo y la calidad de vida.

Ciclo de la marcha

Es un proceso biomecánico que involucra una serie de fases específicas en la secuencia del movimiento de una persona al caminar. Se compone de dos principales fases. Fase de apoyo y fase de balanceo.

La fase de apoyo hace referencia cuando una pierna esta en contacto con el suelo, mientras que la otra pierna se encuentra en fase de balanceo.

Fase de apoyo

1. Contacto del talón.
2. Apoyo medio del pie.
3. Elevación del talón.

Fase de balanceo

1. Balanceo inicial: la pierna que despega avanza hacia adelante.
2. Balanceo medio: La cadera alcanza su flexión máxima, y el pie se acerca a su punto más alto en el aire.
3. Balanceo terminal: La pierna completa el movimiento hacia adelante.

Necesitamos unos parámetros y referencias para estudiar el ciclo de la marcha, pero existe variaciones entre las personas, ya sea por la altura, peso, edad o calzado.

- Largo del paso.
- Zancada.
- Ancho.
- Velocidad.
- Cadencia.
- Angulo.

Análisis de la biomecánica en la marcha

Los análisis de la biomecánica en la marcha son procesos integrales que combinan los métodos y herramientas para obtener una compresión mejor del proceso (Pmedic, s.f.).

- Análisis visual: se observará la forma en que la persona camina, prestando atención a aspectos como la postura, el equilibrio, la alineación de las extremidades y la simetría del movimiento. Se buscarán anomalías visibles.
- Análisis de la pisada: Esto permite identificar áreas de alta presión o puntos de apoyo anormales que puedan estar contribuyendo a lesiones o desequilibrios biomecánicos.
- Estudio de la cinemática: se refiere al estudio de los movimientos articulares y angulares durante la marcha. El análisis de la cinemática proporciona información precisa sobre la calidad y la eficiencia del movimiento durante la marcha.
- Análisis de la cinética: se enfoca en las fuerzas que actúan sobre el cuerpo durante la marcha. Este análisis proporciona información valiosa sobre la distribución de fuerzas, la estabilidad y la eficiencia de la marcha.
- Evaluación funcional: Se realizar pruebas específicas para evaluar la fuerza muscular, la flexibilidad, el equilibrio y la coordinación del paciente. Estas pruebas ayudan a identificar posibles deficiencias o desequilibrios que puedan estar afectando la biomecánica de la marcha y contribuyendo a lesiones o trastornos.

Lesiones y problemas más comunes

- Lesiones articulares.
- Trastornos musculares.
- Desalineación de las articulaciones.
- Problemas en la marcha.
- Compensación y sobrecarga.

Software 3DMA de análisis y captura de movimiento óptico 3D

3DMA es un sistema de análisis biomecánico que utiliza la captura óptica del movimiento. Ofrece distintos módulos adaptados a aplicaciones específicas, como análisis de la marcha, carrera y evaluación de articulaciones, para cubrir diversas necesidades (SYSTEMS, 2023).

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta investigación fue necesario el siguiente procedimiento:

- Instalar el sistema de cámaras Motio de STTSYSTEMS y el software 3DMA.
- Conectar las cámaras a la computadora donde se encuentre el software previamente instalado.
- Calibrar: una vez dentro del programa hay que dirigirse a la parte de Configuration > Calibrate, en la cual se hará uso de la varilla con seis marcadores (figura 1), asegurando que cada marcador se encuentre a la misma distancia uno de otro. Para calibrar se necesitan 16 posiciones y la opción más recomendable del calibrado es hacerlo en forma de rectángulo y que todas las cámaras logren visualizar cada marcador (figura 2).

Figura 1. Varilla de calibración.

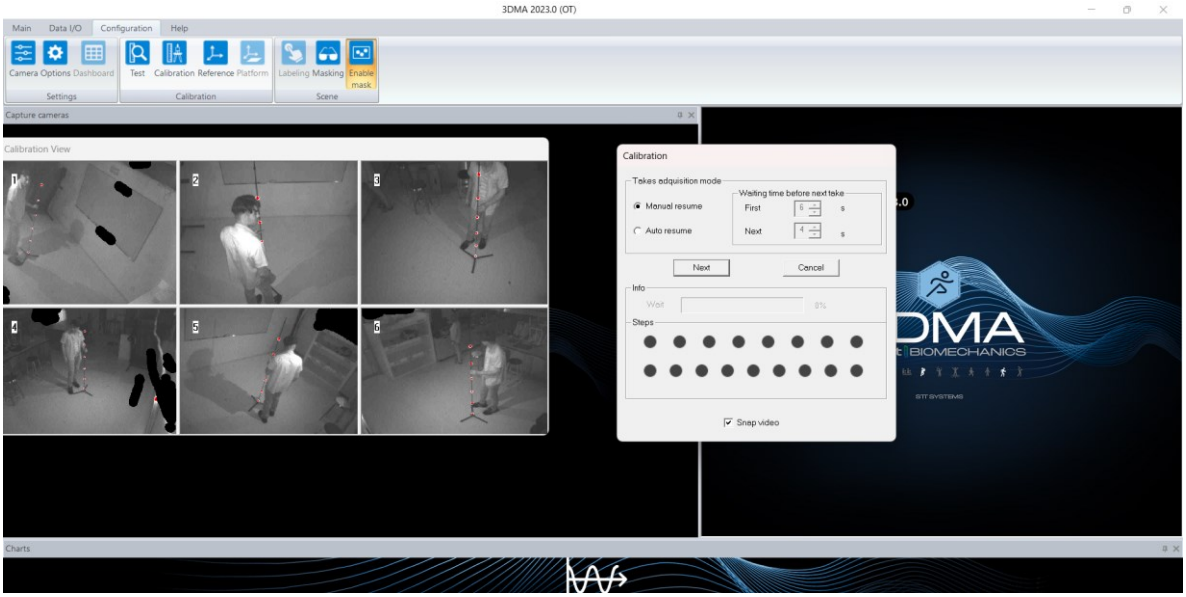


Figura 2. Calibración del sistema.

- Enmascarar puntos no requeridos en el lugar: este punto es opcional, ya que si en el lugar no se encuentran puntos de luz que interfieran con la investigación entonces no es requerido este punto. Pero si hay puntos de luz en el lugar que interfieran, con la opción de enmascarar hará que el programa no los tome en cuenta. Esta opción se encuentra en la parte de Configuration > Masking.
- Establecer el modo con el que se trabajará. En este caso se utilizó Full-body running analysis (22p).
- Colocar los marcadores requeridos a la persona que efectuará la prueba, en este caso 22 marcadores (figura 3).
- Iniciar la prueba (figura 4).
- Después de terminar con la prueba se generará el reporte en el mismo software.

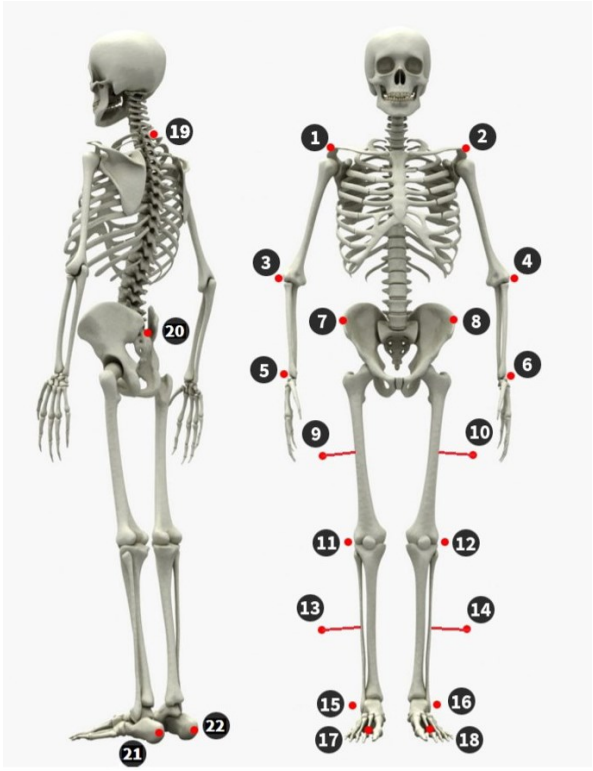


Figura 3. Posiciones de los 22 marcadores.

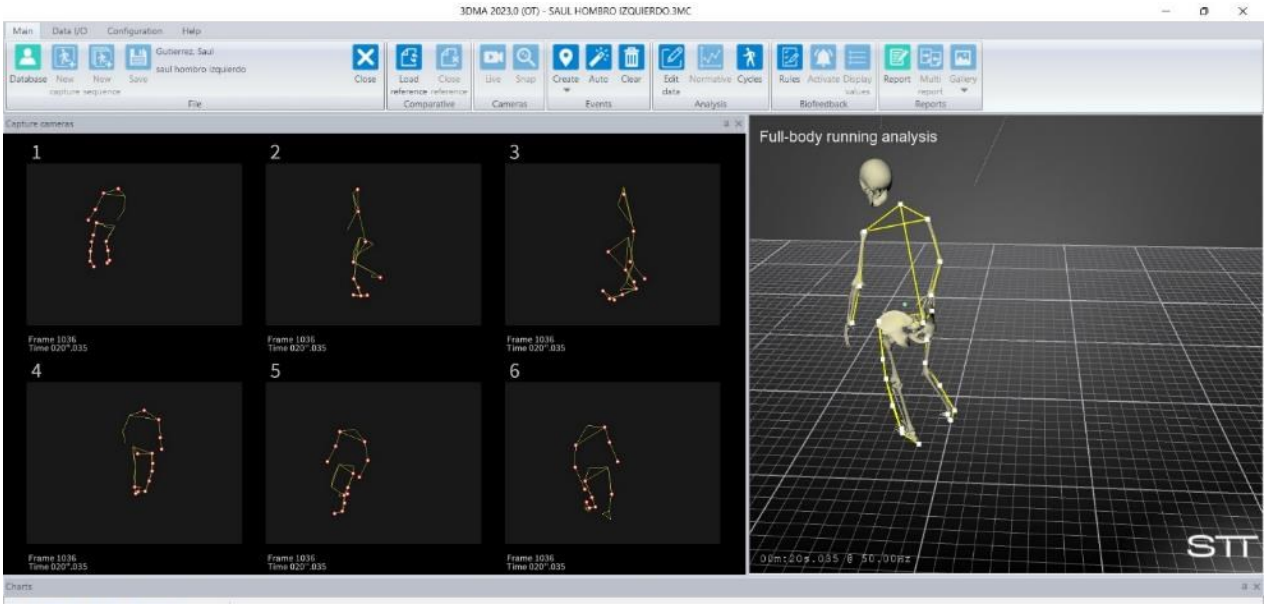


Figura 4. Prueba de marcha con peso.

Para esta investigación se llevaron a cabo un total de 105 pruebas capturadas, de las cuales se realizaron con 15 sin peso, 30 cargando la mochila con ambos hombros, 30 cargando la mochila con el hombro derecho y 30 cargando la mochila con el hombro izquierdo.

Con 15 personas voluntarias, para cada una de ellas se tomaron 7 pruebas, una sin peso, tres con peso de 3 kg y tres con 6 kg, de las tres pruebas fueron con ambos hombros, hombro izquierdo y hombro derecho, durante 30 s.

RESULTADOS

En comparación de la marcha normal sin peso, se pudieron observar cambios en el ritmo y la longitud de la zancada, presentando un decremento inversamente proporcional al peso cargado, así como una alteración en la postura para equilibrar el peso adicional. En un estudio previo (Solís et al, 2023), se efectuó un análisis similar utilizando goniómetros colocados en las rodillas y conectados a una Xplorer GLX Datalogger de PASCO, donde se observó que cuando se carga la mochila en uno de los hombros, aumenta el apoyo en la rodilla contraria, lo cual es corroborado con lo obtenido en este estudio. Esta demanda adicional en el sistema musculoesquelético provoca fatiga que afecta la eficiencia de la marcha y, a largo plazo, genera lesiones oseomusculares que requieren atención médica.

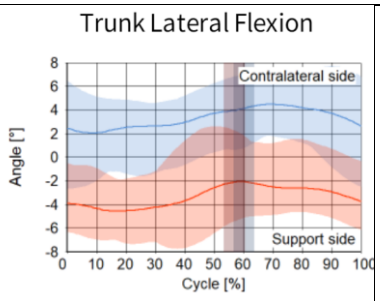


Figura 5 : Flexión lateral del tronco caminando sin peso añadido en los hombros.

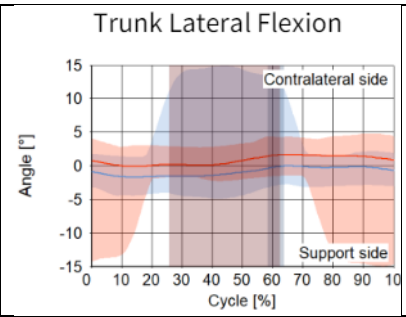


Figura 6 : Flexión lateral del tronco caminando con 3 Kg en los hombros.

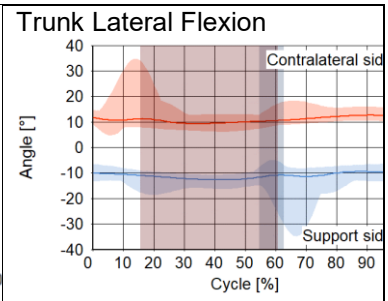


Figura 7 : Flexión lateral del tronco caminando con 6 Kg en los hombros.

En las figuras 5, 6 y 7 se pueden observar la comparación de los ángulos en la flexión lateral del tronco durante la caminata sin peso añadido, con 3 Kg y 6 Kg en los hombros.

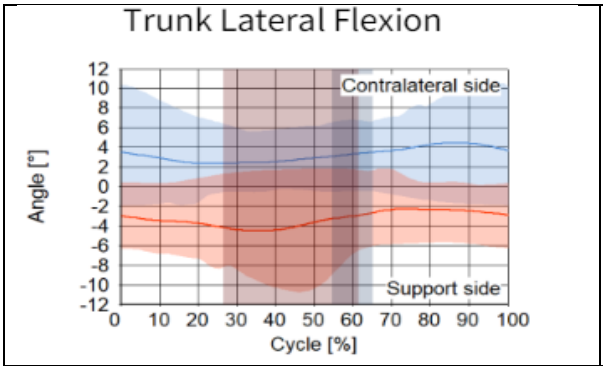


Figura 8: flexión lateral del tronco con 3 Kg en el hombro derecho.

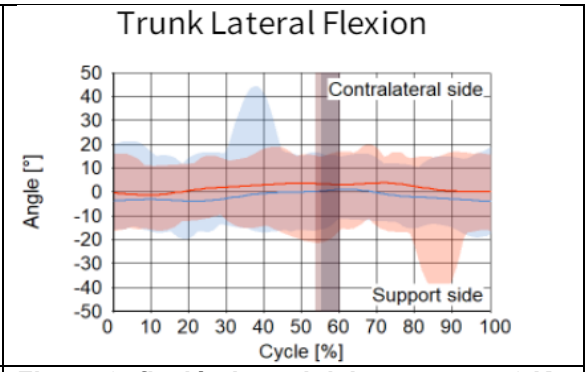


Figura 9: flexión lateral del tronco con 6 Kg en el hombro derecho.

En las figuras 8 y 9 se observa la diferencia de los ángulos de la flexión lateral del tronco durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro derecho.

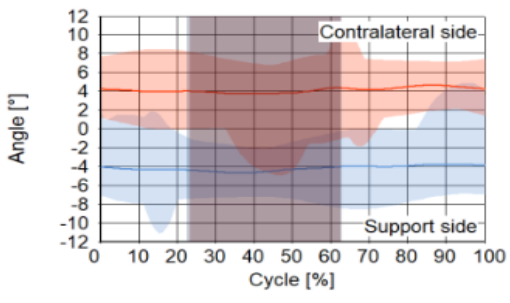


Figura 10: flexión lateral del tronco con 3 Kg en el hombro Izquierdo.

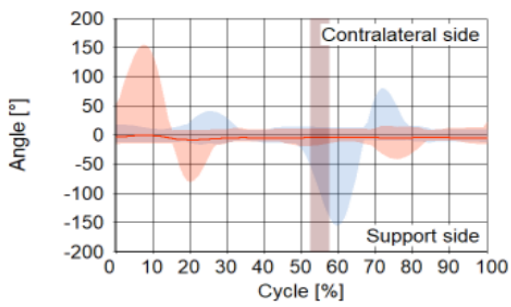


Figura 11: flexión lateral del tronco con 6 Kg en el hombro izquierdo.

En las figuras 10 y 11 se observa la diferencia de los ángulos de la flexión lateral del tronco durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro izquierdo.

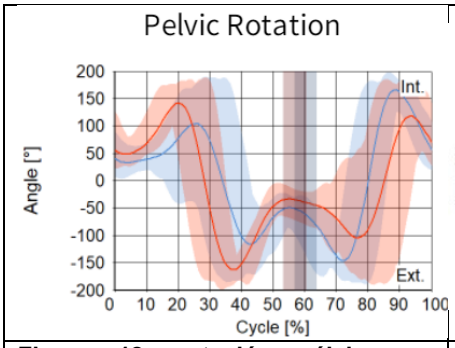


Figura 12: rotación pélvica en caminata sin peso añadido en los hombros.

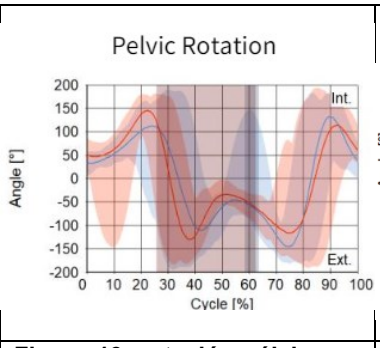


Figura 13: rotación pélvica en caminata con 3 Kg en los hombros.

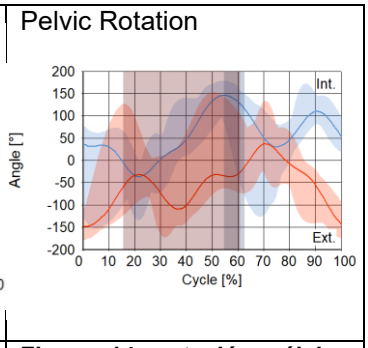


Figura 14: rotación pélvica en caminata con 6 Kg en los hombros.

En las figuras 12, 13 y 14 se pueden observar la comparación de los ángulos en la rotación pélvica durante la caminata sin peso añadido, con 3 Kg y 6 Kg en los hombros.

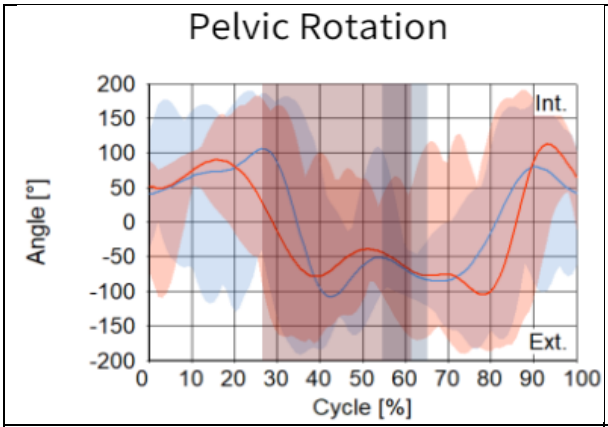


Figura 15: Rotación pélvica con 3 Kg en el hombro derecho.

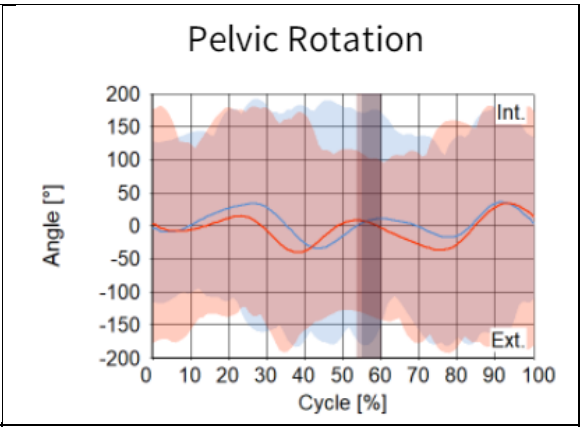


Figura 16: Rotación pélvica con 6 Kg en el hombro derecho.

En las figuras 15 y 16 se observa la diferencia de los ángulos de la rotación pélvica durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro derecho.

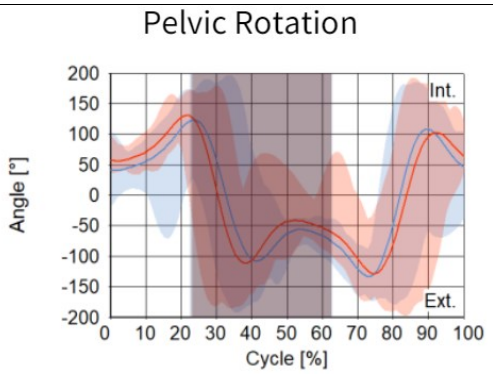


Figura 17: Rotación pélvica con 3 Kg en el hombro izquierdo.

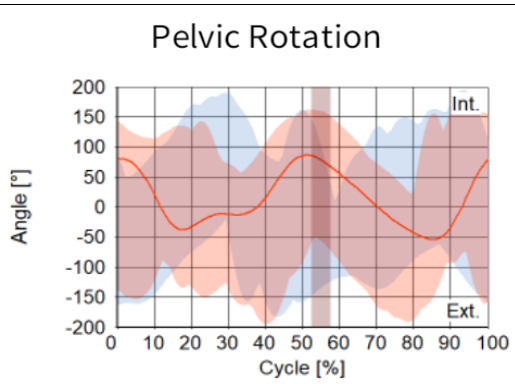


Figura 18: Rotación pélvica con 3 Kg en el hombro izquierdo.

En las figuras 17 y 18 se observa la diferencia de los ángulos de la rotación pélvica durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro izquierdo.

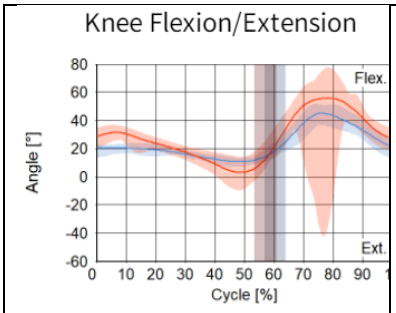


Figura 19: Flexión/extensión de la rodilla en caminata sin peso añadido en los hombros.

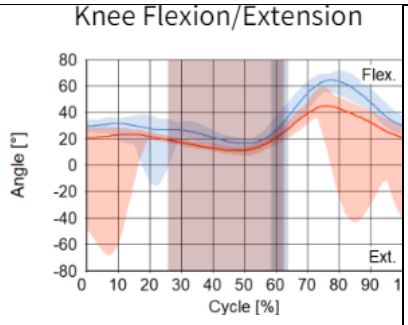


Figura 20: Flexión/extensión de la rodilla en caminata con 3 Kg en los hombros.

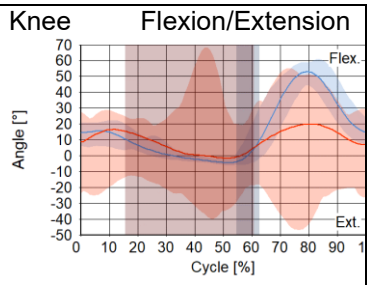


Figura 21: Flexión/extensión de la rodilla en caminata con 6 Kg en los hombros.

En las figuras 19, 20 y 21 se pueden observar la comparación de los ángulos en la flexión y extensión de la rodilla durante la caminata sin peso añadido, con 3 Kg y 6 Kg en los hombros.

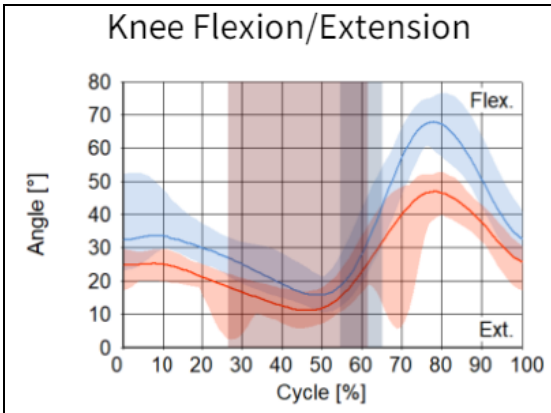


Figura 22: flexión/Extensión de la rodilla con 3 Kg en el hombro derecho.

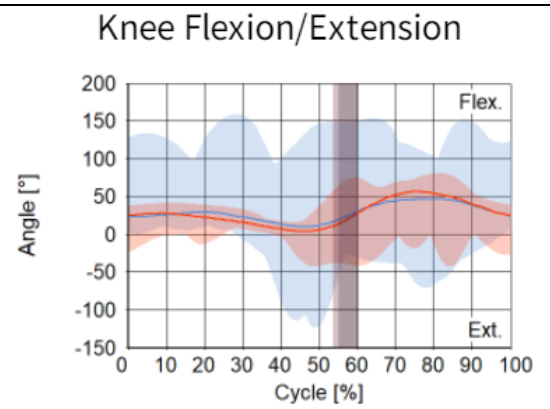


Figura 23: flexión/Extensión de la rodilla con 6 Kg en el hombro derecho.

En las figuras 22 y 23 se observa la diferencia de los ángulos en la flexión y extensión de la rodilla durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro derecho.

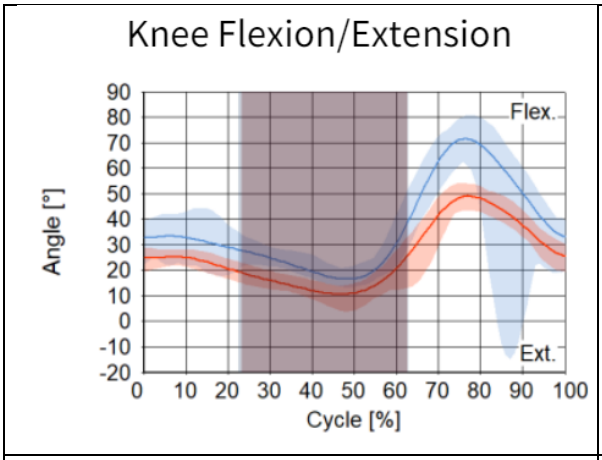


Figura 24: flexión/Extensión de la rodilla con 3 Kg en el hombro izquierdo.

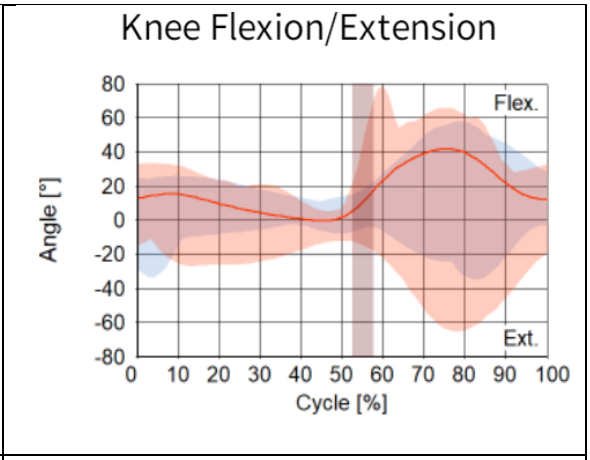


Figura 25: flexión/Extensión de la rodilla con 6 Kg en el hombro izquierdo.

En las figuras 24 y 25 se observa la diferencia de los ángulos en la flexión y extensión de la rodilla durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro izquierdo.

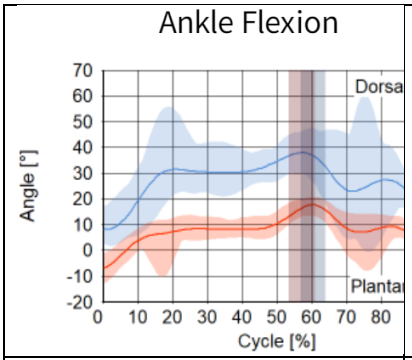


Figura 26: Flexión del tobillo en caminata sin peso añadido en los hombros.

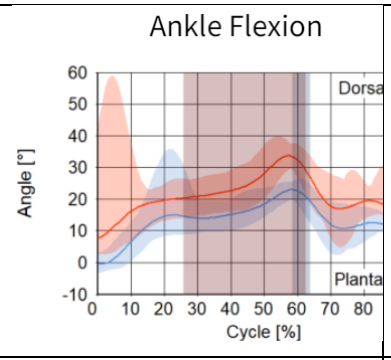


Figura 27: Flexión del tobillo en caminata con 3 Kg en los hombros.

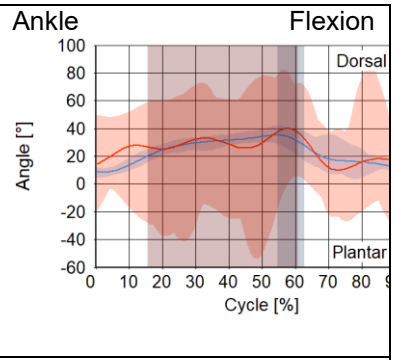


Figura 28: Flexión del tobillo en caminata con 6 Kg en los hombros.

En las figuras 26, 27 y 28 se pueden observar la comparación de los ángulos en la flexión del tobillo durante la caminata sin peso añadido, con 3 Kg y 6 Kg en los hombros.

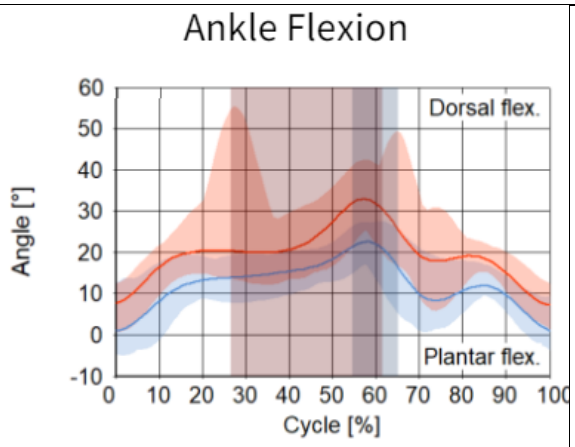


Figura 29: flexión del tobillo con 3 Kg en el hombro derecho.

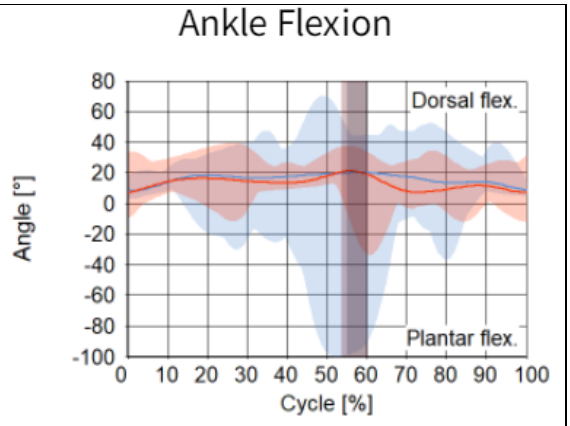


Figura 30: flexión del tobillo con 6 Kg en el hombro derecho.

En las figuras 29 y 30 se observa la diferencia de los ángulos en la flexión del tobillo durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro derecho.

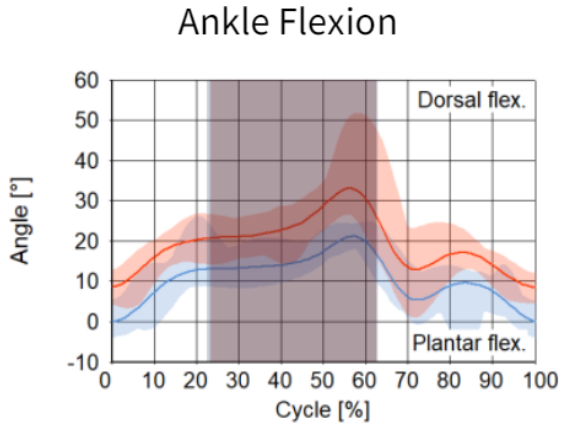


Figura 31: flexión del tobillo con 3 Kg en el hombro izquierdo.

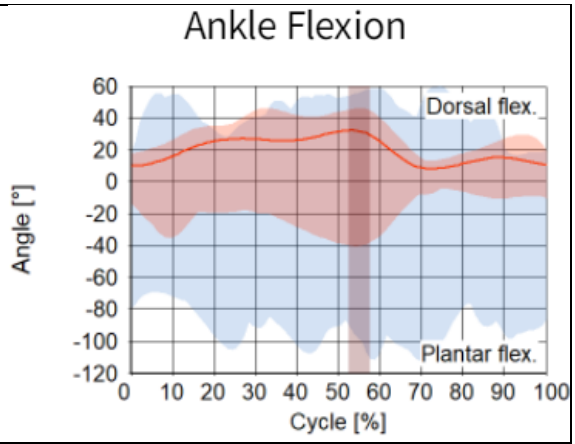


Figura 32: flexión del tobillo con 6 Kg en el hombro izquierdo.

En las figuras 31 y 32 se observa la diferencia de los ángulos en la flexión del tobillo durante la caminata con 3 Kg y 6 Kg en el hombro izquierdo.

CONCLUSIONES

Para atenuar el impacto negativo al que se ve sometido el cuerpo, se recomienda utilizar mochilas con diseños ergonómicos, distribuir el peso de manera uniforme, reducir la carga eliminando artículos no indispensables, ajustar apropiadamente las correas en ambos hombros y evitar cargar la mochila en un solo hombro.

BIBLIOGRAFÍA

Pmedic. (s.f.). *Guía completa de la biomecánica de la marcha: análisis y terapia - Pmedic*. Obtenido de Guía completa de la biomecánica de la marcha: análisis y terapia - Pmedic: https://pmedic.es/guia-completa-de-la-biomecanica-de-la-marcha-analisis-y-terapia/

Ranz, M. M. (29 de diciembre de 2023). *revista sanitaria de investigacion*. Obtenido de revista sanitaria de investigacion: https://revistasanitariadeinvestigacion.com/marcha-humana-ciclo-y-parametros-de-estudio/

SYSTEMS, S. (2023). *motio.stt*. Obtenido de motio.stt: https://motio.stt-systems.com/es/3dma-captura-y-analisis-de-movimiento-optico-3d/

Solís, A. et al (2023) Análisis del comportamiento generado por las rodillas al caminar. En Martínez, A. et al (Ed.), Investigaciones y Desarrollos Tecnológicos en México. Tomo VI Ingenierías (pp. 440-446). Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.

USO DE LA MATRIZ DE FLEXIBILIDAD PARA LOCALIZAR EL DAÑO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Bertha A. Olmos Navarrete, Guillermo Martínez Ruiz, Estrella Torres García

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
bertha.olmos@umich.mx

RESUMEN

En las últimas décadas, diversos investigadores han desarrollado metodologías para identificar y localizar daño en elementos estructurales. El daño se debe a la acción continua de las cargas de servicio, así como al efecto combinado de cargas de servicio y accidentales. Las técnicas de detección de daño permiten estudiar continuamente el estado en que se encuentran las estructuras, lo que conduce a reducir las posibilidades de su falla. Esto es particularmente relevante para estructuras importantes como los puentes, hospitales, escuelas, edificios históricos y museos, entre otras. Estas herramientas han sido muy útiles tanto para evaluar la capacidad actual de las estructuras, como para determinar sí estas son capaces de soportar las cargas actuantes más el efecto de acciones extremas como los terremotos, huracanes y tornados. Las técnicas para detectar el daño analizadas en este trabajo corresponden al grupo de pruebas no destructivas, y son muy importantes en el área de ingeniería. Entre las metodologías propuestas en la literatura se encuentra aquella que se basa en evaluar la diferencia de flexibilidad que tiene una estructura en servicio con respecto de la flexibilidad que tenía al ser construida. El método se basa en determinar los eigen-vectores, donde el objetivo es buscar un vector que muestre cambios en su matriz de flexibilidad, que es un indicador de la presencia de daño. El objetivo del presente trabajo es localizar y medir el daño en dos puentes existentes: uno peatonal y otro de tránsito vehicular. Se cuantifican sus propiedades dinámicas de estas estructuras bajo diferentes escenarios de carga que permitirán detectar la presencia de posibles daños, a través de la identificación de cambios en la matriz de flexibilidad. El análisis de los resultados permitió detectar la ubicación del daño, mediante la evaluación de cambios en las matrices de flexibilidades, a lo largo de los elementos estructurales de los puentes, mostrando las zonas donde estos elementos han tenido dañado en su ciclo de vida.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los puentes viales juegan un papel importante para el desarrollo económico de cualquier país ya que son el instrumento que permite la comunicación entre ciudades; además, permiten que las comunidades rurales tengan acceso a hospitales, escuelas y otros servicios vitales que no estarían disponibles si no existieran. Los puentes peatonales son parte fundamental de la infraestructura de una ciudad, permitiendo a las personas tener acceso a diferentes lugares donde las vías o carreteras son anchas o tienen que cruzar ríos o calles con mucho tránsito. Para cualquier ciudad o pueblo, los puentes peatonales permiten una forma rápida y fácil de comunicar los lugares. La técnica de identificación del sistema es una excelente herramienta para monitorear continuamente el estado de salud de un puente en un corto periodo de tiempo, lo cual es importante en proyectos de mantenimiento y rehabilitación para evitar daños excesivos de la estructura debido a cargas accidentales y, al mismo tiempo, permite la protección de las personas que diariamente hacen uso de la infraestructura.

Con base en la importante herramienta que es la identificación de sistemas, se determinaron las características dinámicas de dos puentes, un puente carretero ubicado en el circuito de Morelia y un puente peatonal ubicado cerca de la ciudad universitaria de Morelia, ambos en México, mediante el uso de la descomposición en el dominio de la frecuencia, técnica FDD (Zhang y col., 2005). La identificación del sistema de las estructuras se obtuvo con datos medidos de estudios de vibración ambiental. La adquisición de datos se registró mediante acelerómetros digitales de doce canales, ubicando los sensores en diferentes puntos a lo largo de las estructuras.

El presente trabajo describe la metodología utilizada para detectar daños en los elementos estructurales de los puentes mediante la implementación del método de diferencia de flexibilidad para la localización de daños en obras civiles (Pandey y Biswas, 1995).

MÉTODO DE DIFERENCIA DE FLEXIBILIDAD

Pandey y Biswas (1995) propusieron una metodología para detectar y localizar daños en las estructuras, esta solamente requiere conocer las formas modales y sus respectivas frecuencias de vibrar, resolver el problema de eigen-vectores, las cuales están asociadas a diferentes escenarios del estado físico en que se encuentran las estructuras a lo largo de su vida útil. Las propiedades dinámicas se miden en diferentes periodos de tiempo o ante diferentes condiciones de carga a que se encuentre sujeta la estructura, donde se desea tener un monitoreo o un seguimiento de la salud estructural. Implementando la técnica de vibración ambiental, se determina la información necesaria para implementar el método de Pandey and Biswas para identificar daño con un esfuerzo computacional muy bajo. En el presente trabajo, para implementar la metodología primero se evalúan las formas modales y las frecuencias mediante pruebas de vibración ambiental, los cambios que se tienen en las matrices de flexibilidad y la localización del daño se obtienen aplicando los siguientes pasos:

1. Normalización de las formas modales con respecto de la masa.

$$M_{ni} = \int_0^L \Phi_i(x)^2 m(x) dx \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{M_{ni}}$ es la masa generalizada del modo $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{\Phi_i}$ es la i-esimo modo de vibrar, y $\boldsymbol{m}$ es la masa de la estructura. Para una estructura con masa continúa, las formas modales normalizadas corresponden a las masas estimadas divididas por la raíz cuadrada de la masa generalizada.

2. Evaluación de la matriz de flexibilidades sin daño.

$$[F] = \Phi \overline{K}^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^{n} \left({}^1\!/_{\omega_i^2} \right) \phi_i \phi_i^T \tag{2}$$

3. Evaluación de la matriz de flexibilidad ante una condición de daño.

$$[F^*] = \Phi^* \overline{K^*}^{-1} \Phi^{*T} = \sum_{i=1}^{n} \left({}^1\!/_{\omega^{*2}_i} \right) \phi^*{}_i \phi^{*T}_i \tag{3}$$

4. Estimación del cambio en flexibilidad.

$$[\Delta F] = [\mathrm{F}] - [\mathrm{F}^*]^T \tag{4}$$

5. Detección de los cambios de flexibilidad en cada una las posiciones donde se realizaron mediciones de vibración ambiental.

$$\delta_j = max_i \left| \delta f_{ij} \right| \tag{5}$$

donde $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{K}$, $\boldsymbol{\Phi}$, $\boldsymbol{\omega}$ son respectivamente la matriz de flexibilidad, la matriz de rigidez, las formas y frecuencias modales una estructura sin daño; $\boldsymbol{F}^*$, $\boldsymbol{K}^*$, $\boldsymbol{\phi}^*$ y $\boldsymbol{\omega}^*$, corresponden a los mismos parámetros, pero para la condición de daño, $\boldsymbol{\Delta F}$ es el cambio en flexibilidad, y $\boldsymbol{\delta f_{ij}}$ son los elementos de $\boldsymbol{\Delta F}$. Para localizar daño se utiliza la cantidad $\boldsymbol{\delta_j}$ como medida de cambio en flexibilidad en cada localización donde se tomaron lecturas de vibración ambiental.

CASOS DE ESTUDIO

Para evaluar la metodología, se seleccionaron dos puentes ubicados en la ciudad de Morelia, Michoacán, diseñados para satisfacer condiciones de carga totalmente diferentes, el primer caso corresponde a un puente carretero, mientras que el segundo es un puente peatonal. La ida principal en estudiar dos diferentes tipos de estructuras es explorar la aproximación del método de diferencia de flexibilidades para localizar el daño en estructuras sometidas a excitaciones dinámicas que son totalmente diferentes en magnitud, donde el primer caso se encuentra sujeto a cargas grandes de tránsito vehicular mientras que el segundo caso está sujeto a pequeñas cargas dinámicas generadas por el peso de las personas caminando sobre el puente que les permite atravesar un río, por lo tanto, estas tienen diferente contenido de frecuencias.

Para la identificación de daño, primeramente, se necesita conocer las propiedades modales de las estructuras en diferentes tiempos a lo largo de su vida útil de servicio. En este trabajo, las formas modales se estimaron mediante una campaña de vibración ambiental utilizando un conjunto de acelerómetros uniaxiales y triaxiales, marca Kinemetrics, con los cuales, se midieron vibraciones ambientales en dos direcciones ortogonales y una vertical. La consola donde se hace el registro es una Kinemetrics K2 con 12 canales de registro con un convertidor analógico digital de 24 bits, que utiliza un filtro anti alias tipo Brickwall de respuesta de impulso finito de 120 dB, y nueve sensores de fuerza balanceada unidireccional Episensor ES-U2 y un instrumento de fuerza balanceada triaxial Episensor ES-T, montados en placas de aluminio de 2.4 x 35 x 35 cm. La adquisición de datos se realizó mediante registros de 200 muestras por segundo en ventanas de 10 minutos para cada medición. La Figura 1 muestra el equipo utilizado con un rango de escala completa de ±0.20g a ±4g y ancho de banda extendido de -DC a 2000 Hz. Para la identificación de los sistemas, se procesaron las señales usando el software ARTEMIS (SVS, 2014) mediante la técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia. La descripción de en cada uno de los casos de estudio, puente carretero y puente vehicular, se describen en las siguientes secciones.

Figura 1. Consola Kinemetrikcs K2, cable y sensores uniaxial y triaxial.

Puente carretero

El puente la Central Camionera está formado por cinco claros simplemente apoyados, dos con longitud de claro de 30.3 m y tres con 30.6 m de longitud. Se conforma de dos estructuras paralelas con una losa de concreto reforzado (CR) con ancho de 12.3 m y espesor de 0.20 m, soportada por nueve vigas AASHTO tipo IV que descansan sobre apoyos elastoméricos, y diafragmas colocados para proporcionar rigidez transversal al puente. La subestructura corresponde a un marco de CR formado por tres columnas unidas por un cabezal de CR. Todos los elementos de CR se diseñaron para una resistencia a compresión de 24.5 MPa, con excepción de las vigas que son presforzadas y

diseñadas para un esfuerzo de compresión de 39.2 MPa. La Figura 2 muestra la continuidad de la losa sobre las pilas 2 y 5, con juntas de expansión localizadas en los estribos y en las pilas 3 y 4.

La Figura 3 presenta una fotografía del puente durante su proceso constructivo en el año de 2014. En la fotografía se observa que las columnas que forman las pilas son de CR con sección rectangular están unidas a un cabezal con forma de arco entre los claros de las columnas, los arcos se construyeron de acero ligero como elementos no estructurales que solamente tienen un fin arquitectónico visual.

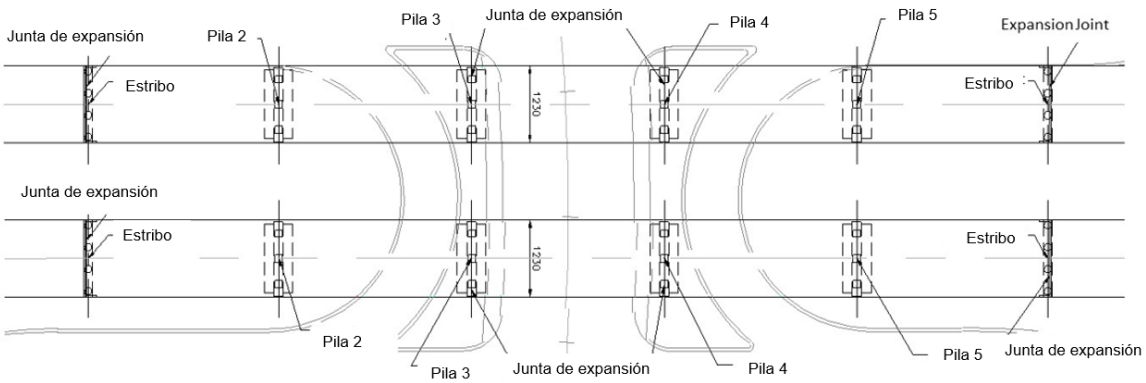


Figura 2. Vista en planta del puente La Central Camionera.

Figura 3. Vista longitudinal del puente La Central Camionera durante su proceso constructivo.

Puente peatonal

El puente peatonal está compuesto por una losa de CR apoyada sobre una armadura metálica, como se observa en la Figura 4. El puente cruza un río pequeño en Morelia, Michoacán, como lo muestran las fotografías de la Figura 5, en estas se observa que la cuerda inferior corresponde a une sección transversal de acero estructural en cajón formada por dos elementos con sección en canal de acero laminado en frío, sobre la armadura a ambos lados longitudinales, se tienen pasamanos metálicos para proteger a los peatones de posibles caídas.

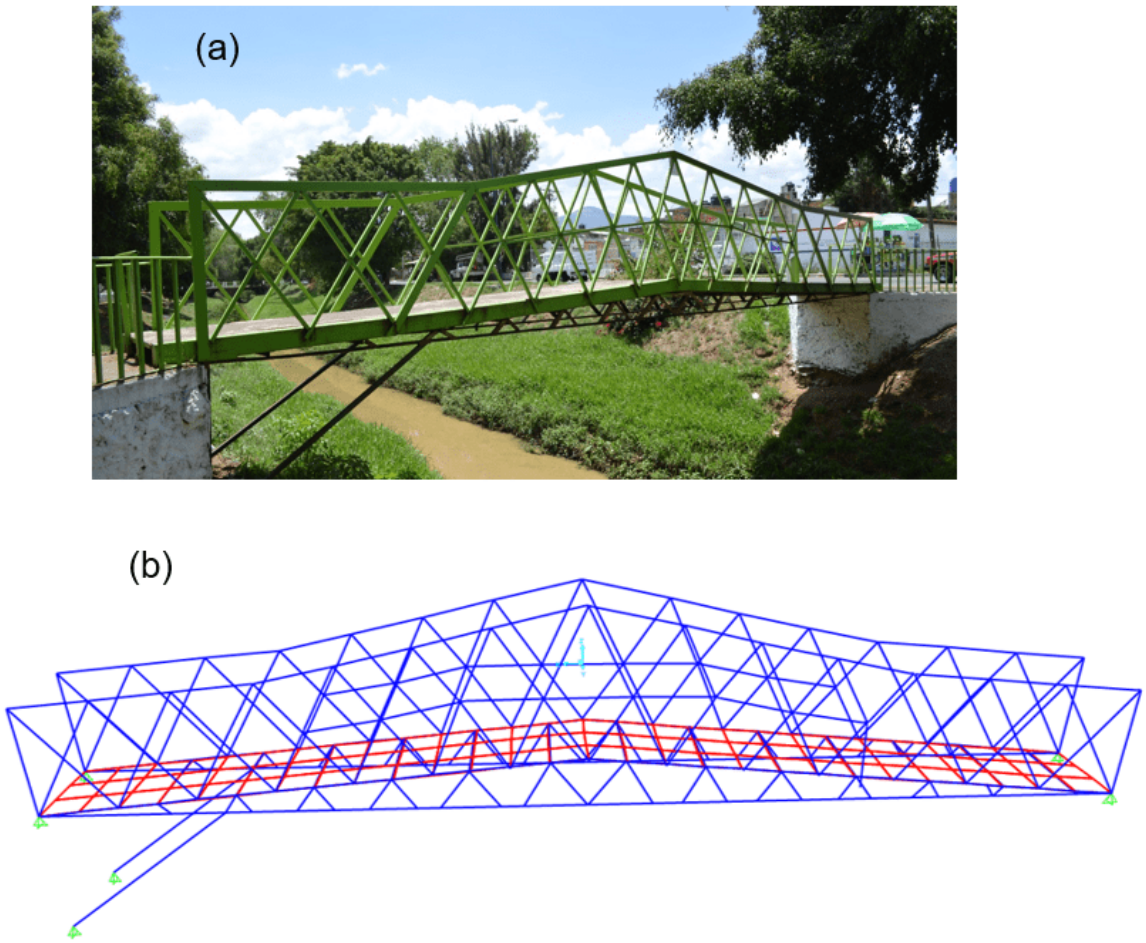


Figura 4. (a) Vista longitudinal del puente peatonal, (b) Modelo analítico en SAP2000.

Figura 5. Vista longitudinal del puente peatonal y daño en la parte superior de la cuerda inferior de la armadura del puente.

Como se observa en las fotografías, el puente peatonal presenta varias patologías de daño tanto en elementos estructurales como no estructurales (pasamanos). Los daños más importantes en elementos estructurales se observan sobre los cordones de soldadura superior e inferior de la sección transversal en cajón formada por dos secciones en canal como cuerda inferior de la armadura. La inspección visual mostró, en algunas partes, pérdida de la sección transversal y en otras, pérdida de soldadura, así como corrosión en varios elementos estructurales, lo cual, se observa claramente en las fotografías. El pasamanos presenta algunas uniones sin soldar y algunos elementos con evidente corrosión. El puente es de fácil accesibilidad para realizar en cualquier momento pruebas de vibración ambiental y, además, es una estructura pequeña y fácil de inducir desplazamientos bajo vibración forzada, lo que se logra todos los días simplemente con el caminar de las personas. Debido a que se tienen daños en los elementos estructurales es que se eligió esta estructura como caso de estudio, ya que se puede evaluar con precisión la aproximación en la detección del daño mediante el método del cambio de flexibilidad.

RESULTADOS

En muchas ocasiones las obras civiles construidas son muy vulnerables ante la acción de cargas dinámicas, por lo que es necesario tener extremo cuidado en el diseño ante los estados límite de servicio y de falla; sin embargo, los criterios empleados en la elaboración del modelo para diseño distan de ser uniformes en la práctica profesional. Las variaciones que se encuentran en estos criterios pueden distar de más del 100% entre los resultados de los analistas, a pesar de que se empleen las mismas herramientas, por lo que es necesario llevar a cabo estudios muy detallados para evaluar las propiedades dinámicas, frecuencias y formas modales, de las estructuras (Olivares, 2001). En general, estas propiedades se determinan mediante dos técnicas de identificación conocidas como técnicas paramétricas y no paramétricas; las primeras se estiman con base en modelos matemáticos simplificados que correlacionan los parámetros estructurales con los datos medidos, mientras que las segundas se basan en análisis espectrales convencionales de pruebas de vibración ambiental que tienen como objetivo determinar las características del sistema estructural. Para determinar las propiedades dinámicas de las estructuras, en la práctica se aplican con mayor frecuencia tres tipos de pruebas no paramétricas o experimentales, siendo la amplitud del movimiento inducida por estas pruebas su principal diferencia, estas se conocen como:

- Pruebas de vibración ambiental: se estiman a base de las vibraciones inducidas en las obras civiles por el tránsito de vehículos, acciones del viento y el uso mismo de las estructuras.

- Pruebas de vibración forzada: se implementan para evaluar las propiedades, primeramente, deben excitarse las estructuras ante una vibración constante a base de uno o más motores en vibración, de los cuales debe tenerse un control preciso.

- Pruebas con registros sísmicos: se evalúan las propiedades dinámicas implementando acelerógrafos que registran los movimientos de las estructuras inducidos por los terremotos.

En este estudio se estiman las propiedades dinámicas de los puentes considerados como casos de estudio mediante una modelación paramétrica calibrada mediante pruebas de vibración ambiental, los resultados obtenidos tanto de las mediciones de vibración ambiental como de aplicar el método del cambio flexibilidad para detectar daño se describen a continuación para cada caso de estudio.

Puente carretero

Las campañas de vibración ambiental que se presentan en este trabajo, corresponden a un periodo de dos años ante diferentes escenarios de carga. Se realizaron dos mediciones en 2014, una cuando al proceso de construcción del puente solamente faltaba la colocación de la carpeta asfáltica, la siguiente cuando se abrió el paso al tránsito vehicular a lo largo del puente, y la tercera medición se realizó al año de que el puente se puso en servicio para su completa operación. Para la campaña de vibración ambiental, los sensores se colocaron en varias posiciones que cubrieron todo el ancho y largo del puente, la posición de los sensores se selección con el objetivo de identificar varias formas modales. Los datos registrados se procesaron con el software ARTEMIS (SVS, 2014), donde fue posible identificar las formas modales en tres dimensiones (3D), gracias al rango amplio de puntos cubierto con el trabajo de las mediciones de vibración ambiental. El procesamiento de las señales permitió identificar varias formas modales del puente La Central Camionera, de estas se seleccionaron solamente dos para implementar el método de la diferencia de flexibilidades para identificar el daño en la estructura, esto fue debido a que estas formas modales resultaron ser las mejor correlacionadas entre todas las mediciones analizadas con el modelo numérico, reflejando mejor el comportamiento esperado más cercano al real del puente. La Figura 6 reporta las formas modales usadas para la identificación del daño en este trabajo.

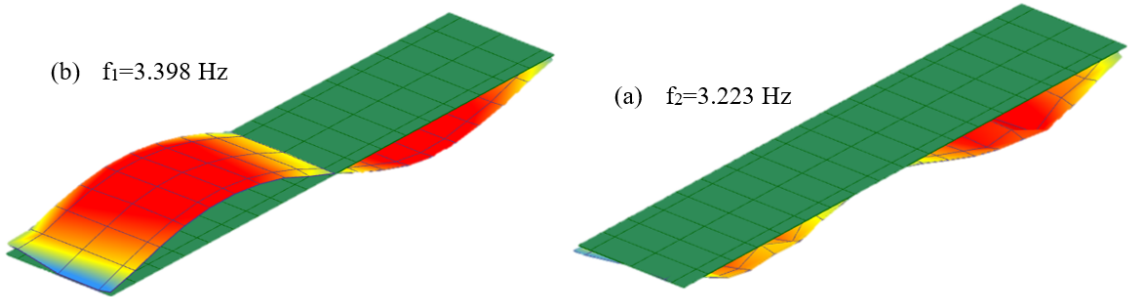


Figura 6. Formas modales identificadas del puente La Central Camionera: (a) Primera y (b) Segunda, formas modales.

El puente de la Central Camionera se discretizó en 160 elementos localizados a lo largo de su longitud con el objetivo de implementar el método de la diferencia de flexibilidad para localizar el daño, elementos donde se estimaron los cambios en flexibilidad que se reportan en la Figura 7. Los ejes horizontal y vertical de esta figura, respectivamente, representan la posición a lo largo del puente y el cambio de flexibilidad en barras, en cada elemento desde el inicio hasta el fin del puente. Los resultados muestran la presencia de daño localizaciones donde se esperarían las deformaciones máximas correspondientes a una losa continua, en este momento los cambios en flexibilidad son pequeños, lo cual corresponde a la presencia de grietas pequeñas localizadas en la losa y en las vigas a distancias definidas por el eje de las ordenas que define su localización a lo largo del puente. Estos resultados indican que un monitoreo continuo de salud estructural debe seguirse cuidadosamente sobre los segmentos que muestran picos grandes a lo largo del puente. Siguiendo la misma idea y dado que el puente puede considerarse aún como una estructura medianamente nueva, se realizará un estudio continuo de vigilancia de la salud del puente, realizando nuevas campañas de vibración ambiental, esto con el fin de prevenir oportunamente daños en el puente.

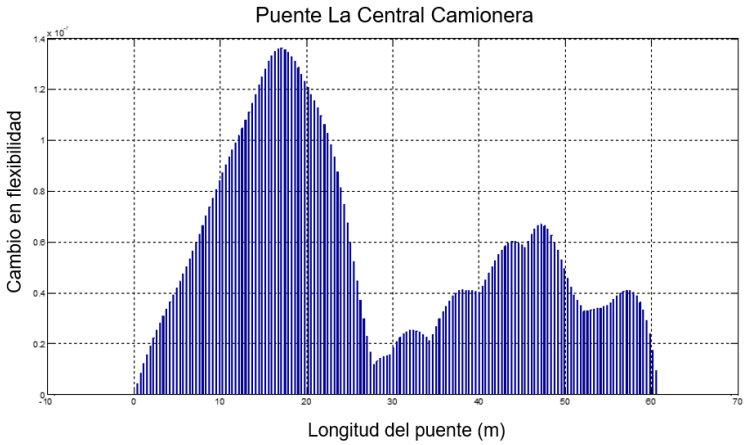


Figura 7. Localización de daño en el puente La Central Camionera.

Puente peatonal

Como se explicó anteriormente, para implementar la metodología seleccionada para la detección de daños, es necesario conocer las formas modales de la estructura. Dado que el interés por este puente surgió luego de conocer su estado actual de daño, primeramente, se realizó un levantamiento topográfico con el fin de identificar correctamente la geometría, elementos estructurales y no estructurales que conforman el puente; con base en este estudio, se desarrolló un modelo numérico en el software SAP2000 (SCI, 2020) creado para determinar las formas modales analíticas del puente original, sin daño. La campaña de vibración ambiental se realizó sobre la estructura dañada ubicando los sensores a lo largo del puente con dos posiciones diferentes, una ubicando los sensores en los cuartos de la longitud (Figura 8), y otra en el centro del claro con sensores a 0.60 m de los apoyos extremos. Los datos registrados se procesaron con el software ARTEMIS (SVS, 2014)) y las formas modales se identificaron en dos dimensiones (2D) ya que solamente se cubrió con los sensores la longitud del puente y no su ancho; esto se debe a la intensa circulación de peatones que cruzaban el río mediante este puente. La Figura 9 presenta cuatro de las formas modales estimadas analíticamente mediante un análisis modal en el software SAP2000 (CSI, 2020). La Figura 10 muestra dos de las formas modales identificadas que fueron correlacionadas con el modelo analítico, para la identificación del daño en el puente peatonal se utilizaron seis formas modales en el método de la diferencia de flexibilidad.

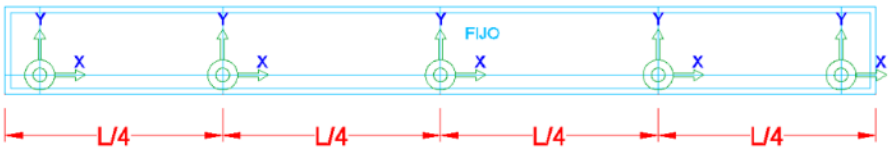


Figura 8. Ubicación de sensores en el puente para la primera condición de vibración ambiental.

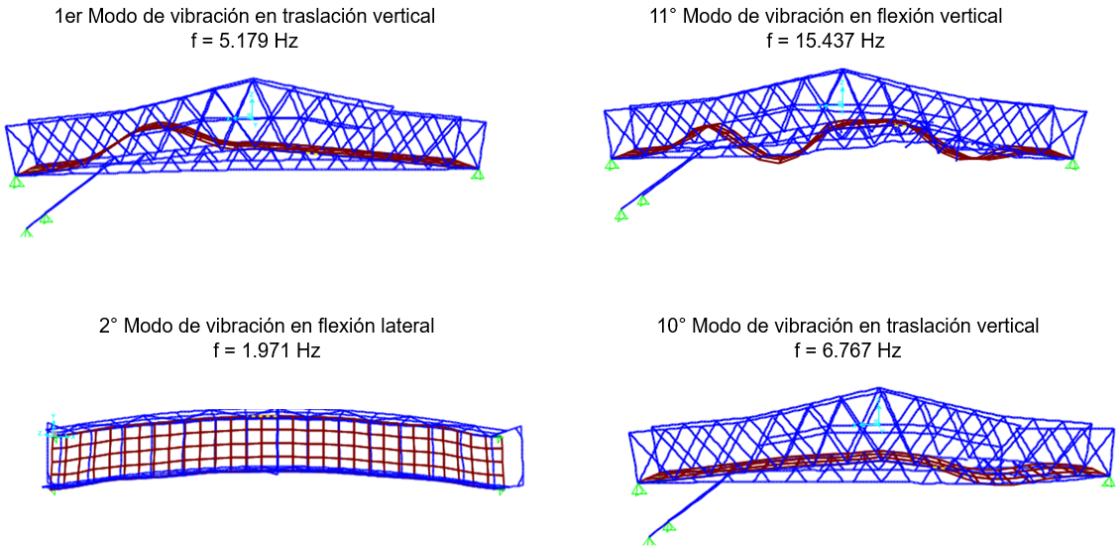


Figura 9. Formas modales identificadas con el modelo numérico del puente peatonal.

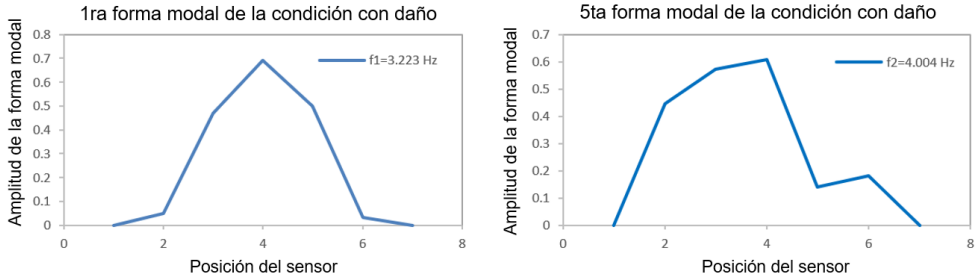


Figura 10. Formas modales identificadas mediante la vibración ambiental del puente peatonal con el software ARTEMIS (SVS, 2014).

La Figura 11 reporta el daño y su ubicación a lo largo del puente peatonal, donde los ejes horizontal y vertical, respectivamente, corresponden a la posición del daño a lo largo del puente y al valor del cambio en flexibilidad de cada elemento, el cual se representa mediante barras que definen el inicio y el fin de cada uno de los elementos considerados. Los resultados muestran la presencia de daño en localizaciones donde físicamente se puede distinguir su presencia en las fotografías presentadas en la Figura 5, así mismo, la vista longitudinal de la armadura muestra la presencia de corrosión a lo largo del puente. Los cambios en la flexibilidad son mayores en lugares donde se esperan mayores deflexiones verticales y daños detectados visualmente en los elementos estructurales.

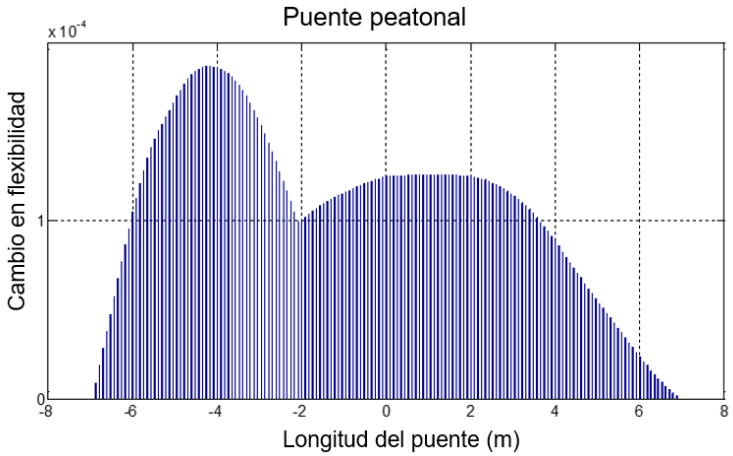


Figura 11. Localización de daño en el puente peatonal.

CONCLUSIONES

El presente trabajo reporta los resultados de un estudio enfocado en determinar la precisión del método de diferencia de flexibilidad para localizar daños en estructuras. La metodología se aplicó a dos puentes que trabajan bajo escenarios de cargas completamente diferentes: un puente de carretera y uno peatonal. En ambos casos se desarrollaron campañas de vibración ambiental que permiten determinar las formas modales de las estructuras y sus respectivas frecuencias. Los resultados presentados y discutidos nos permiten concluir lo siguiente:

a) El método de cambio de flexibilidad para detectar daños en estructuras es efectivo y preciso utilizando pocas formas modales, lo cual mejora al incrementar el número de formas modales consideradas.

b) La metodología es fácil de implementar permitiendo una sencilla interpretación de los resultados, los cuales, son de fácil presentación e interpretación mediante gráficas de barras, donde se correlaciona el cambio de flexibilidad con la localización del daño a lo largo de la estructura.

c) La eficacia del método depende de la calidad de los datos utilizados para identificar formas y frecuencias modales, así como de los diferentes escenarios de carga y daño incorporados en los análisis.

d) La metodología exige pequeños esfuerzos computacionales, lo que es deseable especialmente para estructuras grandes.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. K. Pandey, M. Biswas, “Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 184, 2, 1995, pp. 311-328.
2. Computer and Structures Inc. (SCI), SAP2000 Nonlinear 19.0, 2020.
3. L. F. Olivares, “Modelos calibrados de un edificio instrumentado”, Revista Digital Universitaria, Vol. 2, 3, 2001, pp. 367-380.
4. SVS, ARTEMIS Modal Pro 3.6. 2014.

5. Y. Zhang, Z. Zhang, X. Xu, H. Hua, “Modal parameter identification using response data only”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 282, 1, 2005, pp. 367-380.

TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL ANÁLISIS INTELIGENTE DE LA ARTRITIS Y LA ARTROSIS

Francisco Jacob Ávila Camacho[1], Leonardo Miguel Moreno Villalba[1], Mariana Zuleima Pérez González[1], María de la Luz Delgadillo Torres[1]

[1]Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec.
fjacobavila@tese.edu.mx.

RESUMEN

La artrosis y la artritis son dos de las enfermedades articulares más comunes y debilitantes en la población mundial. La artrosis u osteoartritis, se caracteriza por el desgaste progresivo del cartílago articular, lo que resulta en dolor, rigidez y pérdida de movilidad en las articulaciones afectadas. La artritis es un término general que abarca más de 100 enfermedades diferentes que afectan a las articulaciones, siendo la artritis reumatoide una de las más comunes y graves, caracterizada por la inflamación crónica de las articulaciones. La Artritis Reumatoide es una enfermedad que afecta las articulaciones, causa dolor, hinchazón y rigidez y se calcula que, en México, más de 1 millón de personas la padece. Las estadísticas muestran que, del 100% de las mujeres que padecen esta condición, 75% está en edad productiva (entre 25 y 55 años), en tanto que en hombres sólo es el 25%. Después de la diabetes, las neoplasias malignas, las dorsopatías y la insuficiencia renal, las enfermedades reumáticas están dentro de las primeras 10 causas de atención médica ambulatoria, actualmente la Secretaría de Salud no lleva a cabo ningún programa o iniciativa para el control de las enfermedades reumáticas por lo que un diagnóstico temprano desempeña un papel crucial en el manejo efectivo de enfermedades degenerativas articulares como la artrosis y la artritis, implementando estrategias terapéuticas que pueden ralentizar la progresión de la enfermedad, mejorar la funcionalidad de las articulaciones y aliviar el dolor. Además, el manejo oportuno de estas afecciones puede prevenir o minimizar las discapacidades a largo plazo. Por esta razón, los médicos y especialistas buscan constantemente herramientas y tecnologías que puedan ayudar en la detección temprana y precisa de estas afecciones. La termografía infrarroja surge como una herramienta prometedora en la evaluación de enfermedades articulares debido a su capacidad para detectar patrones de temperatura distintivos en áreas inflamadas o afectadas por degeneración. La integración de la visión por computadora con la termografía abre nuevas posibilidades para la interpretación de imágenes termográficas. El uso de algoritmos de inteligencia artificial mejora la precisión y eficiencia del análisis de termografías en medicina. Estos algoritmos son capaces de identificar patrones y anomalías en las imágenes, lo que facilita la detección temprana de enfermedades articulares y mejora los resultados clínicos. En este trabajo se desarrolló un prototipo para un dispositivo no invasivo de apoyo para el diagnóstico de la artritis y la artrosis que permite capturar imágenes termográficas en tiempo real, que en conjunto con un método de análisis de imágenes conformado por redes neuronales para clasificar las imágenes basadas en patrones de temperatura con lo que se pretende demostrar que el análisis de imágenes termográficas facilita la detección y el diagnóstico de enfermedades como la artrosis y artritis de manera temprana. El modelo inteligente se entrenó con un conjunto de imágenes de personas sanas y personas afectadas, lo que permitió al prototipo avanzar a la fase de maduración tecnológica TRL4 para iniciar la fase de pruebas clínicas dentro del sector salud. El análisis de imágenes termográficas mediante métodos avanzados de procesamiento y clasificación permite distinguir de manera objetiva entre patrones térmicos característicos de la artrosis y la artritis. Lo que le da validez al desarrollo del prototipo como un dispositivo de diagnóstico no invasivo y de bajo costo.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades articulares, tales como la artrosis y la artritis, representan un problema de salud pública global (Bellamy et al., 1999). Estas condiciones afectan a millones de personas en todo el mundo, causando dolor, discapacidad y una reducción significativa en la calidad de vida de los pacientes (Mayoral Rojals & Mayoral Rojals, 2021). El diagnóstico temprano y preciso es fundamental para la implementación de tratamientos que puedan ralentizar la progresión de estas

enfermedades y mitigar sus efectos adversos (Toro-Gutiérrez et al., 2023). En el contexto actual, la mayoría de los métodos de diagnóstico para las enfermedades articulares son invasivos o requieren equipamiento costoso y especializado. Por ejemplo, las técnicas comúnmente utilizadas incluyen la resonancia magnética y el análisis de fluido sinovial, ambos procedimientos pueden ser incómodos y costosos para los pacientes (Harris & Crawford, 2015). Esta realidad pone de manifiesto la necesidad de alternativas más accesibles y menos invasivas.

La termografía infrarroja surge como una opción viable en este escenario. Esta tecnología utiliza cámaras especiales para capturar la radiación infrarroja emitida por el cuerpo humano, lo que permite detectar anomalías en la distribución de la temperatura corporal que pueden ser indicativas de inflamación o de otros procesos patológicos (Panella et al., 2021). Además, la termografía no requiere contacto físico y es completamente indolora para el paciente (Kovács et al., 2020). Sin embargo, la interpretación de las imágenes termográficas puede ser compleja y sujeta a variabilidad entre observadores (Pinedo et al., 2021). Esto ha impulsado la integración de sistemas de inteligencia artificial que pueden analizar automáticamente las imágenes y proporcionar diagnósticos consistentes y precisos. Los algoritmos de aprendizaje automático, en particular, han demostrado ser capaces de identificar patrones sutiles en datos complejos, lo que los hace ideales para esta aplicación (Eshaq et al., 2021). El uso de algoritmos de aprendizaje automático y técnicas de procesamiento de imágenes facilita la detección de patrones térmicos característicos de estas enfermedades, ofreciendo un prediagnóstico rápido y no invasivo (Wei et al., 2023).

Dado este contexto, el desarrollo de un prototipo que combine la termografía infrarroja con la inteligencia artificial representa un paso adelante significativo (Panella et al., 2021). Este prototipo tiene el potencial de transformar el diagnóstico de las enfermedades articulares, haciéndolo más accesible, menos invasivo y considerablemente más económico. Además, la implementación de tal tecnología podría democratizar el acceso a diagnósticos de alta calidad, beneficiando a poblaciones en áreas remotas o con recursos limitados. El objetivo de crear un prototipo que utilice la termografía infrarroja en conjunto con la inteligencia artificial es proporcionar una herramienta de diagnóstico no invasiva, eficaz y de bajo costo. Este objetivo no solo responde a una necesidad clínica, sino que también alinea la innovación tecnológica con la mejora en la accesibilidad y la eficiencia del cuidado médico para enfermedades crónicas y debilitantes.

TEORÍA

La artritis y la artrosis son dos de las enfermedades reumáticas más comunes y tienen un impacto significativo en la calidad de vida de los pacientes (Espinosa-Morales et al., 2018). La artritis reumatoide, una enfermedad autoinmune, se caracteriza por la inflamación crónica de las articulaciones. Esta inflamación puede provocar dolor severo, hinchazón y puede llevar a la destrucción del cartílago y el hueso (Rodriguez-Veiga et al., 2019). Por otro lado, la artrosis es una enfermedad degenerativa que afecta al cartílago articular (Mayoral Rojals & Mayoral Rojals, 2021b). Esta enfermedad conlleva el desgaste del cartílago, lo que resulta en dolor, rigidez y pérdida de movimiento en la articulación afectada. Ambas afecciones requieren un enfoque de tratamiento diferente, lo que subraya la importancia de un diagnóstico preciso y temprano (Armas Rodríguez et al., 2019b).

Ley de Radiación Térmica

La radiación térmica es una forma de transferencia de energía que ocurre debido a la temperatura de un cuerpo, sin la necesidad de un medio material para su transmisión. Todo cuerpo con una temperatura por encima del cero absoluto Kelvin emite radiación térmica. Esta radiación se compone de un espectro continuo de ondas electromagnéticas generadas por el movimiento de partículas cargadas, como electrones, dentro de los átomos del cuerpo (Ng, 2009).

Ley de Planck

La ley de Planck es fundamental para comprender cómo los cuerpos emiten radiación térmica en función de su temperatura. Max Planck, un físico alemán, formuló esta ley en 1900, revolucionando

así la física moderna al introducir la teoría cuántica (Singh & Singh, 2020). La ley de Planck describe la distribución espectral de la energía emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico y está dada por la fórmula:

$$\boldsymbol{I(\lambda, \mathrm{T}) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\left(\frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda k_B \mathrm{T}}} - 1}\right)} \quad (1)$$

Donde:

- $\boldsymbol{I(\lambda, T)}$ es la intensidad de la radiación emitida,
- $\boldsymbol{\lambda}$ es la longitud de onda,
- T es la temperatura absoluta del cuerpo,
- h es la constante de Planck,
- c es la velocidad de la luz en el vacío,
- $\boldsymbol{k_B}$ es la constante de Boltzmann.

Esta ley muestra que la cantidad de energía radiada por un cuerpo negro a diferentes longitudes de onda depende solo de su temperatura, y que existe una longitud de onda particular en la que la emisión de energía es máxima. Este máximo se desplaza hacia longitudes de onda más cortas a medida que la temperatura aumenta, un fenómeno descrito por la ley del desplazamiento de Wien (Ng, 2009).

Aplicación en la Termografía

En la termografía, la ley de Planck es esencial para interpretar las imágenes térmicas. Las cámaras termográficas no solo detectan la radiación infrarroja emitida por los objetos, sino que también calculan la temperatura de esos objetos basándose en la intensidad de la radiación detectada (Gogoi et al., 2019). Este principio permite identificar variaciones de temperatura en la superficie del cuerpo, que son indicativas de diversas condiciones médicas, como inflamaciones o cambios en la circulación sanguínea, que son comunes en enfermedades articulares (Panella et al., 2021).

Los métodos tradicionales para la detección de enfermedades articulares incluyen técnicas como la radiografía, la resonancia magnética (MRI), y los análisis de fluido sinovial. Aunque efectivas, estas técnicas suelen ser invasivas, costosas y no siempre están disponibles en contextos con recursos limitados. Estas limitaciones subrayan la importancia de desarrollar métodos alternativos que sean accesibles y menos invasivos, pero igualmente efectivos (Gálvez M., 2007).

Figura 1. Imagen de un paciente realizando una prueba de resonancia magnética para el diagnóstico de la artritis en las manos. (Imagen generada con Bing Image Designer).

La termografía infrarroja es un método diagnóstico que se presenta como una alternativa prometedora frente a los métodos convencionales (Prada Pérez de Azpeitia, 2016). Esta técnica utiliza cámaras termográficas para captar la radiación infrarroja emitida por el cuerpo, que se ve alterada en presencia de inflamación y otros procesos patológicos (Asano et al., 2022). Así, la termografía puede servir como un indicador temprano de enfermedades articulares, al revelar áreas con temperaturas anómalas asociadas a condiciones inflamatorias o degenerativas. Además de la termografía, la visión por computadora ha revolucionado la manera en que se procesan e interpretan las imágenes médicas (Panella et al., 2021). Este campo utiliza técnicas que permiten a las computadoras ver y analizar imágenes digitales para identificar patrones, formas y colores. En el contexto médico, la visión por computadora facilita la identificación automática de anomalías en imágenes termográficas, aumentando la precisión y reduciendo la variabilidad en la interpretación de los datos (Kovács et al., 2020).

La inteligencia artificial (IA) ha comenzado a jugar un papel importante en el campo de la medicina, particularmente en el diagnóstico de enfermedades. Los algoritmos de aprendizaje automático y el procesamiento de imágenes son técnicas de IA que pueden aprender a reconocer patrones en grandes conjuntos de datos (Kovács et al., 2020). En el contexto del diagnóstico médico, la IA puede analizar imágenes termográficas para identificar patrones asociados con enfermedades específicas. Esto puede mejorar la precisión del diagnóstico y reducir la dependencia de la interpretación subjetiva (Wei et al., 2023). Un componente crucial en la visión por computadora moderna son los modelos inteligentes basados en redes neuronales. Estos modelos, particularmente las redes neuronales convolucionales (CNNs), son excelentes para analizar imágenes visuales (Kovács et al., 2020). Pueden aprender a reconocer patrones complejos en datos visuales, lo que los hace ideales para aplicaciones como la detección de enfermedades articulares a través de imágenes termográficas. Estos modelos se entrenan usando grandes conjuntos de datos y pueden mejorar continuamente su precisión a medida que se les expone a más imágenes (Wei et al., 2023).

Con este contexto teórico se proporciona la base conceptual y técnica para el desarrollo del prototipo propuesto en este proyecto. Al abordar tanto los aspectos teóricos como prácticos de las enfermedades reumáticas, la termografía y la inteligencia artificial, este marco busca guiar la investigación y el desarrollo de una solución innovadora para el prediagnóstico de la artritis y la artrosis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del prototipo

El diseño del prototipo se centró en la funcionalidad y la portabilidad. Se optó por una carcasa compacta y ergonómica para alojar todos los componentes electrónicos necesarios, incluyendo la cámara termográfica, el microprocesador, y la pantalla táctil. El diseño fue realizado utilizando software de modelado 3D, lo que permitió una visualización detallada del ensamblaje de los componentes y la optimización del espacio interno para una disipación eficiente del calor y un fácil acceso para mantenimiento.

Figura 2. Imágenes del prototipo de registro y captura de imágenes termográficas mostrando el acomodo de los componentes

Impresión 3D de la carcasa

La carcasa del prototipo se fabricó utilizando técnicas de impresión 3D. Se seleccionó el plástico ABS por su resistencia al impacto, durabilidad y estabilidad térmica, cualidades necesarias para proteger los componentes electrónicos sensibles. La impresión 3D permitió crear un prototipo rápido y ajustes en el diseño, asegurando que cada componente encajara perfectamente en el espacio designado sin comprometer la estética del dispositivo.

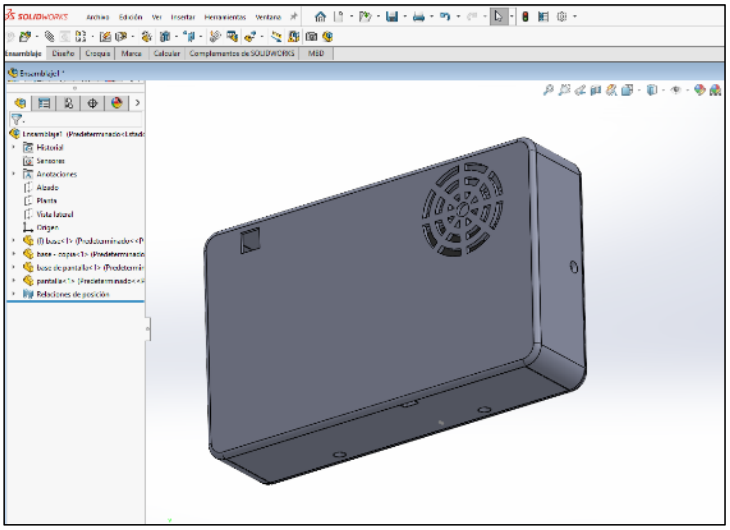


Figura 3. Imagen del modelado 3D para la impresión del prototipo utilizando Solidworks

Armado y conexiones del dispositivo

El armado del prototipo implicó meticulosas conexiones entre los diversos componentes. La cámara modelo Pure Thermal de FLIR se integró al microprocesador Raspberry Pi 4 mediante un conector específico que garantiza una transmisión de datos rápida y segura. La Raspberry Pi 4 fue elegida por su capacidad para ejecutar el sistema operativo Ubuntu y gestionar el procesamiento de datos a través de TensorFlow Lite sin problemas de rendimiento. La pantalla táctil de 7 pulgadas se conectó a la Raspberry Pi mediante interfaces compatibles en HDMI, permitiendo una interacción fluida con la interfaz gráfica desarrollada en Python. Esta pantalla no solo facilita la navegación por las distintas

funciones del dispositivo, sino que también sirve como ventana de visualización de las imágenes termográficas y los resultados del análisis.

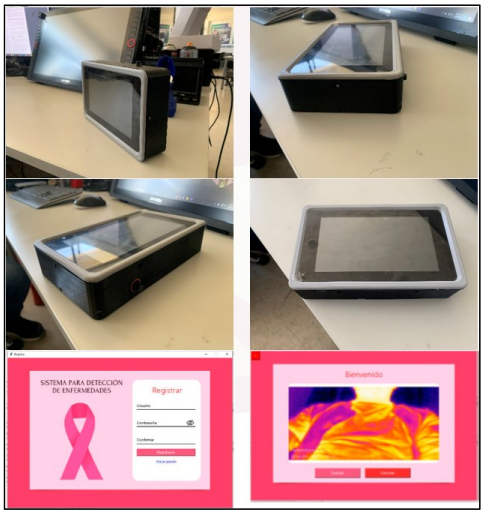


Figura 4. Prototipo final e interfaz gráfica de usuario para la gestión de imágenes térmicas.
Finalmente, se realizaron pruebas exhaustivas para asegurar que todas las conexiones fueran seguras y que el software y el hardware funcionaran en concierto. Estas pruebas incluyeron la calibración de la cámara termográfica, la verificación del rendimiento de la Raspberry Pi bajo carga operativa y la funcionalidad de la interfaz de usuario en la pantalla táctil.

Diseño del modelo inteligente para la clasificación de imágenes
El modelo inteligente desarrollado para el diagnóstico de enfermedades articulares mediante termografía infrarroja se construyó utilizando técnicas avanzadas de aprendizaje automático, específicamente a través del enfoque de transferencia de aprendizaje con la red neuronal conocida como DenseNet201. A continuación, se detalla la estructura y el entrenamiento del modelo:

Configuración del Modelo
Se seleccionó DenseNet201 por su eficiencia en el manejo de características relevantes en imágenes complejas, aprovechando su capacidad para preservar la información a lo largo de la red mediante conexiones densas. No se incluyeron las capas superiores ('Top') de la arquitectura original de DenseNet201 para adaptar la red a las necesidades específicas del proyecto como se muestra en la figura 5. En su lugar, se añadió la siguiente configuración:

- GlobalAveragePooling2D: Esta capa se utilizó para reducir las dimensiones espaciales de los mapas de características, condensando información importante en menos parámetros.
- Dropout: Se incorporó un dropout del 50% para reducir el sobreajuste, mejorando la capacidad del modelo de generalizar sobre nuevos datos.
- BatchNormalization: Esta capa fue utilizada para normalizar las activaciones de la red, lo que ayuda a acelerar el entrenamiento y mejorar el rendimiento del modelo.
- Capas Densas: Se agregaron dos capas densas; la primera con 512 neuronas y función de activación ReLU para la transformación no lineal de las características, y la segunda, una capa de salida con 2 neuronas y función de activación softmax, diseñada para clasificar las imágenes en dos categorías: Sano y No Sano.

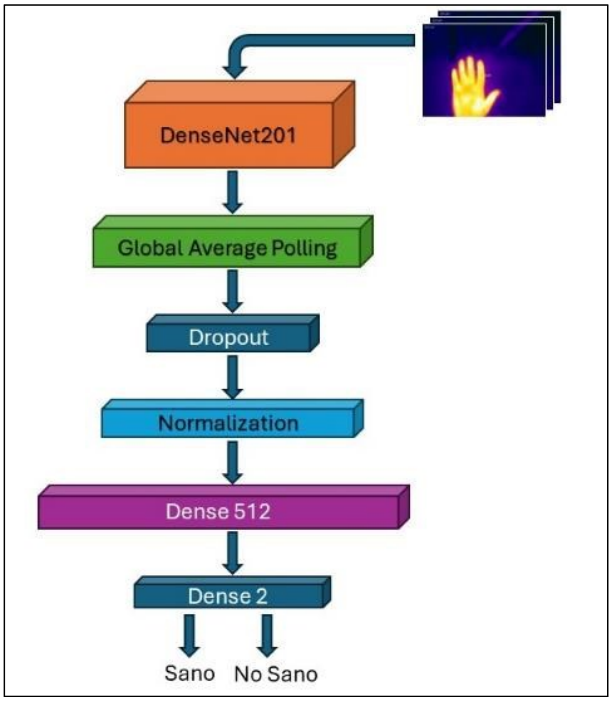


Figura 5. Arquitectura del modelo inteligente para la clasificación de las imágenes termográficas.

Entrenamiento del Modelo

- Hiperparámetros: Se configuró el modelo con una tasa de aprendizaje de 1×10^{-4}, utilizando la función de pérdida de entropía cruzada binaria y el optimizador Adam para la actualización de los pesos.
- Epocas y Batch Size: El modelo se entrenó durante 100 épocas con un tamaño de lote de 16.
- Datos de Entrenamiento: Se utilizó un conjunto de entrenamiento de 460 imágenes, divididas en 234 imágenes de personas No sanas y 226 imágenes de personas sanas.
- Data Augmentation: Para aumentar la robustez del modelo y mejorar su capacidad de generalización, se aplicó aumento de datos, lo que permite simular una mayor variedad de condiciones de imagen a partir del conjunto de entrenamiento existente.
- Validación: El conjunto de validación consistió en el 20% de las imágenes del conjunto de entrenamiento, utilizado para ajustar y evaluar la precisión del modelo durante el entrenamiento.

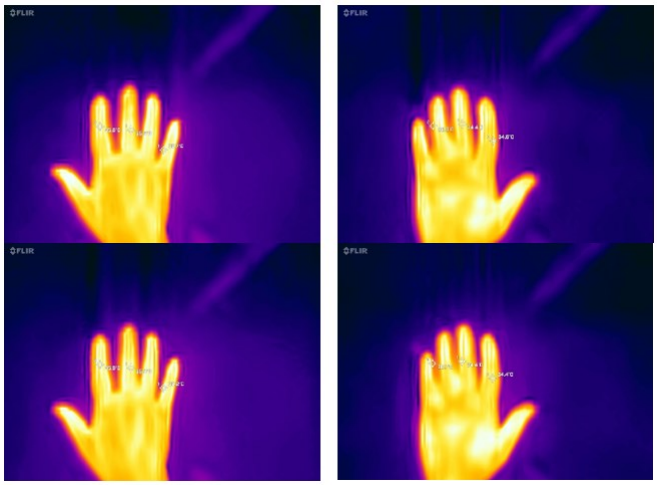


Figura 6. Muestra del conjunto de imágenes de entrenamiento.

Evaluación del Modelo

- Conjunto de Prueba: Posteriormente, el modelo fue evaluado utilizando un conjunto de prueba de 400 imágenes, equitativamente divididas entre condiciones Sanas y No sanas.
- Métricas de Rendimiento: El modelo alcanzó un Área Bajo la Curva (AUC) de 0.938, demostrando una alta capacidad discriminativa.
- Otras métricas incluyen:
    - RMSE (Root Mean Square Error): 0.251
    - MSE (Mean Squared Error): 0.06304347826086956
    - MAE (Mean Absolute Error): 0.06304347826086956
    - R^2 (Coeficiente de Determinación): 0.7477497919975822

Estas métricas indican que el modelo es altamente efectivo en la clasificación de las condiciones de salud a partir de imágenes termográficas, ofreciendo una herramienta poderosa para el diagnóstico no invasivo y temprano de enfermedades articulares.

Este proceso de diseño, impresión 3D y montaje no solo demostró la viabilidad del prototipo, sino que también aseguró que el dispositivo final fuera robusto, eficiente y fácil de usar en entornos clínicos o de investigación. La integración de estos componentes y tecnologías refleja un avance importante en el desarrollo de herramientas diagnósticas no invasivas y accesibles.

RESULTADOS

El prototipo desarrollado presenta un diseño compacto y funcional, optimizado para el uso en diagnósticos médicos. Las imágenes del dispositivo muestran una carcasa elegante de color gris, fabricada mediante impresión 3D, que aloja todos los componentes electrónicos esenciales. La pantalla táctil de 7 pulgadas, situada en la parte frontal del dispositivo, muestra una interfaz de usuario intuitiva desarrollada en Python, que permite a los usuarios navegar fácilmente por las opciones de diagnóstico y visualización de imágenes.

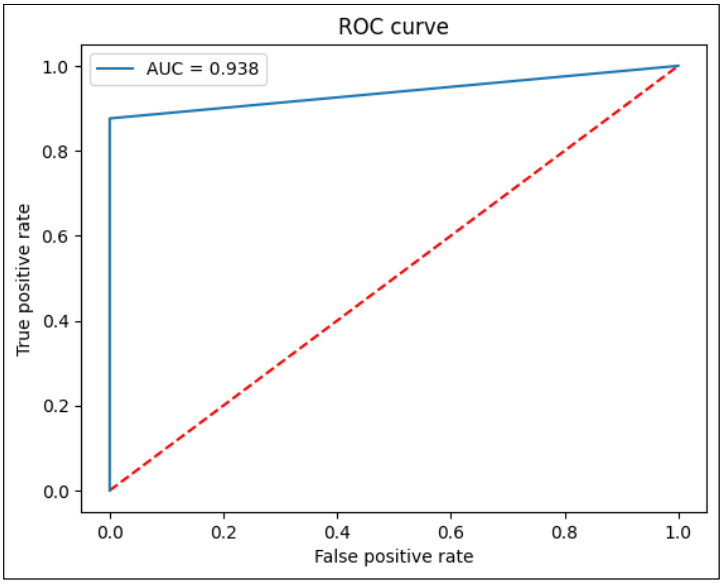


Figura 7. Gráfica de la curva ROC resultado de las pruebas del modelo inteligente ya entrenado.

Para el proceso de captura de imágenes termográficas, la cámara Pure Thermal de FLIR, integrada en el prototipo, captura imágenes de alta resolución que detectan las variaciones de temperatura en las áreas examinadas. Estas imágenes termográficas son cruciales para identificar áreas con inflamación o desgaste articular, típicas en enfermedades como la artrosis o la artritis. La precisión de la cámara permite detectar sutiles diferencias térmicas que podrían pasar desapercibidas en exámenes físicos convencionales. Las imágenes termográficas capturadas son procesadas utilizando algoritmos avanzados de visión por computadora y modelos de redes neuronales implementados con TensorFlow como se muestra en la figura 5. El modelo fue entrenado inicialmente utilizando imágenes de un repositorio público, lo cual permitió desarrollar y ajustar los algoritmos de clasificación. Los parámetros obtenidos durante este proceso demostraron ser aceptables para la identificación de patrones relacionados con enfermedades articulares, validando así la eficacia del modelo en un entorno controlado.

Con el objetivo de validar y mejorar la precisión del modelo en un contexto clínico real, se está planificando llevar a cabo pruebas clínicas en el Hospital General de Zona. Para este propósito, se ha entregado una carta de petición a las autoridades correspondientes, solicitando permiso para realizar pruebas con pacientes reales. Este paso es crucial para asegurar que el prototipo puede operar efectivamente en condiciones reales y proporcionar diagnósticos precisos que contribuyan al tratamiento y manejo de las enfermedades articulares. En la preparación para estas pruebas, se están estableciendo protocolos rigurosos para garantizar la seguridad de los pacientes y la integridad de los datos recogidos. Estos protocolos incluyen medidas de consentimiento informado, protección de la privacidad de los pacientes y procedimientos detallados para la recolección y análisis de las imágenes termográficas. La colaboración con el Hospital General de Zona también permitirá recoger un conjunto de datos más diverso y representativo, lo que es esencial para el ajuste fino y la validación final del modelo.

La transición de pruebas con imágenes de un repositorio público a pruebas clínicas en un hospital representa un avance significativo en el proyecto. Estas pruebas clínicas no solo permitirán evaluar la efectividad del dispositivo en condiciones reales, sino que también facilitarán la recopilación de feedback directo de profesionales médicos y pacientes, lo cual es invaluable para las iteraciones futuras del desarrollo del artefacto. Con estos pasos, se espera que el prototipo demuestre su valor práctico y se acerque a una implementación más amplia en el ámbito médico.

CONCLUSIONES

En las pruebas realizadas, el prototipo demostró una alta eficacia en la identificación de patrones térmicos asociados con la inflamación articular. Los resultados mostraron que el dispositivo podía diferenciar con una precisión significativa entre imágenes normales y aquellas indicativas de enfermedades articulares. Estos resultados validan el uso del prototipo como una herramienta de diagnóstico efectiva, ofreciendo una alternativa no invasiva y de bajo costo para el diagnóstico precoz de condiciones que afectan las articulaciones. Los resultados obtenidos subrayan la eficacia del prototipo en la aplicación clínica para el diagnóstico de enfermedades articulares. La combinación de termografía avanzada y análisis inteligente de imágenes representa un avance significativo en las metodologías de diagnóstico, proporcionando una herramienta potente y accesible que mejora la detección y manejo de enfermedades articulares.

Esta combinación permitirá una detección más temprana de las condiciones patológicas, lo cual es crucial para el tratamiento efectivo y la mejora de la calidad de vida de los pacientes. La utilización de componentes como la cámara termográfica FLIR y el microprocesador Raspberry Pi 4, junto con el desarrollo de software en Python para la interfaz gráfica, demuestra la viabilidad de crear dispositivos médicos compactos, eficientes y de bajo costo. La impresión 3D de la carcasa del prototipo también subraya la flexibilidad y la adaptabilidad del diseño, permitiendo modificaciones rápidas y personalizadas según las necesidades clínicas.

El prototipo ofrece una alternativa accesible y menos invasiva a las técnicas tradicionales de diagnóstico, lo cual es particularmente valioso en áreas con recursos limitados. Su capacidad para operar de forma autónoma y proporcionar resultados rápidos puede transformar el enfoque de diagnóstico en comunidades remotas o en situaciones donde el acceso a equipamiento médico especializado es limitado. Aunque los resultados obtenidos son prometedores, es fundamental continuar con la investigación y el desarrollo. Los futuros estudios deberían enfocarse en ampliar la base de datos de imágenes termográficas para entrenar los modelos de inteligencia artificial, mejorando así su capacidad de generalización y precisión. Además, será beneficiosa la realización de los ensayos clínicos para validar la eficacia del prototipo en diferentes poblaciones y condiciones médicas.

El prototipo desarrollado abre la puerta a nuevas investigaciones y aplicaciones en el campo de la termografía médica y el diagnóstico asistido por inteligencia artificial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Armas Rodríguez, W. E., Alarcón Medina, G. A., Ocampo Dávila, F. D., Arteaga, C. M., Arteaga Paredes, P. A., Armas Rodríguez, W. E., Alarcón Medina, G. A., Ocampo Dávila, F. D., Arteaga, C. M., & Arteaga Paredes, P. A. (2019a). Artritis reumatoide, diagnóstico, evolución y tratamiento. Revista Cubana de Reumatología, 21(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-59962019000300013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
2. Armas Rodríguez, W. E., Alarcón Medina, G. A., Ocampo Dávila, F. D., Arteaga, C. M., Arteaga Paredes, P. A., Armas Rodríguez, W. E., Alarcón Medina, G. A., Ocampo Dávila, F. D., Arteaga, C. M., & Arteaga Paredes, P. A. (2019b). Artritis reumatoide, diagnóstico, evolución y tratamiento. Revista Cubana de Reumatología, 21(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-59962019000300013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
3. Asano, H., Hirakawa, E., Hayashi, H., Hamada, K., Asayama, Y., Oohashi, M., Uchiyama, A., & Higashino, T. (2022). A method for improving semantic segmentation using thermographic images in infants. BMC Medical Imaging, 22(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/S12880-021-00730-0/FIGURES/5
4. Bellamy, N., Campbell, J., & Syrotuik, J. (1999). Comparative study of self-rating pain scales in rheumatoid arthritis patients. Current Medical Research and Opinion, 15(2), 121–127. https://doi.org/10.1185/03007999909113372

5. Eshaq, R. M. A., Hu, E., Qaid, H. A. A. M., Zhang, Y., & Liu, T. (2021). Using deep convolutional neural networks and infrared thermography to identify coal quality and gangue. IEEE Access, 9, 147315–147327. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121270
6. Espinosa-Morales, R., Alcántar-Ramírez, J., Arce-Salinas, C. A., Chávez-Espina, L. M., Esquivel-Valerio, J. A., Gutiérrez-Gómez, J. J., Lanza, L. D. la, Martínez-Hernández, J. L., Méndez-Medina, C., Román, M. R.-S., Santillán-Barrera, E., Torres-Roldán, F., Sosa-García, J. O., Aldrete-Velasco, J., Romero-González, A., Espinosa-Morales, R., Alcántar-Ramírez, J., Arce-Salinas, C. A., Chávez-Espina, L. M., … Romero-González, A. (2018). Reunión multidisciplinaria de expertos para el diagnóstico y tratamiento de la osteoartritis. Actualización basada en evidencias. Medicina Interna de México, 34(3), 443–476. https://doi.org/10.24245/MIM.V34I3.1433
7. Firmani-Villarroel, M., Cortés-Sylvester, M. F., Burgos-Ibarra, C., Firmani-Villarroel, M., Cortés-Sylvester, M. F., & Burgos-Ibarra, C. (2021). Valoración de la severidad en enfermedades degenerativas articulares temporomandibulares mediante tomografía computarizada Cone Beam. International Journal of Interdisciplinary Dentistry, 14(1), 37–43. https://doi.org/10.4067/S2452-55882021000100037
8. Gálvez M., M. (2007). Avances en resonancia magnética. Revista Médica Clínica Las Condes, 18(3), 254–262. https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-avances-resonancia-magnetica-X0716864007321338
9. Gogoi, U. R., Majumdar, G., Bhowmik, M. K., & Ghosh, A. K. (2019). Evaluating the efficiency of infrared breast thermography for early breast cancer risk prediction in asymptomatic population. Infrared Physics & Technology, 99, 201–211. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.01.004
10. Harris, H., & Crawford, A. (2015a). Diagnóstico y tratamiento de la artrosis. Nursing, 32(5), 26–31. https://doi.org/10.1016/J.NURSI.2015.10.011
11. Harris, H., & Crawford, A. (2015b). Diagnóstico y tratamiento de la artrosis. Nursing (Ed. Española), 32(5), 26–31. https://doi.org/10.1016/j.nursi.2015.10.011
12. He, Y., Zhang, H., Arens, E., Merritt, A., Huizenga, C., Levinson, R., Wang, A., Ghahramani, A., & Alvarez-Suarez, A. (2023). Smart detection of indoor occupant thermal state via infrared thermography, computer vision, and machine learning. Building and Environment, 228, 109811. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109811
13. Kovács, P., Lehner, B., Thummerer, G., Mayr, G., Burgholzer, P., & Huemer, M. (2020). Deep learning approaches for thermographic imaging. Journal of Applied Physics, 128(15), 155103. https://doi.org/10.1063/5.0020404/1077744
14. Mayoral Rojals, V., & Mayoral Rojals, V. (2021a). Epidemiología, repercusión clínica y objetivos terapéuticos en la artrosis. Revista de La Sociedad Española Del Dolor, 28, 4–10. https://doi.org/10.20986/RESED.2021.3874/2020
15. Mayoral Rojals, V., & Mayoral Rojals, V. (2021b). Epidemiología, repercusión clínica y objetivos terapéuticos en la artrosis. Revista de La Sociedad Española Del Dolor, 28, 4–10. https://doi.org/10.20986/RESED.2021.3874/2020
16. Ng, E. Y.-K. (2009). A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. International Journal of Thermal Sciences, 48(5), 849–859. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.06.015
17. Panella, F. W., Pirinu, A., & Dattoma, V. (2021). A Brief Review and Advances of Thermographic Image - Processing Methods for IRT Inspection: a Case of Study on GFRP Plate. Experimental Techniques, 45(4), 429–443. https://doi.org/10.1007/S40799-020-00414-4/TABLES/4
18. Pinedo, J. C. S. M., López, C. A. R., Grández, C. R., & Estrella, C. W. G. (2021). Reconocimiento de patrones de imágenes a través de un sistema de visión artificial en MATLAB. Revista Científica de Sistemas e Informática, 1(2), 15–26. https://doi.org/10.51252/RCSI.V1I2.131
19. Prada Pérez de Azpeitia, F. I. de. (2016). La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias, ISSN-e 1697-011X, Vol. 13, No. 3, 2016, Págs. 617-627, 13(3), 617–627. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5671446&info=resumen&idioma=SPA

20. Rodríguez Portal, J. A., López Ramírez, C., & Aguilera Cros, C. (2021). Artritis reumatoide y tabaco. Archivos de Bronconeumología, 57(5), 315–316. https://doi.org/10.1016/J.ARBRES.2020.05.021
21. Rodriguez-Veiga, D., González-Martín, C., Pertega-Díaz, S., Seoane-Pillado, T., Barreiro-Quintás, M., Balboa-Barreiro, V., Rodriguez-Veiga, D., González-Martín, C., Pertega-Díaz, S., Seoane-Pillado, T., Barreiro-Quintás, M., & Balboa-Barreiro, V. (2019). Prevalencia de artrosis de rodilla en una muestra aleatoria poblacional en personas de 40 y más años de edad. Gaceta Médica de México, 155(1), 39–45. https://doi.org/10.24875/GMM.18004527
22. Sara, M. C., Paola, P. G., & Claudia, A. A. (2012). Imaging studies in reumatology. Revista Medica Clinica Las Condes, 23(4), 377–383. https://doi.org/10.1016/S0716-8640(12)70328-0
23. Singh, D., & Singh, A. K. (2020). Role of image thermography in early breast cancer detection- Past, present and future. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 183, 105074. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105074
24. Toro-Gutiérrez, C. E., Arbeláez-Cortés, Á., Fernández-Aldana, A. R., Mejía-Romero, R. A., Méndez Patarroyo, P., Quintana L., G., Ruiz-Santacruz, O. O., Santos-Moreno, P., & Fernández-Ávila, D. G. (2023). Clinical practice guidelines for the early detection, diagnosis, treatment, and follow-up of patients with rheumatoid arthritis. Colombian Association of Rheumatology, 2022. Revista Colombiana de Reumatologia. https://doi.org/10.1016/J.RCREU.2023.02.001
25. Wei, Z., Osman, A., Valeske, B., & Maldague, X. (2023). Pulsed Thermography Dataset for Training Deep Learning Models. Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 2901, 13(5), 2901. https://doi.org/10.3390/APP13052901

PULSERA ELECTRÓNICA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA CORPORAL

Autor Ing. Alonso Santibañez Ung, José Irving Daniel Martínez Chávez

CIATEC A.C.
asantibanez@ciatec.mx, imartinez@ciatec.mx

RESUMEN

Los signos vitales son medidas de varias características fisiológicas humanas, generalmente tomadas por profesionales de la salud, para valorar las funciones corporales más básicas. Hay cuatro signos vitales principales que los médicos y otros profesionales de salud examinan de forma sistemática: temperatura corporal, pulso (o frecuencia cardíaca), presión arterial y frecuencia respiratoria.

La termorregulación o regulación de la temperatura es la capacidad que tiene un organismo biológico para modificar su temperatura dentro de ciertos límites, incluso cuando la temperatura circundante es bastante diferente del rango de temperaturas-objetivo. El término se utiliza para describir los procesos que mantienen el equilibrio entre ganancia y pérdida de calor. Si se añade o quita una determinada cantidad de calor a un cuerpo u objeto, su temperatura aumenta o disminuye, respectivamente, en una cantidad que depende de su capacidad calorífica específica con un ambiente.

La fiebre es una alteración del “termostato” corporal, ubicado en el hipotálamo, que conduce a un aumento de la temperatura corporal sobre el valor normal. Esto puede ser causados por: enfermedades infecciosas bacterianas, lesiones cerebrales o golpes de calor. Para medir la temperatura de una persona, se inventó el termómetro, instrumento de medición de temperatura que desde su invención ha evolucionado mucho, principalmente a partir del desarrollo de los termómetros digitales. Los termómetros digitales son aquellos que, valiéndose de dispositivos transductores como los mencionados, utilizan luego circuitos electrónicos para convertir en números las pequeñas variaciones de tensión obtenidas, mostrando finalmente la temperatura en un visualizador. Una de sus principales ventajas es que por no utilizar mercurio no contaminan el medio ambiente cuando son desechados.

La presente invención se refiere a un dispositivo que busca alertar el incremento en la temperatura de una persona, donde la temperatura es medida en tiempo real por medio de un sensor integrado a una pulsera cómoda y que no provoca ninguna molestia, y que al momento de detectar un nivel de temperatura febril, envíe un mensaje de alerta a un dispositivo móvil conectado a una misma red, a un adulto o persona responsable, con la finalidad de llevar acabo medidas pertinentes por medio de una atención temprana. Por ejemplo, se puede considerar el uso del dispositivo en guarderías ,escuelas, asilos o centros de trabajo en los cuales, las personas estén realizando sus actividades de manera normal, utilizando la pulsera de la presente invención, y que en caso de que aumente su temperatura a un estado febril, de inmediato le llegue un mensaje de alerta al docente, personal de enfermería, intendente, encargado, entre otros, para que de forma inmediata atiendan el caso donde una pulsera detectó el aumento en la temperatura, con la finalidad de removerlo del sitio para atenderlo inmediatamente, y de evitar oportunamente la propagación a sus compañeros de un virus o bacteria.

El presente diseño y desarrollo tiene por objeto la pronta atención a un usuario (por ejemplo, niños o adolescentes) que presente temperaturas febriles y con esto, además, aislar a dicho usuario para reducir los riesgos de contagio a terceros de algún tipo de virus o bacteria mediante el uso de un dispositivo tipo pulsera que mide la temperatura en tiempo real, que en cuanto se genere una medición de temperatura a niveles de fiebre, mande una alerta a los dispositivos celulares de personas capacitadas para realizar de inmediato los protocolos de atención, aislamiento y prevención necesarios, incrementando la posibilidad de atención oportuna a la persona enferma y

protegiendo de contagios al resto de la población que está siendo monitoreada en todo momento durante su estancia en el mismo lugar, como puede ser una escuela, un centro de trabajo, etcétera.

INTRODUCCIÓN

La medición de la temperatura corporal para monitorear pacientes, personas de riesgo o en necesidad de ser monitoreadas, sigue siendo hasta ahora mayormente de manera directa y presencial, independientemente del dispositivo de medición que se utilice.

La fiebre es una alteración del "termostato" corporal, ubicado en el hipotálamo, que conduce a un aumento de la temperatura corporal sobre el valor normal. Esto puede ser causados por: enfermedades infecciosas bacterianas, lesiones cerebrales o golpes de calor. Para medir la temperatura de una persona, se inventó el termómetro, instrumento de medición de temperatura que desde su invención ha evolucionado mucho, principalmente a partir del desarrollo de los termómetros digitales. Los termómetros digitales son aquellos que, valiéndose de dispositivos transductores como los mencionados, utilizan luego circuitos electrónicos para convertir en números las pequeñas variaciones de tensión obtenidas, mostrando finalmente la temperatura en un visualizador. Una de sus principales ventajas es que por no utilizar mercurio no contaminan el medio ambiente cuando son desechados.

La implementación de un sistema integral que monitorice la temperatura de las personas de manera remota en tiempo real, y que solo envíe notificaciones a un dispositivo móvil cuando exista una temperatura anómala hacia arriba de los límites normales, permitirá al contratante del servicio monitorear desde una persona hasta un gran número de ellas de manera constante, oportuna, y sin necesidad de estar siquiera en el mismo espacio físico, lo cual otorga la posibilidad de tomar medidas inmediatas al respecto, en atención y protección de la salud del afectado y de los que lo rodean en ese momento.

Por tanto, monitorear de manera remota y centralizada mediante un dispositivo móvil la temperatura corporal de las personas a través de una pulsera electrónica de contacto y de uso continuo por parte del usuario a supervisar, se convierte en una herramienta poderosa acorde a los tiempos modernos, para procurar en todo momento el buen estado de salud de un grupo, como personas en convalecencia, grupos escolares o centros de trabajo, dando una herramienta de certidumbre para esta nueva normalidad en la que todos tenemos y debemos convivir.

TEORÍA

El internet de las cosas (IoT) puede formularse como un sistema de objetos mutuamente relacionados, dispositivos computacionales, máquinas, animales, o personas, los cuales están equipados con identificadores únicos y la posibilidad de transferir datos sobre una red sin la necesidad de la interacción humano-a-humano o humano-a-computadora. Así, un sistema IoT consiste en activos conectados, los cuales pueden comunicarse y compartir información.

La IoT habilita activos para observar e interactuar con el ambiente alrededor, ellos pueden escuchar, ver, "pensar" y llevar a cabo las acciones requeridas mientras comparten información y coordinan decisiones. Como resultado, la IoT transforma la manera de estos activos desde uno tradicional a uno inteligente. Tal transformación se realiza con varias tecnologías importantes relacionadas, pero no limitadas a la computación, dispositivos embedidos, sensores de redes, estrategias de comunicación como también protocolos de internet. La figura 1 ilustra la estructura general del IoT.

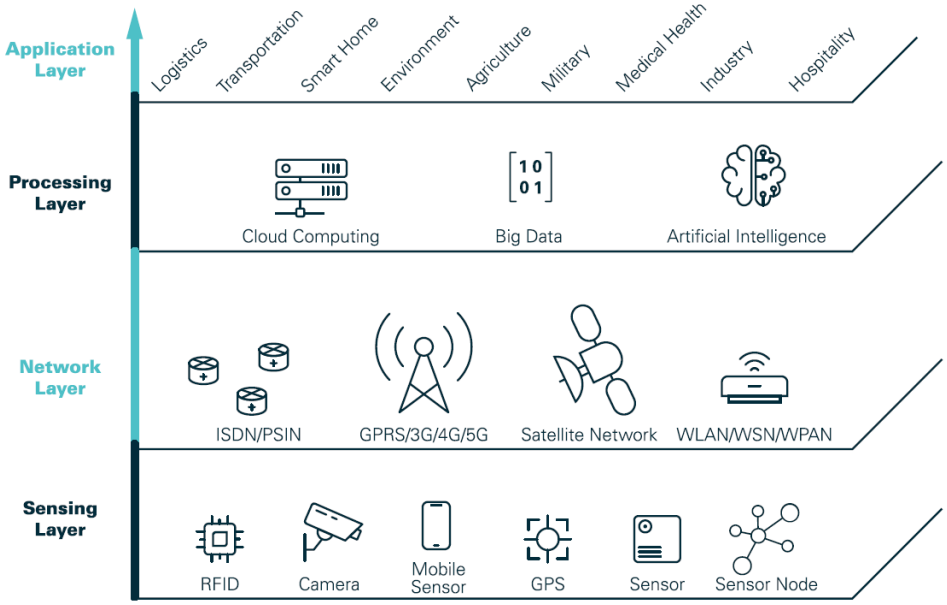


Figura 1: Arquitectura general del IoT

Cuidado de la salud

Similar a la industria hospitalaria y de ocio, el número de aplicaciones de IoT en el cuidado de la salud está proliferando. Generalmente, las aplicaciones pueden ser partidas en dos grupos: parámetros de salud y comportamiento del paciente.

Un sistema de monitoreo “e-health” basado en IoT es propuesto como una propiedad atractiva de este enfoque que apunta a controlar el aumento de temperatura mediante un sensor sobre el cuerpo, lo que afecta el confort de la piel.

La temperatura puede afectar las características electrónicas de los dispositivos semiconductores. A pesar de que esto es una desventaja en muchas aplicaciones, especialmente en dispositivos análogos, es posible convertirla en una ventaja si tal dispositivo es usado como sensor de temperatura. En principio, cualquier parámetro en un dispositivo de este tipo que tiene un coeficiente de temperatura se puede utilizar para medir la temperatura. Por ejemplo, se ha desarrollado una cápsula de telemetría de temperatura, en la que la frecuencia de un oscilador de bloqueo varía con la temperatura, para medir la temperatura gastrointestinal.

PARTE EXPERIMENTAL

El prototipo se desarrolló con la metodología de cascada para dos módulos, el de software y el de la pulsera electrónica de medición de temperatura.

Pulsera electrónica de medición de temperatura

En el proceso del diseño y desarrollo de la pulsera electrónica de medición de temperatura corporal, en primera instancia se procedió a revisar el estado del arte, desde los relojes comerciales que entre tantas cosas miden la temperatura corporal, hasta aplicaciones que hacen lo mismo y que son en su mayoría para checar directamente en el mismo dispositivo.

Se ha tomado en cuenta la viabilidad del desarrollo tomando en cuenta los costos de producción de la pulsera, con la finalidad de utilizar la electrónica justa para mantenerla razonablemente asequible y viable para una implementación futura.

Se consideró el desarrollo del prototipo bajo la premisa de que debe integrar un termómetro electrónico y un circuito para conectarlo a la red WIFI, mecanismo por el cual enviará la información de la temperatura al controlador central. Aunado a lo anterior, se ha definido insertar este circuito en una pulsera de plástico suave, para que al usuario no le moleste mientras la tenga puesta y un contenedor rígido para la parte electrónica (*Figura 2*)

Figura 2: Vista isométrica lateral superior de la pulsera electrónica para medición de temperatura corporal (correa flexible, contenedor plástico rígido)

A la par del diseño de la pulsera, la electrónica de medición y envío de datos comenzó la etapa de desarrollo y pruebas, en donde reporta datos de la temperatura cada minuto, mediante un formato Json hacia el servidor central para su procesamiento. Este diseño preliminar ya contiene el WIFI y el termómetro de medición para las pruebas generales (*Figura 3 y 4*).

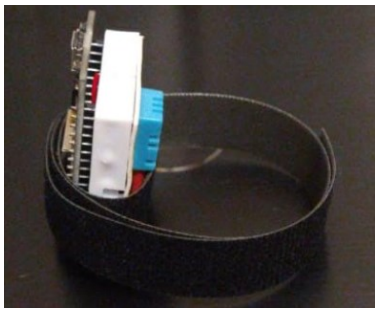


Figura 3: Prototipo incial de electrónica de medición de temperatura

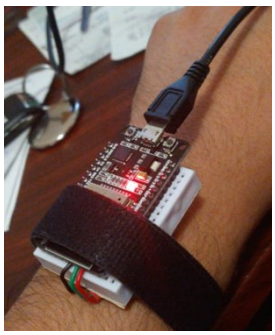


Figura 4: Prototipo inicial de medición de temperatura puesto sobre la muñeca y en funcionamiento

Módulo de software

El prototipo de software se desarrolló con base en las etapas secuenciales clásicas de Análisis, diseño y desarrollo.

Se ha diseñado una arquitectura de fácil implementación, por lo que la pulsera se conecta a una red WIFI, a través de la cual envía datos a un servidor central solventando mediante esta implementación el hecho de que todas las pulseras deberían tener un chip para transmitir datos, abaratando su coso final.

Una vez que los datos llegan al servidor central mediante una aplicación de servicios Web, esta coteja el ID de la pulsera que trasmite el dato con una base de datos para revisar si es que la temperatura corporal reporta fiebre y entonces enviar un mensaje al dispositivo móvil Android que esté asociado a esta pulsera, reportando la situación en ese mismo instante al responsable registrado para monitorear esa pulsera en específico, lo cual le da la oportunidad de actuar de inmediato para atender a la persona y contener posibles contagios extras.

En la figura 4, se muestra un ejemplo de notificación al dispositivo móvil del encargado, sobre una persona que presenta en este caso de ejemplo, 40 grados de temperatura.

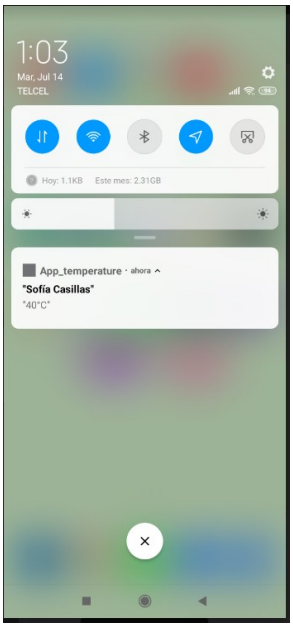


Figura 4: Ejemplo de notificación a dispositivo móvil

RESULTADOS

Con el desarrollo de los módulos descritos anteriormente, se obtuvo un prototipo de aplicación de medición de temperatura corporal de manera remota.

Se identificaron los componentes electrónicos con los que se obtiene un balance entre exactitud, rendimiento y asequibilidad necesarios para ser una solución viable para la población en general.

Se desarrolló el software al que la pulsera transmite los datos vía internet a través del WIFI al que se conecta y el cual procesa dicha información para determinar si envía o no una alerta de fiebre corporal al dispositivo móvil registrado para monitorear el ID de la pulsera que está enviando los datos.

Este desarrollo y modelo de utilidad está en etapa de prototipo, siendo mejorable en la actualidad respecto a los módulos electrónicos actuales y al software desarrollado inicialmente.

CONCLUSIONES

La utilización e integración de la tecnología de la llamada actualmente Industria 4.0 para resolver problemas como el monitorear información como la temperatura corporal de las personas para ayudar a tomar acciones inmediatas para la atención del enfermo y evitar al máximo la propagación de la enfermedad hacia las demás personas a su alrededor, es una herramienta muy poderosa en esta nueva normalidad en la que todos debemos seguir conviviendo en centros de trabajo, escuelas, hospitales, asilos etcétera, por lo que genera mayor certidumbre a los usuarios y hace más eficiente el trabajo de las los encargados de otros grupos de personas al tener la confianza de que pueden ocuparse de otras tareas sin tener que estar atentos a los cambios de comportamiento de los integrantes de los grupos para determinar si tienen una afección, por lo que se determina que es viable llevar a un nivel de desarrollo más alto este prototipo para poder comercializarlo en el futuro.

BIBLIOGRAFÍA

1. Marcin Witczak , Lothar Seybold , Eric Bulach , Niko Maucher, “Modern IoT Onboarding Platforms for Advanced Applications”, IoT Overview, Chapter 1, pp. 1,8.
2. Tatsuo Togawa, “Integrated Circuit Temperature Sensor”, Chapter 1, pp1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS LEAN Y ERGONOMÍA EN EL PROCESO DE PRENSAS DE UNA EMPRESA DEDICADA A LA PRODUCCIÓN DE EVA

Armando Mares Castro, María de Lourdes Oliva Barboza, José Ramón Gómez Armenta y Marcela Palacios Ortega

Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle # 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato. C.P. 36413, México.
armando.mc@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

La detección de los desperdicios en los procesos es una actividad necesaria para la mejora continua y la búsqueda de la productividad. Una de las áreas de mayor interés dentro del Lean es el tiempo de cambio de moldes, ya que de esto dependerá la capacidad de la empresa para generar diferentes tipos de productos para satisfacer la demanda del cliente, por lo cual es necesario optimizar los tiempos de cambio mediante la metodología SMED en conjunto con otras herramientas para lograr los mejores resultados. Este caso de análisis se aplicó en una empresa de San Francisco del Rincón, Guanajuato, dedicada a la fabricación de productos de EVA en la cual no se habían aplicado previamente técnicas de ingeniería en el área de moldes. La EVA es producida en láminas con una longitud y grosor específicos, los cuales se obtienen mediante el uso de moldes que presentan algunas dificultades en sus cambios, ya que presentan dimensiones y peso considerables, por lo que el tiempo de cambio registrado inicialmente es considerable y requirió de un análisis para su optimización. La metodología propuesta se basa en el uso de la herramienta SMED, utilizada para reducir los tiempos de cambio con base en un procedimiento sistemático de eliminación de actividades que no generan valor partiendo de su clasificación en internas y externas. Asimismo, se integran estrategias de trabajo estandarizado, diseño ergonómico y Poka Yoke para mejorar la efectividad del SMED, ya que estas estrategias permiten implementar métodos más eficientes para las actividades de cambio y la estandarización de los procedimientos. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que se logró reducir el tiempo de cambio de 2 horas a 1 hora y 12 minutos, con lo cual se tiene un aprovechamiento aproximado de 40 minutos en cada cambio realizado, lo cual se traduce en un impacto positivo en la productividad del proceso y mejor tiempo de respuesta hacia la demanda del cliente mejorando el flujo del proceso. Las metodologías Lean se orientan hacia la mejora del flujo del proceso y la reducción de desperdicios, entre los cuales se encuentran las ineficiencias y las actividades que no generan valor al proceso. Este enfoque hacia la mejora de los tiempos de cambio de moldes presentó buenos resultados, ya que inicialmente no se tenía conciencia de la importancia de reducir actividades sin valor agregado en este proceso y se percibía de forma natural que el tiempo de cambio debe ser tardado, el involucramiento del personal y jefes de producción, gerencia de proyectos, jefes de seguridad y salud, supervisores, calidad, y mantenimiento ayudó a que las modificaciones en el cambio fueran aceptadas de forma natural debido a la participación y sugerencias emitidas por cada una de las partes, generándose una línea de base para la mejora continua del proceso.

Keywords: Proceso de Fabricación de EVA, SMED, Trabajo Estandarizado, Ergonomía.

INTRODUCCIÓN

El trabajo estandarizado (T.E.) es una técnica de ingeniería que involucra a los operadores en la mejora continua de sus tareas. La descripción clara de las tareas en pasos básicos facilita que el trabajo sea simple y alcanzable, mejorando la estabilidad al identificar condiciones normales y anormales y al eliminar actividades que no agregan valor al producto [1].

El programa CANDO de Ford Motor Company, desarrollado después de la Segunda Guerra Mundial, sentó las bases para la creación de la doctrina de las 5S por Hiroyuki Hirano. Las 5S son fundamentales para el desarrollo de cualquier proceso de mejora continua. Las etapas de las 5S son las siguientes [2]:

- Descartar: Eliminar todos los elementos innecesarios en el área de trabajo.
- Ordenar: Organizar todos los elementos necesarios para la tarea, asignando un lugar específico para cada uno.
- Limpiar: Realizar una limpieza a fondo en el lugar de trabajo.
- Estandarizar: Asegurar que los procedimientos y actividades se implementen de forma consistente.
- Mantener: Controlar y seguir las cinco actividades, evaluando constantemente para obtener retroalimentación y mantener los buenos hábitos.

Estas estrategias son esenciales para cualquier iniciativa de mejora continua, ya que crean un entorno de trabajo más eficiente y organizado. En la etapa 4 de las 5S, la estandarización en manufactura se refiere a asegurar que los productos utilicen componentes estandarizados y que los procesos de fabricación se realicen de la misma manera cada vez. En los servicios, esto implica que las tareas se realicen de forma estandarizada mediante el uso de listas de verificación, procedimientos e instrucciones. Si el trabajo es complicado, se deben separar las operaciones estandarizables y controlar estrictamente las operaciones personalizadas [3].

Las bases de la estandarización moderna fueron establecidas por Eli Whitney, quien impulsó la producción en masa con el uso de piezas intercambiables. Frederick Taylor introdujo la medición científica para crear métodos de trabajo estándares relacionados con la remuneración de los trabajadores. Taylor analizaba cada operación, las descomponía en elementos, medía las operaciones y sus componentes, y determinaba los tiempos de ciclo.

Shigeo Shingo, uno de los gurús del Lean Manufacturing (LM), entendía que los procesos funcionan como cadenas de flujo, que pueden optimizarse mediante la estandarización del trabajo y la medición de capacidad y demanda. Su objetivo era crear flujos continuos y sin interrupciones, de modo que la producción funcionara según la demanda del cliente y a la velocidad que esta impusiera. La variabilidad está presente en todos los elementos de un modelo de productividad, desde los insumos hasta los procesos y los resultados [4].

El T.E. se basa en la excelencia operacional. Sin el T.E. no se puede avalar que en las operaciones siempre se produzcan los productos de la misma manera. El T.E. hace posible aplicar los elementos del LM, ya que precisa de la manera más eficaz los métodos de trabajo para lograr la mejor calidad y los costos más bajo [5]. Los elementos del T.E. son los siguientes:

- El Takt time (TT), también llamado rapidez de la demanda, el cual se puede establecer de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{TT} = \frac{\boldsymbol{Tiempo\ de\ operación} - \textbf{Paradas planeadas}}{\boldsymbol{Demanda\ del\ cliente}} \quad (1)$$

- La secuencia estandarizada de las operaciones.
- El inventario estándar del proceso.

La estandarización es el proceso de hacer que un sistema existente, o uno nuevo, cumpla con un estándar. Esta herramienta se utiliza para asegurar que las mejoras realizadas mediante metodologías de resolución de problemas sean sostenibles. Sin una adecuada documentación de los detalles y cambios por parte del encargado de la resolución de problemas, los beneficios no podrán mantenerse y probablemente se perderán en poco tiempo. Como parte del proceso de

estandarización, la preparación del procedimiento de estandarización de partes debe realizarse en conjunto con las partes interesadas, lo cual es crucial para el éxito del proceso [6].

La estandarización de las condiciones de frontera es clave para que los empleados puedan expresarse de manera activa y creativa en la exploración de posibilidades y capacidades, logrando así flexibilidad organizacional [7]. Los esquemas de implementación del T.E. pueden desarrollarse en relación con las tareas diarias de los líderes ejecutivos, generando nuevos tipos de liderazgo y habilidades estándar para ejecutivos [8]. La visualización y estandarización en los procesos de negocios pueden ayudar a las organizaciones a mejorar su desempeño organizacional [9]. Además, Lantz, Hansen y Antoni [10] indican que el aprendizaje en equipos se estimula mediante la proactividad y el trabajo estandarizado.

Además de la implementación de metodologías LM y T.E., la optimización del tiempo de cambio de moldes mediante la metodología SMED (Single Minute Exchange of Die) es crucial. El SMED se centra en reducir el tiempo de cambio clasificando las actividades en internas y externas, y transformando tantas actividades internas como sea posible en externas para realizar los cambios rápidamente y con mínima interrupción del proceso productivo [11]. Integrar estrategias de ergonomía en el diseño de los procedimientos de cambio es igualmente importante, ya que mejora la eficiencia y seguridad de los operadores. La ergonomía se enfoca en adaptar el entorno de trabajo a las capacidades y limitaciones humanas, minimizando esfuerzos físicos excesivos y riesgos de lesiones. Al combinar SMED con un diseño ergonómico, se logra una mejora significativa no solo en los tiempos de cambio, sino también en la comodidad y bienestar de los trabajadores, contribuyendo a un entorno laboral más saludable y productivo [12].

TEORÍA

Los estudios sobre LM reportan que el sector automotriz ha sido el foco principal de la investigación, aunque también ha sido adaptado por otras industrias que han implementado Lean a lo largo de sus cadenas de suministro mediante una amplia variedad de prácticas de gestión, incluyendo el ciclo de mejora definir- medir- analizar- mejorar- controlar (DMAIC) y la industria 4.0 [13]. Las líneas de ensamblaje se vuelven más productivas después de aplicar el T.E. debido al rediseño de los procesos de ensamblaje [14]. El incremento de implementaciones de LM ha impulsado a los investigadores a desarrollar una variedad de mecanismos y metodologías para evaluar y mejorar los sistemas [15].

Mor et al. [16] reportan un estudio sobre incrementos en productividad mediante el uso de T.E. e instrucciones en una compañía de manufactura. La industria automotriz en Suecia ha reportado casos exitosos de implementación de T.E., mostrando su eficiencia al manejar sistemas complejos [17]. Aplicaciones interesantes del T.E. También se han dado en almacenes farmacéuticos, con una reducción de errores del 2.35% [18]. En la manufactura de textiles, la estandarización ha incrementado la productividad y reducción de defectos, además de mejorar la percepción de los trabajadores.

La integración del T.E. con otras herramientas de las Core Tools, como el Análisis de Modo y Efecto de Fallas para Procesos (PFMEA), el plan de control y el plan de procesos, ha reportado mejoras significativas en la reducción de costos, pasos de ensamblaje y tiempos de entrega en la manufactura de maquinaria [19]. Los beneficios del T.E son evidentes en la industria de la construcción, donde la aplicación de los pasos principales del método, junto con los procesos de recolección de datos, análisis y documentación, han reportado mejoras en la productividad del 45% en maquinaria y del 70% para la fuerza laboral en una implementación ideal [20].

El Poka Yoke y la ergonomía son esenciales en el diseño y las aplicaciones industriales para mejorar la calidad y la eficiencia de los procesos productivos. El Poka Yoke, o "a prueba de errores", es una técnica que previene defectos y errores humanos mediante el diseño de procesos y herramientas que eliminan la posibilidad de cometer errores. Esto no solo reduce costos asociados con retrabajos

y desperdicios, sino que también mejora la seguridad y la satisfacción del trabajador. La ergonomía, por otro lado, se enfoca en adaptar el entorno de trabajo a las capacidades y limitaciones humanas, minimizando el riesgo de lesiones y fatiga, y mejorando la comodidad y eficiencia del trabajador. Juntas, estas estrategias contribuyen a crear un entorno de trabajo más seguro, eficiente y productivo, fomentando tanto la calidad del producto como el bienestar del personal.

En conclusión, la revisión documental resalta la eficacia y adaptabilidad de las metodologías Lean, incluyendo el T.E. y el SMED, en diversos sectores industriales más allá de la automotriz. La implementación de estas técnicas, junto con estrategias complementarias como el Poka Yoke y la ergonomía, ha demostrado mejorar significativamente la productividad, reducir errores y defectos, y promover un entorno laboral más seguro y eficiente. Estas prácticas no solo optimizan los procesos y reducen costos, sino que también contribuyen al bienestar y la participación de los trabajadores, subrayando la importancia de una integración holística de herramientas Lean en la mejora continua de los sistemas productivos.

PARTE EXPERIMENTAL

La presente sección describe la metodología propuesta para la optimización del proceso de cambio de moldes en la fabricación de productos de EVA, integrando diversas herramientas y técnicas de mejora continua. El enfoque metodológico se estructura en cuatro pasos fundamentales (Figura 1):

- Primero, la aplicación de herramientas de trabajo estandarizado para asegurar la consistencia y eficiencia en las operaciones.
- Segundo, se llevará a cabo una evaluación de riesgos ergonómicos mediante las metodologías REBA (Rapid Entire Body Assessment) y RULA (Rapid Upper Limb Assessment) para identificar y mitigar los factores de riesgo asociados a las tareas físicas de los operarios.
- Tercero, se implementará la metodología SMED para reducir los tiempos de cambio de moldes, aumentando así la flexibilidad y capacidad de respuesta del proceso productivo.
- Finalmente, se elaborará un plan de mantenimiento preventivo para asegurar la sostenibilidad de las mejoras implementadas y garantizar la continuidad operativa. Esta metodología integral no solo busca mejorar la eficiencia y productividad del proceso, sino también promover un entorno de trabajo seguro y ergonómicamente adecuado para los trabajadores.

Figura 1. Metodología Propuesta.

Para la elaboración del Trabajo Estándar se llevará a cabo una serie de actividades para obtener un formato realizado de cada uno de los que comprende esta metodología mencionada en el marco teórico, dando seguimiento a tres tipos de productos que son procesados en el área de Prensas por sugerencia del jefe de producción, las actividades que se realizaron fueron las siguientes.

- Layout y diagrama de recorridos.
- Hoja de medición de tiempos.
- Capacidad de operación.
- Cuadro combinado de operaciones estandarizadas.
- Hoja de Trabajo estándar.
- Instrucciones de operación.
- Balanceo de líneas.
- Gráfica de equilibrio y Takt Time.
- Muestreo del Trabajo.

Dentro del proceso de cambio de moldes en la sección de Prensas, se observó que los operarios realizan maniobras potencialmente peligrosas que pueden causar torceduras o, a largo plazo, problemas en sus articulaciones. Para abordar esta problemática, se aplicarán las evaluaciones ergonómicas REBA y RULA. Tras realizar estas evaluaciones, se analizarán los resultados y se elaborará un procedimiento de trabajo documentado. Este procedimiento servirá para informar a los operarios sobre los riesgos que enfrentan inconscientemente y para guiarlos en la adopción de prácticas más seguras. Además, se fomentará la colaboración de los operarios para mejorar las condiciones de trabajo durante el cambio de moldes, contribuyendo así a un entorno laboral más seguro y saludable.

La aplicación del SMED es una herramienta fundamental para este estudio. Su elaboración e implementación comenzarán con la identificación de las actividades realizadas durante el cambio de moldes y su clasificación como actividades internas y externas. Una vez identificadas, se procedió a la toma de tiempos para analizar la situación actual antes de aplicar las mejoras. Los tiempos registrados antes de la mejora se documentaron en el formato SMED, en el cual se genera una

sumatoria del tiempo total empleado en el cambio de moldes. Además, se incluirá una columna para registrar el tiempo potencial que podría lograrse por operación tras la implementación de las mejoras.

Tras obtener los tiempos, se identificarán las áreas de oportunidad en esta actividad para desarrollar una estrategia de mejora. Para esto, se utilizará otro formato del SMED, conocido como la "Hoja de planeación para implementación de mejoras". Este documento listará las herramientas y técnicas que se pueden implementar para enriquecer la aplicación del SMED y optimizar el proceso de cambio de moldes. Dentro de esta aplicación se realizaron mejoras ergonómicas con base al estudio de REBA y RULA, así como el diseño de estantes y carritos que ayudan a la colocación más rápida y segura de los moldes al momento de hacer los cambios.

El plan de Mantenimiento Preventivo surgió de la necesidad de garantizar que las prensas se encuentren en condiciones óptimas de funcionamiento, ya que inicialmente no existía un formato que certifique su estado. Para desarrollar e implementar este plan, primero se identificaron los problemas más frecuentes que suelen ocurrir en las prensas. Estas fallas se documentaron en el formato de mantenimiento preventivo. Al registrar estos problemas, se pueden anticipar y prevenir paradas de producción inesperadas que requieren mantenimiento correctivo, lo cual puede consumir tiempo considerable y afectar la capacidad de cumplir con el programa de producción diario. Con un plan de mantenimiento preventivo bien estructurado, se mejorará la eficiencia operativa y se minimizarán las interrupciones en la producción.

RESULTADOS

Dentro de los análisis de mayor interés en este estudio, se encuentra el Layout integrado al diagrama de recorridos, con el cual se pudieron determinar áreas de oportunidad para la redistribución y reducción de distancias de recorrido innecesarias en el área de vulcanizado de prensas, como se muestra en la Figura 2.

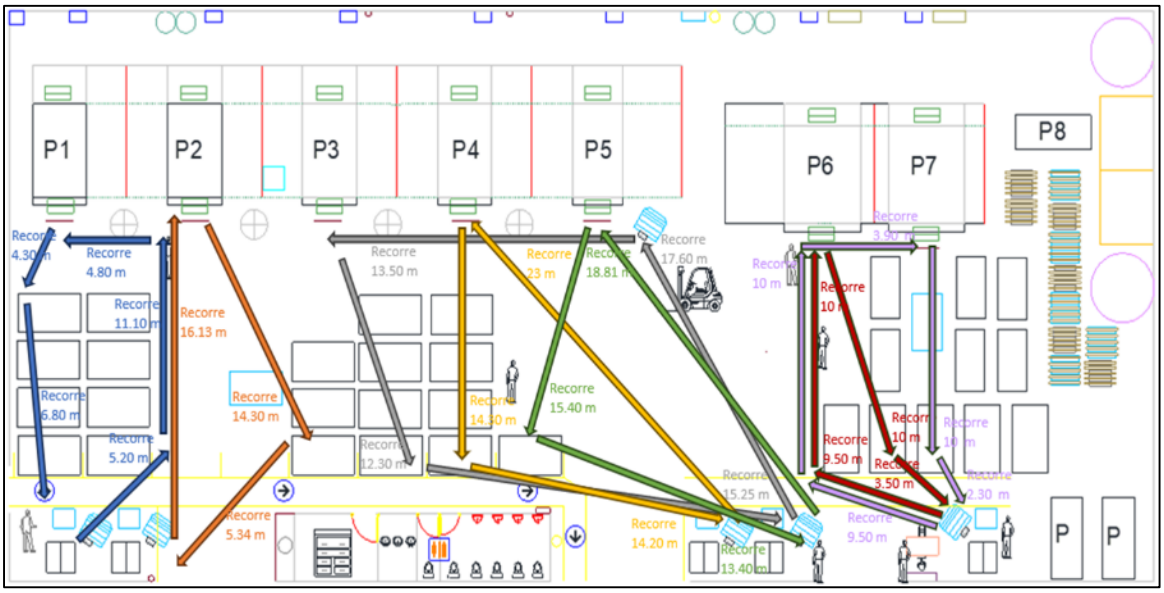


Figura 2. Layout y diagrama de recorridos en el área de prensas.

Una vez cronometrados los tiempos de proceso, se realizó el análisis de la capacidad de operación (Figura 3), en el cual se identificaron las capacidades para cada uno de los procesos, además de clasificar aquellos que son manuales o en máquina, así como los cambios de herramental involucrados en el proceso, lo cual es de especial interés para su optimización con el SMED.

Prensista	Felipe	CAPACIDAD DE OPERACIÓN						Parte No.	3		Tipo prod.	En serie	Sección	Prensa 03
Coordinador	Ismael							Nombre	EVA 32 Blanco Grb Liso		Partes/Product o	1	Tiempo disponible	79140
Secuencia	Nombre de proceso	Máquina No.	Tiempo estándar						Cambios de herramental		Capacidad de Manufactura		Observaciones	
			Manual		Automático		Total		Incremento de cambios	Tiempo de cambio				
			Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.						
1	Pesado	04	0	540.00	0	0.00	0	540.00	0	0	147		Trabaja a un buen ritmo, es constante y tiene habilidad	
2	Vulcanizado	03	0	300	0	1740	0	2040.00	0	0	39		Trabaja a un buen ritmo, es constante solo que algunas veces sale de su área de trabajo	
3	Enfriado		0	2160.00	0		0	2160.00	0	0	37		Es hábil a excepción de que se distrae muy fácilmente	
4	Limpiado (Refilado)		0	660.00	0	0	0	660.00	0	0	120		Algunas veces se retira a hacer otro tipo de actividades que no le agregan valor al producto	

Figura 3. Hoja de capacidad de la Operación.

Otra herramienta Lean dentro de T.E. que es de especial interés es la hoja de trabajo estándar (Figura 4), mediante la cual se puede especificar una configuración más adecuada del espacio de trabajo y la ubicación de elementos de valor agregado y desperdicios en el proceso, generando un punto de partida para la optimización.

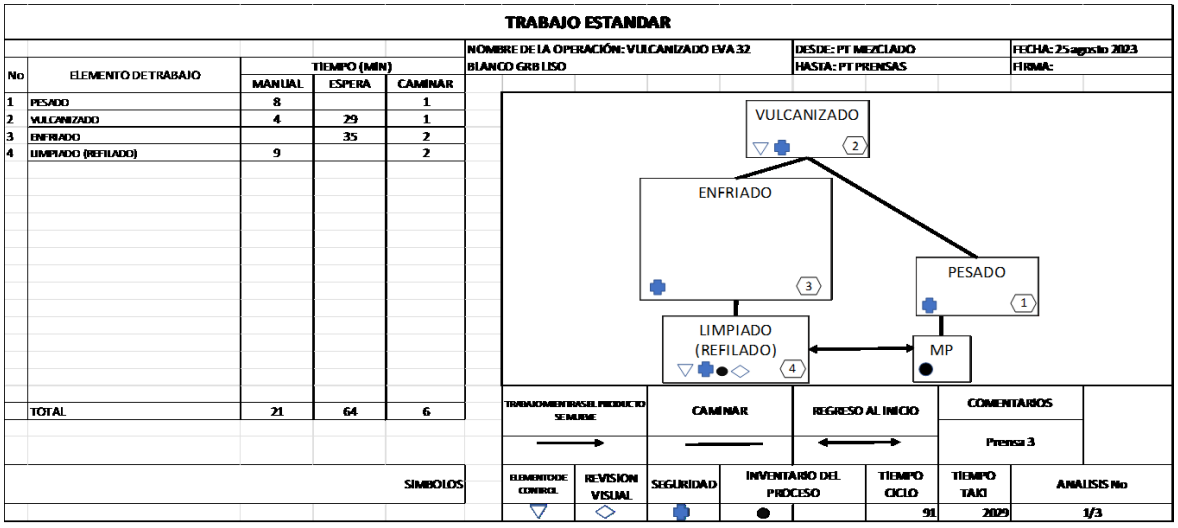
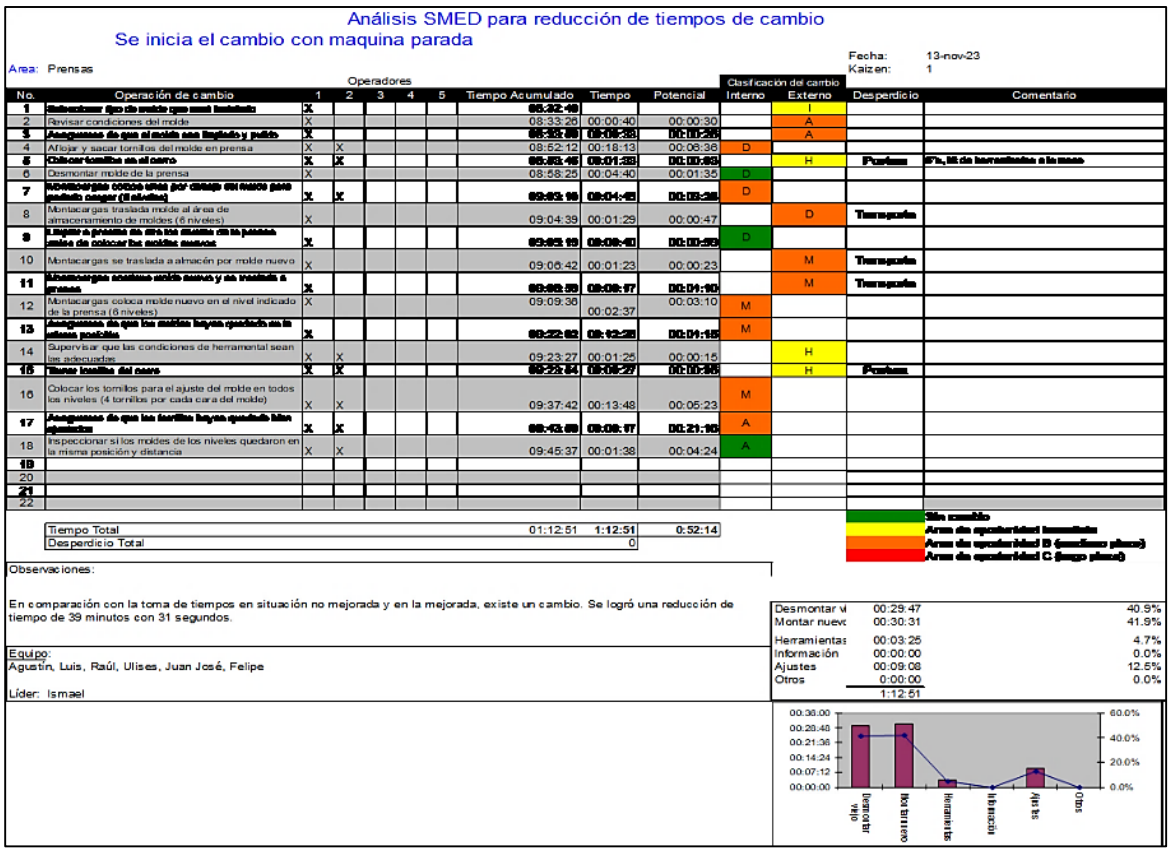


Figura 4. Hoja de capacidad de la Operación

Una vez identificadas las actividades, es crucial proceder con la toma de tiempos para evaluar la eficiencia actual en términos de duración antes de implementar mejoras. Para este propósito, se empleó un formato específico relacionado con la metodología SMED, suministrado por un asesor interno. Este formato se ilustra en la Figura 5. En esta Figura, se registra el tiempo empleado por los prensistas en el cambio de moldes, el cual se calculó en 1 hora con 52 minutos. Además, se muestra en otra columna el tiempo potencial de 52 minutos, el cual se consideraría alcanzable una vez que las mejoras sean implementadas.



Análisis SMED para reducción de tiempos de cambio

Se inicia el cambio con maquina parada

Area: Prensas

Fecha: 13-nov-23

Kaizen: 1

No.	Operación de cambio	Operadores 1	2	3	4	5	Tiempo Acumulado	Tiempo	Potencial	Clasificación del cambio Interno	Externo	Desperdicio	Comentario
1	[illegible]	X					08:32:48				I		
2	Revisar condiciones del molde	X					08:33:28	00:00:40	00:00:30		A		
3	[illegible]	X					08:35:08	00:01:39	00:01:35		A		
4	Aflojar y sacar tornillos del molde en prensa	X	X				08:52:12	00:18:13	00:06:36	D			
5	[illegible]	X	X				08:53:46	00:01:33	00:01:03		H	Poke	[illegible]
6	Desmontar molde de la prensa	X					08:58:25	00:04:40	00:01:35	D			
7	[illegible]	X	X				09:03:10	00:04:45	00:03:38	D			
8	Montacargas traslada molde al área de almacenamiento de moldes (6 niveles)	X					09:04:39	00:01:29	00:00:47		D	Transporte	
9	[illegible]	X					09:05:19	00:00:40	00:00:53	D			
10	Montacargas se traslada a almacén por molde nuevo	X					09:06:42	00:01:23	00:00:23		M	Transporte	
11	[illegible]	X					09:08:39	00:01:57	00:01:30		M	Transporte	
12	Montacargas coloca molde nuevo en el nivel indicado de la prensa (6 niveles)	X					09:09:36	00:02:37	00:03:10	M			
13	[illegible]	X					09:22:02	00:12:26	00:01:15	M			
14	Supervisar que las condiciones de herramental sean las adecuadas	X	X				09:23:27	00:01:25	00:00:15		H		
15	[illegible]	X	X				09:23:54	00:00:27	00:00:35		H	Poke	
16	Colocar los tornillos para el ajuste del molde en todos los niveles (4 tornillos por cada cara del molde)	X	X				09:37:42	00:13:48	00:05:23	M			
17	[illegible]	X	X				09:43:09	00:05:27	00:21:30	A			
18	Inspeccionar si los moldes de los niveles quedaron en la misma posición y distancia	X	X				09:45:37	00:01:38	00:04:24	A			
19													
20													
21													
22													

Tiempo Total	01:12:51	1:12:51	0:52:14
Desperdicio Total		0	

[illegible]

Observaciones:

En comparación con la toma de tiempos en situación no mejorada y en la mejorada, existe un cambio. Se logró una reducción de tiempo de 39 minutos con 31 segundos.

Equipo:
Agustín, Luis, Raúl, Ulises, Juan José, Felipe

Líder: Ismael

Desmontar vi	00:29:47	40.9%
Montar nuev	00:30:31	41.9%
Herramientas	00:03:25	4.7%
Información	00:00:00	0.0%
Ajustes	00:09:08	12.5%
Otros	0:00:00	0.0%
	1:12:51	

Figura 5. Formato para el análisis SMED.

Una aportación importante dentro del diseño del SMED fue la integración obtenida en el T.E., el análisis REBA y RULA, y el proceso normal del cambio de actividades internas a externas para visualizar áreas de oportunidad en el diseño de elementos Poke Yoke para evitar errores, mejorar la ergonomía de los trabajadores involucrados en el proceso del cambio y optimizar el tiempo. En esta propuesta se diseñaron y elaboraron estantes y carritos que sirven como elementos para la manipulación adecuada de herramientas y tornillería, así como base para la colocación de los moldes, los cuales son muy pesados y requieren cuidados especiales. Estos elementos se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Estantes y Carritos diseñados.

En la Figura 7 se muestra un comparativo de la productividad que se obtiene en los dos turnos a partir de un muestreo del trabajo realizado, en el cual se puede verificar una productividad aceptable una vez realizados los cambios con la metodología propuesta. Cabe señalar que la productividad es un proceso de mejora continua y puede lograrse un nivel de productividad superior.

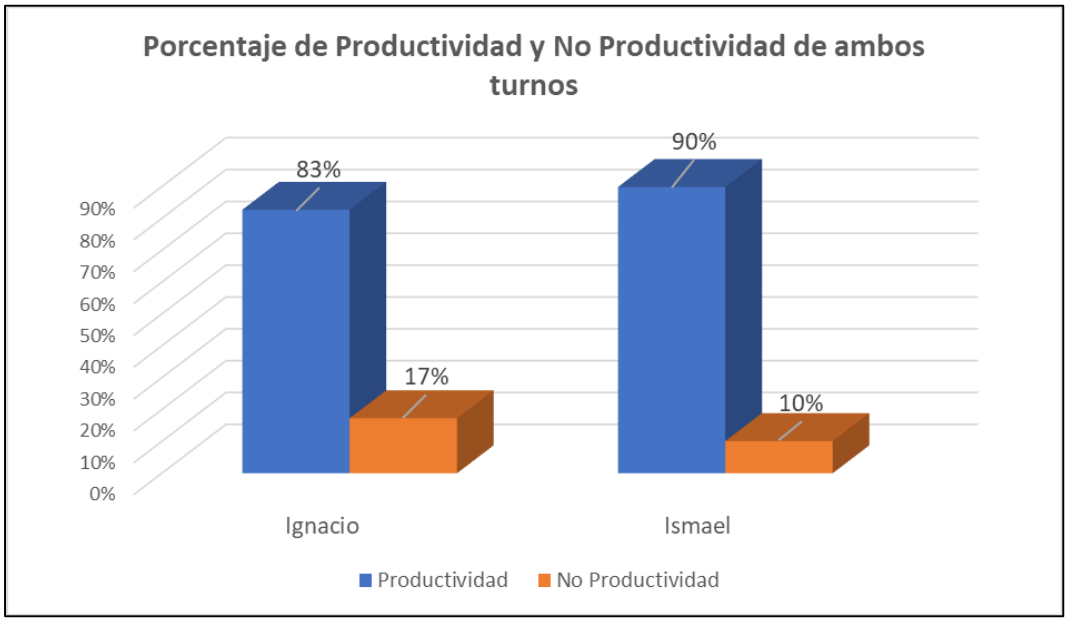


Figura 7. Productividad obtenida en los dos turnos.

CONCLUSIONES

La implementación de diversas herramientas y metodologías ha resultado en mejoras significativas en el proceso de cambio de moldes en la fabricación de productos de EVA. Se logró obtener tiempos estándar de operaciones y determinar la capacidad del proceso, lo que permitió balancear las líneas de producción y reducir la variabilidad entre operarios. El análisis detallado del proceso mediante el

cuadro combinado de operaciones estandarizadas y la hoja del trabajo estándar proporcionó información crucial para la aplicación efectiva del SMED.

La evaluación inicial de posturas forzadas (REBA) y movimientos repetidos (RULA) reveló niveles de riesgo alto, lo cual fue fundamental para el diseño del SMED y la identificación de actividades que no generan valor durante los cambios de moldes. La aplicación del SMED resultó en una reducción significativa del tiempo de cambio, pasando de 1 hora 52 minutos y 52 segundos a 1 hora 12 minutos y 51 segundos, lo que representa una disminución del 35%.

Los estudios preliminares del trabajo estándar y la evaluación de riesgos facilitaron la implementación efectiva de las mejoras del SMED al identificar áreas de oportunidad para optimizar los tiempos internos y externos. Además, el diseño de una base mejorada para los moldes, así como la implementación de un estante especial y un carrito de herramientas como poka-yokes, contribuyeron significativamente a la eficiencia del proceso.

Como propuestas futuras, se sugiere continuar con el seguimiento y la optimización del plan de mantenimiento preventivo, con el objetivo de mejorar las actividades del equipo de mantenimiento y prevenir la ocurrencia de fallas que puedan afectar la productividad del proceso. Además, se podría explorar la aplicación de tecnologías emergentes, como la digitalización de los procesos de mantenimiento, para aumentar la eficiencia y reducir los tiempos de inactividad no planificados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Marksberry, P., Rammohan, R., & Vu, D. (2011). A systems study on standardised work: A Toyota perspective. *International Journal of Productivity and Quality Management*, *7*(3), 287–303. https://doi.org/10.1504/IJPQM.2011.039349
2. Pinto, J. L. Q., Matias, J. C. O., Pimentel, C., Azevedo, S. G., & Govindan, K. (2018). Lean Manufacturing Tools. *Management for Professionals*, 39–112. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77016-1_4
3. Martin, J. W. (2021). Lean Six Sigma for the Office: Integrating Customer Experience for Enhanced Productivity. In *Lean Six Sigma for the Office: Integrating Customer Experience for Enhanced Productivity*. Taylor and Francis. https://doi.org/10.4324/9781003049494/LEAN-SIX-SIGMA-OFFICE-JAMES-WILLIAM-MARTIN
4. Shingō, S., Dillon, A. P., & Bodek, N. (1986). *Zero quality control : source inspection and the poka-yoke system*. Productivity Press. https://www.routledge.com/Zero-Quality-Control-Source-Inspection-and-the-Poka-Yoke-System/Shingo/p/book/9780915299072
5. Socconini, L. (2019). *Lean Manufacturing. Paso a Paso*. ICG Marge, SL. https://books.google.com.mx/books?id=rjyeDwAAQBAJ
6. Samanta, M. (2019). Lean Problem Solving and QC Tools for Industrial Engineers. In *Lean Problem Solving and QC Tools for Industrial Engineers*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429441707/LEAN-PROBLEM-SOLVING-QC-TOOLS-INDUSTRIAL-ENGINEERS-MAHARSHI-SAMANTA
7. Cabri, G., & Fioretti, G. (2022). Flexibility out of standardization. *International Journal of Organization Theory and Behavior*, *25*(1–2), 22–38. https://doi.org/10.1108/IJOTB-11-2020-0197/FULL/PDF
8. M.L., E. (2008). Standardized work for executive leadership. *Leadership & Organization Development Journal*, *29*(1), 24–46. https://doi.org/10.1108/01437730810845289
9. Abubakre, M., Fayoumi, A., & Eleburuike, I. (2020). Implementing process improvement initiative: the role of visualisation and standardisation methods. *Business Process Management Journal*, *27*(3), 965–986. https://doi.org/10.1108/BPMJ-10-2020-0474/FULL/XML
10. Lantz, A., Hansen, N., & Antoni, C. (2015). Participative work design in lean production: A strategy for dissolving the paradox between standardized work and team proactivity by

stimulating team learning? *Journal of Workplace Learning*, *27*(1), 19–33. https://doi.org/10.1108/JWL-03-2014-0026/FULL/XML

11. Junior, R. G. P., Inácio, R. H., da Silva, I. B., Hassui, A., & Barbosa, G. F. (2022). A novel framework for single-minute exchange of die (SMED) assisted by lean tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *119*(9–10), 6469–6487. https://doi.org/10.1007/S00170-021-08534-W/METRICS
12. Sánchez, M. G. O. (2017). *Fundamentos de ergonomía*. Grupo Editorial Patria. https://books.google.com.mx/books?id=chchDgAAQBAJ
13. Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations and Production Management*, *34*(7), 876–940. https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315/FULL/XML
14. Shafeek, H., Bahaitham, H., & Soltan, H. (2018). Lean manufacturing implementation using standardized work. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, *15*(6–7), 1814–1817. https://doi.org/10.1166/JCTN.2018.7316
15. Narayanamurthy, G., & Gurumurthy, A. (2016). Leanness assessment: a literature review. *International Journal of Operations and Production Management*, *36*(10), 1115–1160. https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2015-0003/FULL/XML
16. Mor, R. S., Bhardwaj, A., Singh, S., & Sachdeva, A. (2019). Productivity gains through standardization-of-work in a manufacturing company. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *30*(6), 899–919. https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0151/FULL/XML
17. Johansson, P. E. C., Lezama, T., Malmsköld, L., Sjögren, B., & Ahlström, L. M. (2013). Current state of standardized work in automotive industry in Sweden. *Procedia CIRP*. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.026
18. Ramirez-Cruz, C. A., Salirrosas-Espinoza, L., & Quiroz-Flores, J. C. (2023). Implementing Lean Manufacturing and SLP tools to reduce order errors in a pharmaceutical warehouse in Peru. *ACM International Conference Proceeding Series*, 192–198. https://doi.org/10.1145/3587889.3588199
19. Moura, C. R., & Nunes, C. C. (2019). Padronização de Processo na Linha de Montagem de Uma Empresa Multinacional: Um Estudo de Caso. *Revista Gestão Da Produção Operações e Sistemas*, *14*(2). https://doi.org/10.15675/GEPROS.V14I2.2263
20. Nunes Mariz, R., Picchi, F. A., & Granja, A. D. (2013). *Application of Standardized Work in Franki Piles Concrete Work* (pp. 461–470). http://www.geoforum.com/info/pileinfo/view.asp?ID=15

ANÁLISIS Y MEJORA DE PROCESO DE MONTADO EN CALZADO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Marcela Palacios Ortega, Ervin Adrián Cabrera Servín, Armando Mares Castro, Lucero de Monserrat Ortiz-Aguilar, José Ramón Gómez Armenta

Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón. Blvd. Del Valle #2301, Guardarrayas, C.P. 36413, Purísima del Rincón, Guanajuato, México
marcela.po@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

En un entorno empresarial altamente competitivo las empresas se encuentran en la búsqueda constante de optimizar los procesos de producción para mantenerse eficientes y rentables. El objetivo del proyecto en cuestión versa sobre la optimización de recursos: Buscar un equilibrio entre las estaciones de trabajo y la carga de trabajo para minimizar el tiempo de ciclo y reducir los cuellos de botella en el proceso de montado, en calzado, así como mejorar la productividad reduciendo los tiempos muertos y optimizar el flujo de los procesos.

La metodología que se propone se basa en el modelo de Kemmis integrado por cuatro fases o momentos interrelacionados: Planificación, acción, observación y reflexión, se desarrolla a detalle cada paso de la metodología para dar solución a la problemática. Los resultados obtenidos indican los cambios necesarios en producción para implementar un proceso de montado con mejoras en su rendimiento entre los cuales se mencionan: Aumento de la eficacia en la línea de montado pasando de un 75.3% a un 95.40% respecto a la meta de unidades terminadas por día. Reducción de Costos: Al mejorar la eficiencia y la productividad, se reducirán los costos operativos asociados con el proceso de montado. Incremento de la Competitividad: La empresa de calzado estará en una mejor posición para competir en el mercado al ofrecer productos de alta calidad de manera más eficiente y rentable. Mejora del Clima Laboral: Un proceso de trabajo más fluido y eficiente puede contribuir a mejorar el clima laboral al reducir el estrés y la frustración asociados con los cuellos de botella y las interrupciones en la producción.

El proyecto de simulación de procesos y balanceo de líneas en el área de montado representa una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia operativa, aumentar la productividad y fortalecer la posición competitiva de la empresa en el mercado. Con un enfoque estratégico y una implementación cuidadosa, se pueden alcanzar nuevos niveles de éxito y sostenibilidad en su proceso de producción.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda constante por mejorar los indicadores de los procesos y mantener la competitividad global de la empresa, lleva a los empresarios a tomar decisiones para lograr cambios significativos tomando en cuenta todas las variables que afectan sus procesos, minimizando los costos asociados con las reconfiguraciones de fábrica, maquinaria y contratación o despido de personal, ya que todos estos factores suponen un costo para la empresa, es por ello que en este proyecto se aborda la simulación de los procesos de montado de calzado, para identificar las restricciones del sistema y proponer mejoras sin que se desperdicien recursos, realizando un estudio minucioso evitando prueba y error en los procesos, gracias a las herramientas de simulación. El objetivo general del proyecto versa sobre la optimización de recursos: Buscar un equilibrio entre las estaciones de trabajo y la carga de trabajo para minimizar el tiempo de ciclo y reducir los cuellos de botella en el proceso de montado, así como mejorar la productividad reduciendo los tiempos muertos y optimizar el flujo de los procesos.

La metodología que se propone se basa en el modelo de Kemmis integrado por cuatro fases o momentos interrelacionados: Planificación, acción, observación y reflexión.

- Planificación. Análisis de la situación actual, se llevará a cabo un análisis detallado de la distribución actual de las estaciones de trabajo, los tiempos de ciclo, los cuellos de botella y otros factores que influyen en la eficiencia del proceso de montado.
- Acción. Se recolectan datos de las estaciones de trabajo actuales, tiempos de procesamiento, distribución y flujo de trabajo y se diseña una configuración de fábrica en el software de simulación.
- Observación. Se diseña una nueva distribución en el software: Con base en los datos recopilados, se diseñará una nueva distribución de las estaciones de trabajo que minimice los tiempos de ciclo y maximice la utilización de los recursos disponibles, apoyándose de la simulación del proceso para evitar errores y contemplando la mayoría de las variables que afectan el proceso de montado de calzado.
- Reflexión: La implementación del nuevo esquema de balanceo de líneas se llevará a cabo de manera gradual para minimizar las interrupciones en la producción y permitir ajustes en tiempo real según sea necesario.

TEORÍA

Tiempo estándar. Para facilitar su medición, la operación debe dividirse en grupos de movimientos conocidos como elementos. Con el fin de dividir la operación en sus elementos individuales, el analista debe observar al operario durante varios ciclos. Como el tiempo real requerido para ejecutar cada elemento del estudio depende en un alto grado de la habilidad y esfuerzo del operario, es necesario ajustar hacia arriba el tiempo normal del operario bueno y hacia abajo el del operario deficiente hasta un nivel estándar. Por lo tanto, antes de dejar la estación de trabajo, los analistas deben dar una calificación justa e imparcial al desempeño en el estudio. El principio básico al calificar el desempeño es ajustar el tiempo medio observado (TO) para cada elemento ejecutado durante el estudio al tiempo normal (TN) que requeriría un operario calificado para realizar el mismo trabajo, esto se pude determinar a través de la siguiente fórmula: (Niebel, 2009)

$$\boldsymbol{TN = TO\ x\ C/100} \qquad 1)$$

El tiempo estándar se encuentra mediante la suma del tiempo normal más algunas holguras para las necesidades personales, las demoras inevitables en el trabajo (como descomposturas del equipo o falta de materiales) y la fatiga del trabajador. (Chase, 2009) Puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$TE = TN\ (1 + Tolerancias) \qquad 2)$$

Donde TE=Tiempo estándar; TN=Tiempo normal ecuaciones de referencias (Chase, 2009)

El Estudio de los Métodos se define como el registro, análisis y examen crítico sistemático de los modos existentes y propuestos para realizar un trabajo, con el objetivo de desarrollar y aplicar métodos más simples y eficaces. El estudio de los métodos de trabajo abarca diversas áreas, incluyendo análisis de tareas, procesos, estaciones de trabajo, documentos y tiempos, (Cubiles, 1966)

El balanceo de líneas en una empresa es una técnica empleada en la gestión de operaciones y la ingeniería industrial para distribuir de manera eficiente el trabajo entre las estaciones de trabajo o puestos de producción en una línea de ensamblaje o proceso de fabricación. El objetivo del balanceo de líneas es lograr una distribución equitativa de las tareas y minimizar los cuellos de botella, los tiempos muertos y los desequilibrios en el flujo de trabajo. Esto permite una producción más eficiente y una utilización óptima de los recursos disponible. El problema de determinar el número ideal de operadores que se deben asignar a una línea de producción es análogo al que se presenta cuando se desea calcular el número de operadores que se deben asignar a una estación de trabajo. Quizá la situación de balanceo de línea más elemental, que se encuentra muy a menudo, es uno en el que varios operadores, cada uno de los cuales lleva a cabo operaciones consecutivas, trabajan como si fueran uno solo. En dicha situación, la velocidad de producción depende del operador más lento. (Niebel, 2009).

Simulación de eventos en ProModel. El concepto de simulación de eventos discretos se refiere al conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que representan el comportamiento de un sistema en estudio cuando ocurre un evento específico. El propósito del modelo de simulación es comprender, analizar y mejorar las condiciones operativas relevantes del sistema. Una entidad representa los flujos de entrada a un sistema, siendo el elemento que provoca cambios en el estado del sistema. Ejemplos de entidades incluyen clientes que llegan a la caja de un banco, piezas que entran en un proceso o envíos de piezas que llegan a un inventario (García, 2006).

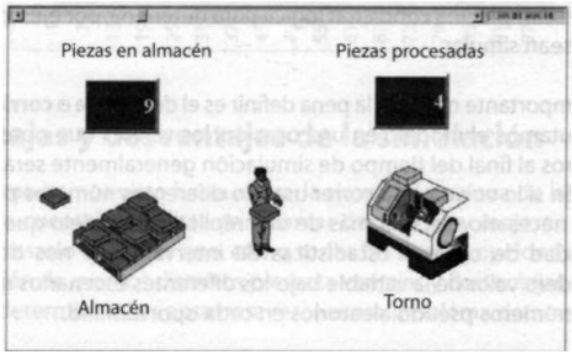


Fig. 1 Ejemplo de un modelo de simulación. Recuperado de: (García, 2006).

El estado del sistema es la condición actual del sistema en un momento específico, similar a una fotografía que captura lo que está ocurriendo en el sistema en ese instante. Las localizaciones son todos aquellos lugares en los que la pieza puede detenerse para ser transformada o esperar a serlo. Dentro de estas localizaciones tenemos almacenes, bandas transportadoras, máquinas, estaciones de inspección, etcétera. Los recursos son dispositivos, distintos de las localizaciones, necesarios para realizar una operación. Por ejemplo, un montacargas que transporta una pieza de un lugar a otro, una persona que inspecciona en una estación y toma turnos para descansar, o una herramienta que se utiliza en un proceso y que se traslada según los requerimientos, sin estar asignada a una ubicación específica (García, 2006).

El Takt Time es el tiempo necesario para completar una tarea dentro del proceso de fabricación, ofreciendo beneficios como la satisfacción del cliente, reducción de costos, aumento de la capacidad productiva, disminución del daño al producto y mantenimiento de la competitividad. La palabra TAKT proviene del alemán y significa "ritmo"; esto indica que el Takt Time establece el ritmo de la demanda del cliente, a quien la empresa debe entregar el producto para satisfacer sus necesidades. Producir siguiendo el Takt Time implica que los ritmos de producción y ventas deben estar sincronizados, ya que esta es una de las metas del Lean Manufacturing (Zapata, 2015).

PARTE EXPERIMENTAL

Metodología
Se organizan las actividades para dar solución a la problemática en las cuatro fases propuestas en la metodología de Kemmis.

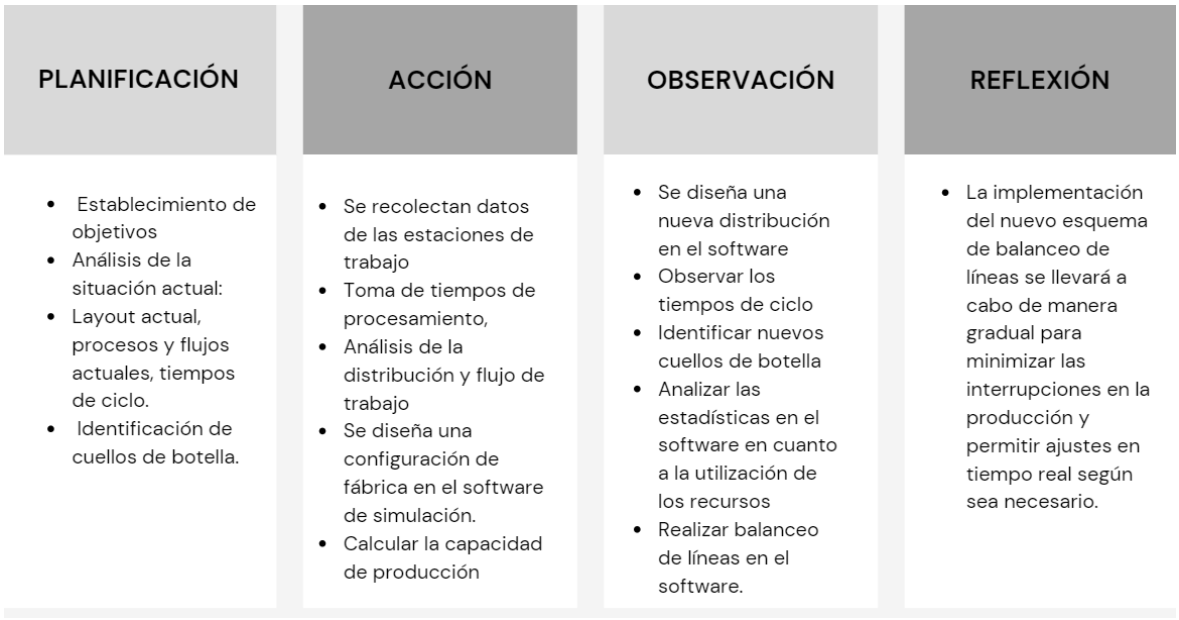


Fig. 2 Metodología de Kemmis adaptada Fuente: Elaboración propia

Para abordar la metodología se establecen los objetivos específicos:
Análisis de la situación y método de trabajo actual. Consiste en identificar las actividades necesarias para la elaboración del calzado, determinar los tiempos de ciclo para cada operación, identificar el flujo del proceso por medio del Layout de la planta, identificar la maquinaria utilizada. A manera de ilustración, en la tabla 1 se incluyen los tiempos de dos fracciones cronometradas, esta información servirá como insumo para alimentar el software de simulación.

Tabla 1 Ejemplo de obtención de tiempos de cada fracción Fuente: Elaboración propia.

No.	Conformar Talón		No.	Col. Plant. Pre Conf.	
1			1	8.7	
2		340	2	10.51	121.99
3		10	3	8.45	10
4			4	10.6	
5	340 Seg por tarea	34.00 X 1.13 38.42	5	11	12.20 X 1.13 13.78
6			6	12.11	
7		Par 38.42	7	17.15	Par 27.57
8		Seg.	8	14.31	Seg.
9			9	14.58	
10			10	14.58	
Total Seg.	340		Total Seg.	121.99	

Una vez cronometrados y calculados los tiempos estándares para las operaciones de montado, se integra una tabla que contiene la información sobre el número de la fracción, su nombre de identificación, la descripción de cada operación y el resumen de sus tiempos estándares, adicionalmente se identifican aquellas operaciones que son ejecutadas en máquinas u hornos, esta información se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de las operaciones del departamento de montado Fuente: Elaboración propia

No. Fracción	Fracción	Descripción	Tiempo
1	Conformar talón	Se conforma el talón, cuidando centrar a la horma dándole la altura indicada asegurando que la horma de fría en la máquina sea la correcta.	39
2	Colocar planta pre-conformada en horma	Colocar plantilla en la horma con el silicón cuidando que quede centrada hacia los lados, en punta y talón.	28
3	Clavo de altura	Colocar clavo para identificar centro y altura del talón asegurando que el clavo quede a la misma distancia que el talón de la horma.	49
4	Planchar puntas	Colocar corte en la plancha revisando que el contrfuerte sea maneable para el entallado en la horma.	36
5	Centrar puntas	Hacer ajuste a la máquina de acuerdo con la horma que se va a utilizar. Se centra el corte de acuerdo a las alturas.	36
6	Lavar suela	Se lava la suela aplicando el material suficiente para quitar impurezas, pasando de 3 a 4 veces la fibra en el área de pegado.	12
7	Abastecimiento de banda	Se coloca la suela, la horma y la planta pre-conformada con el corte en la banda.	12
8	Calentar corte en parrilla	Se coloca el corte sobre una parrilla caliente para que el corte sea más fácil de moldear.	30
9	Montar talón y enfranques	Colocar en la horma en el yale ajustando alturas de poste y soporte de la punta para el montado.	30
10	Aplicar primer en suela	Aplicar primer suiciente en el área previamente lavada pasando de 3 a 4 veces la fibra en el área de pegado.	27
11	Quitar rayas	Quitar rayas del zapato.	16
12	Horno de envejecimiento	Se coloca el zapato en el horno por tres minutos a una temperatura de 80°C-100°C	30
13	Flamear y asentar corte	Se quita el clavo del talón, se flamea el zapato cuidando que el zapato se entalle de manera adecuada a la horma.	32

Tabla 2 continuación. Descripción de las operaciones del departamento de montado Fuente: Elaboración propia.

14	Cardar piso	Eliminar bordos en toda el área de pegado hasta llegar a la carne de una manera uniforme.	34
15	Rayar corte	Rayar el contorno de la base del piso aplicando la presión necesaria para un rayado uniforme.	36
16	Cardar periférico	Cardar el área de pegado indicada con el rayado del corte, evitando sobrepasarlo.	47
17	Aplicar primer	Aplicar primer suficiente en el área de cardado.	35
18	Horno de secado	El zapato pasa directamente por el horno de secado colocado en la banda.	31
19	Embarrar corte	Se coloca un capa de adhesivo en el piso del zapato.	30
20	Embarrar suela	Se coloca un capa de adhesivo en el piso del zapato.	31
21	Horno activador	Se introduce el zapato en el horno activador con el tiempo suficiente para que el primer se active.	9
22	Ensuelar	Se le coloca la suela al piso del zapato cuidando que la suela no quede a desnivel del zapato.	34
23	Prensar	Se introduce el zapato a la máquina de prensado.	31
24	Quitar pegamento	Se remueve el pegamento que sobresalga del piso del zapato.	28
25	Horno estabilizador	Se introduce el zapato dentro del horno estabilizador para que se adhiera la suela al zapato.	21
26	Sacar horma	Se retira la horma del zapato.	29

Las actividades marcadas en color rojo representan las operaciones ejecutadas por máquinas, de acuerdo con las especificaciones de calidad, esos tiempos no deben modificarse ya que son

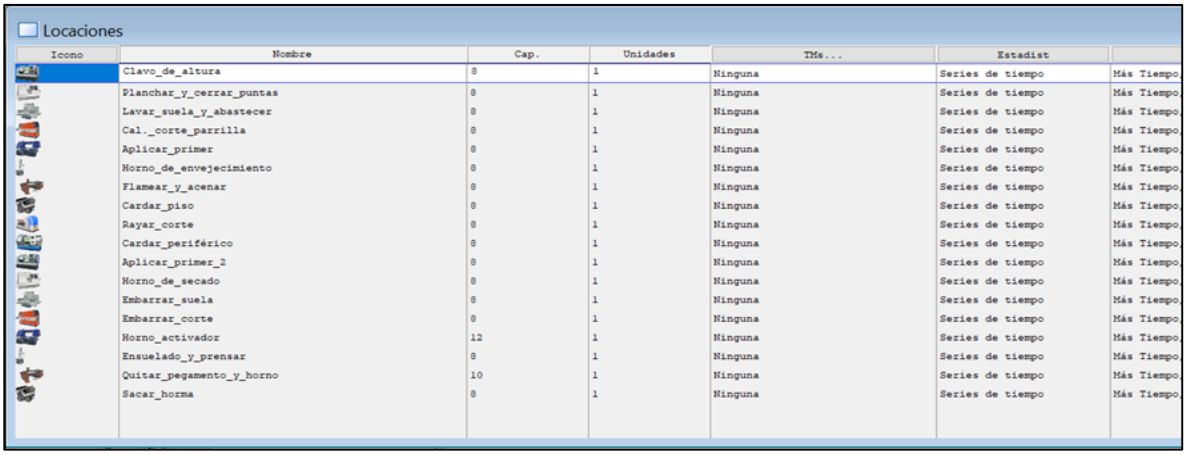
requerimientos para que el producto final cuente con la calidad especificada. Una vez determinados los tiempos se procede a obtener la distribución de planta actual, esto con la finalidad de conocer los flujos de las estaciones de trabajo.

Cálculo del ritmo de trabajo. A continuación, se muestra el cálculo del Takt Time que se debe tener en cuenta para establecer el ritmo de trabajo tomando en cuenta la demanda de los clientes:

$$\boldsymbol{Takt\ Time} = \frac{\boldsymbol{Jornada\ laboral\ (576\ min)}}{\boldsymbol{Meta\ (1{,}100\ pares)}} = \mathbf{0.523} \qquad 3)$$

Teniendo como resultado un Takt Time de 0.523 o 52 segundos, por lo tanto, se establece que límite de tiempo por cada estación de trabajo no debe exceder de los 52 segundos, esto para cumplir y llegar a la meta diaria y cumplir con las fechas de entrega a los clientes.

Diseñar la configuración de la fábrica en el software de simulación. En ProModel, la programación para la simulación constituye sólo una parte del proceso de construcción del modelo ya que, como se ha mencionado, el software también cuenta con diversas herramientas por ejemplo la de animación, que el analista debe aprender a manejar para obtener los mejores resultados (García, 2006). Para realizar el cálculo y los ajustes en las tareas y tiempos de la línea se realiza una simulación de la línea, dicha simulación se realiza con el programa ProModel alimentando el software con los movimientos y ajustes:

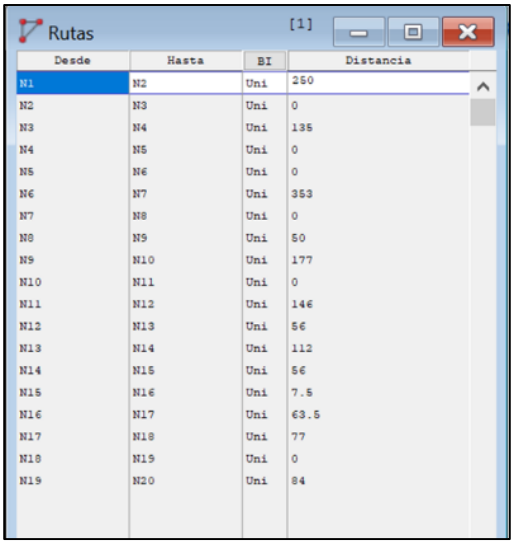


Icono	Nombre	Cap.	Unidades	TMs...	Estadist	
	Clavo_de_altura	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Planchar_y_cerrar_puntas	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Lavar_suela_y_abastecer	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Cal._corte_parrilla	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Aplicar_primer	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Horno_de_envejecimiento	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Flamear_y_acenar	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Cardar_piso	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Rayar_corte	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Cardar_periférico	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Aplicar_primer_2	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Horno_de_secado	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Embarrar_suela	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Embarrar_corte	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Horno_activador	12	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Ensuelado_y_prensar	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Quitar_pegamento_y_horno	10	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo
	Sacar_horma	8	1	Ninguna	Series de tiempo	Más Tiempo

Fig. 3. Entidades de la simulación Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se representan las entidades en la línea, donde solo se aprecia que el insumo solamente tendrá 2 cambios, dichos cambios se generan cuando el producto ingresa a la banda, al momento de ingresar el producto es denominado “Corte de zapato” y en el transcurso del proceso, el corte de zapato se convertirá en “Zapato”.

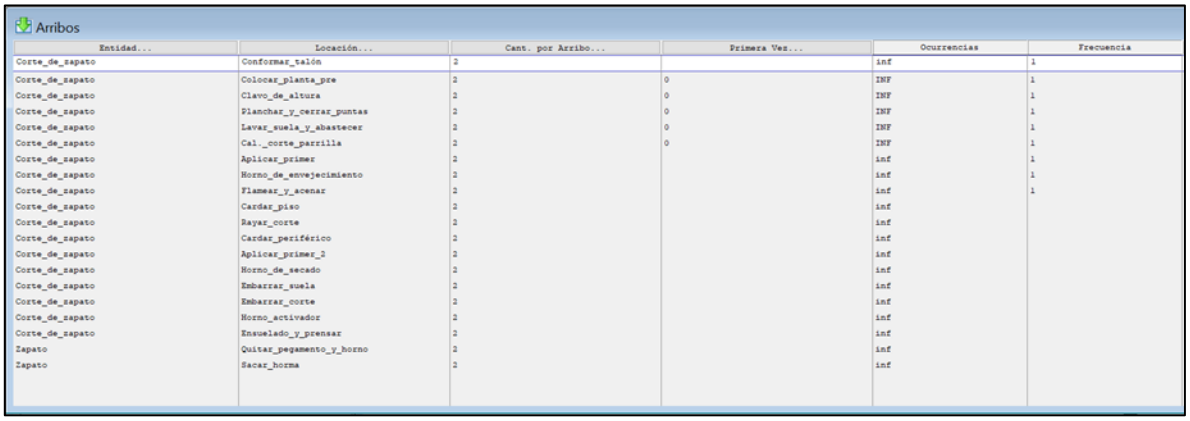
En la figura 4 se aprecian las rutas que tiene la línea en el modelo de simulación, así como también se ilustra la distancia entre las estaciones, dicha distancia es manejada en cm. Las distancias representadas en el modelo de simulación corresponden a las encontradas en la planta de producción, este punto es importante porque permite obtener una simulación realista en cuanto a los trasportes y movimientos que se llevan a cabo dentro de cada estación de trabajo.



Desde	Hasta	BI	Distancia
N1	N2	Uni	250
N2	N3	Uni	0
N3	N4	Uni	135
N4	N5	Uni	0
N5	N6	Uni	0
N6	N7	Uni	353
N7	N8	Uni	0
N8	N9	Uni	50
N9	N10	Uni	177
N10	N11	Uni	0
N11	N12	Uni	146
N12	N13	Uni	56
N13	N14	Uni	112
N14	N15	Uni	56
N15	N16	Uni	7.5
N16	N17	Uni	63.5
N17	N18	Uni	77
N18	N19	Uni	0
N19	N20	Uni	84

Fig. 4 Rutas de la simulación. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5. se especifican los arribos, observe que en las locaciones de la línea el producto pasa de “corte de zapato” a “zapato”, más específicamente este cambio se genera entre las locaciones “Ensuelado y prensar” y “Quitar pegamento y horno”, que son las actividades de trasformación de corte a calzado.



Entidad...	Locación...	Cant. por Arribo...	Primera Ver...	Ocurrencias	Frecuencia
Corte_de_zapato	Conformar_talón	2		inf	1
Corte_de_zapato	Colocar_planta_pre	2	0	INF	1
Corte_de_zapato	Clavo_de_altura	2	0	INF	1
Corte_de_zapato	Planchar_y_cerrar_puntas	2	0	INF	1
Corte_de_zapato	Lavar_suela_y_abastecer	2	0	INF	1
Corte_de_zapato	Cal._corte_parrilla	2	0	INF	1
Corte_de_zapato	Aplicar_primer	2		inf	1
Corte_de_zapato	Horno_de_envejecimiento	2		inf	1
Corte_de_zapato	Flamear_y_acenar	2		inf	1
Corte_de_zapato	Cardar_piso	2		inf	
Corte_de_zapato	Rayar_corte	2		inf	
Corte_de_zapato	Cardar_periférico	2		inf	
Corte_de_zapato	Aplicar_primer_2	2		inf	
Corte_de_zapato	Horno_de_secado	2		inf	
Corte_de_zapato	Embarrar_suela	2		inf	
Corte_de_zapato	Embarrar_corte	2		inf	
Corte_de_zapato	Horno_activador	2		inf	
Corte_de_zapato	Ensuelado_y_prensar	2		inf	
Zapato	Quitar_pegamento_y_horno	2		inf	
Zapato	Sacar_horma	2		inf	

Fig. 5 Arribos de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se pueden apreciar los procesos de la línea de ensamble simulada, en donde se ilustran los tiempos promedios registrados de cada tarea, estos tiempos corresponden a los tiempos estándares para cada operación analizada, estos tiempos se especifican en segundos. Para los datos de la simulación. La información general de la simulación, donde se establece el tiempo y la distancia.

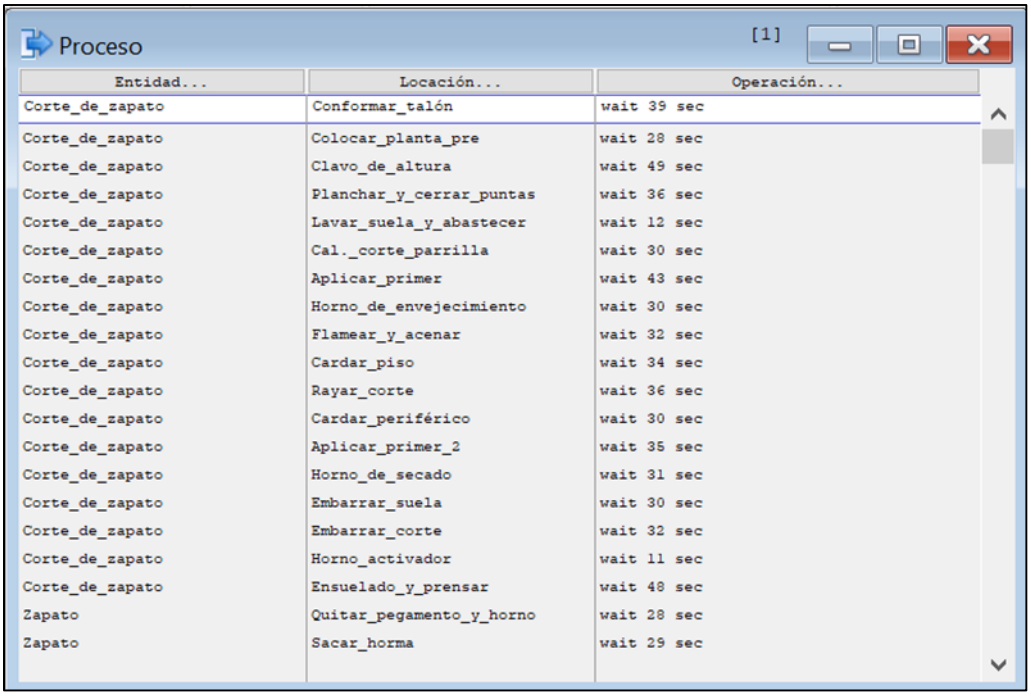


Figura 6 Proceso de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se especifican los datos de la simulación general, el software arroja por default la opción de omitir TMs y Output Viewer, por lo que solo se considera el tiempo y el número de replicas.

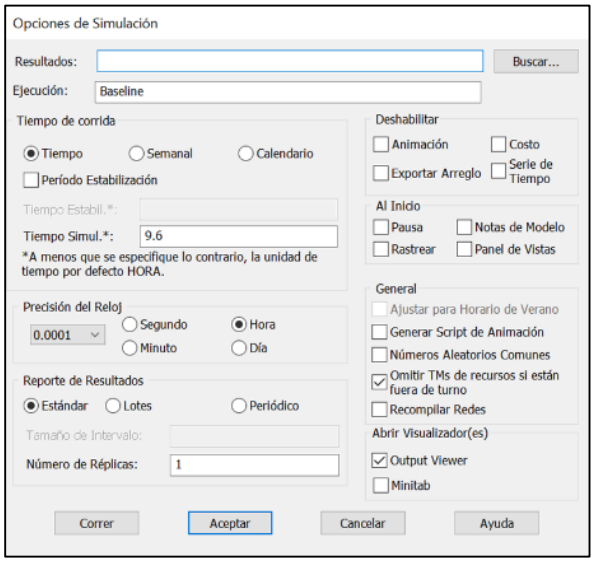


Figura 7 Opciones de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Una vez configurados los parámetros de la simulación se obtiene una distribución de la línea de montado, por medio del siguiente modelo de simulación en ProModel. En la Figura 8 se aprecia una simulación de la línea con las estaciones ya definidas sin correr o inactiva.

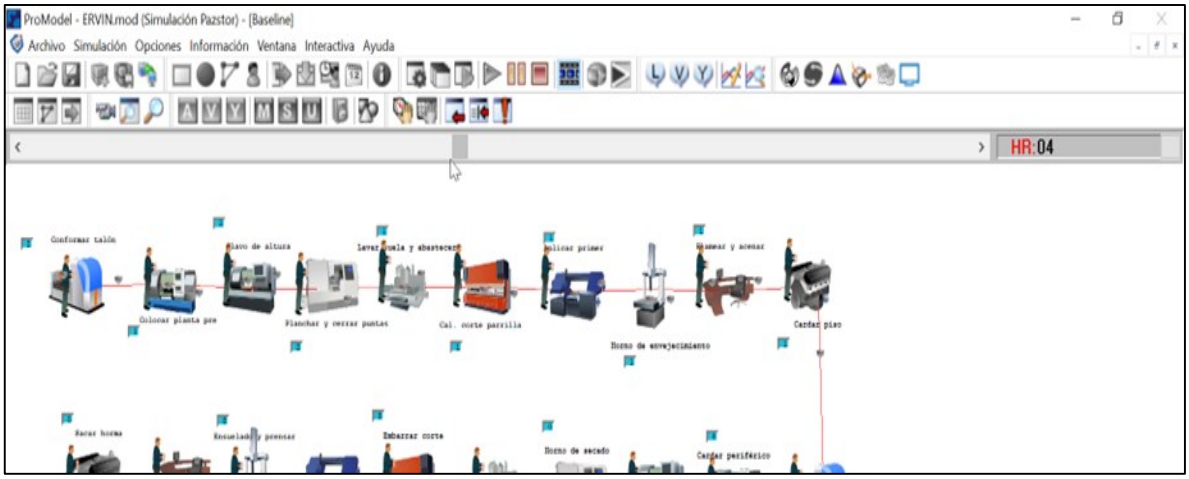


Fig. 8 Simulación de la línea en estado inactiva. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el modelo de simulación, se procede a correr la simulación, estas corridas consideran los tiempos de procesamiento de las estaciones de trabajo, las distancias entre las máquinas, los tiepos requeridos en los hornos y las actividades realizadas por cada trabajador. En la figura 9 se ilustra un ejemplo de simulación corriendo o activa.

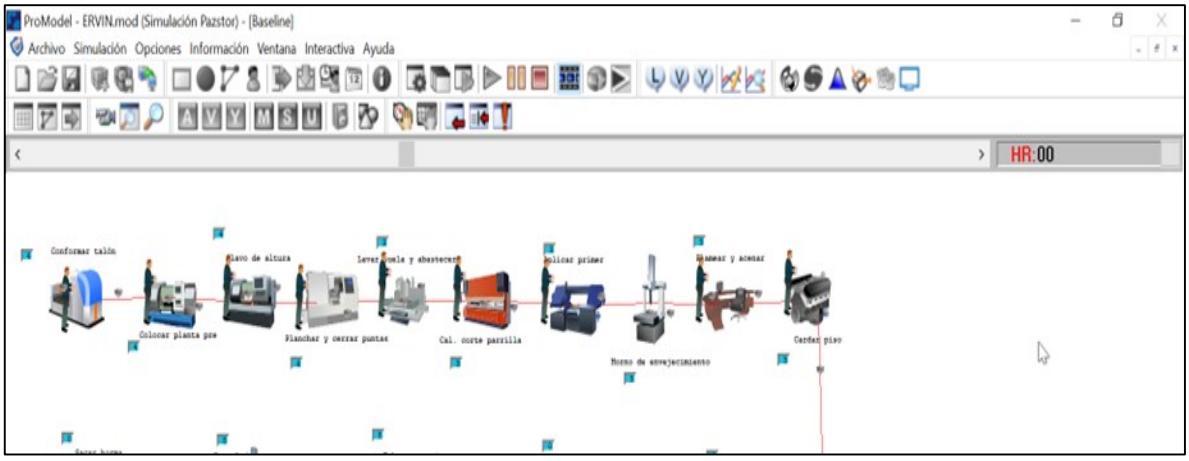


Fig. 9 Simulación de la línea en estado activa. Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la simulación el software permite observar las estadísticas de la simulación del proceso. En el recuadro rojo de la figura 10 se muestran los resultados de los estados de las entidades, el color azul representa el porcentaje de la lógica del tiempo en movimiento, el color amarillo representa el porcentaje de tiempo de espera, el color verde representa el porcentaje de tiempo de operación y el color rosa representa el tiempo bloqueado.

En el recuadro color verde de la figura 10 se puede apreciar el número de zapatos (en unidades) salidos de la banda, siendo un total de 2,134 unidades, para este día de estudio en particular. En el recuadro naranja se aprecia el porcentaje de tiempo en la utilización de los recursos., las barras representadas en color azul, que significan que el aprovechamiento de los recursos fue del cien por ciento, ya que al ser una banda que trabaja de forma lineal no hay tiempos en los que el material se esté usando para otros procesos como lo sería el moverlo a otra estación.

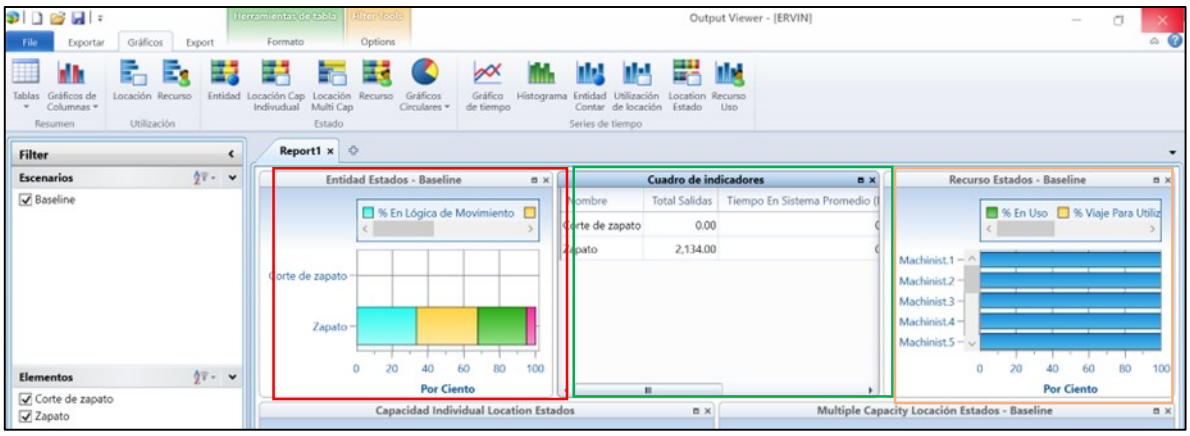


Fig.10 Resultados de la simulación

En la figura 11 se aprecia que la simulación arroja un resultado de 2,134 unidades de zapatos que es equivalente a 1,064 pares. La simulación confirma que el balanceo de líneas es aceptable para que la línea pueda llegar a la meta mientras se tenga en cuanto todos los aspectos, modificaciones y movimientos que se usaron para la simulación.

Cuadro de indicadores

Nombre	Total Salidas	Tiempo En Sistema Promedio (Hr)	Tiempo En Operación Promedio (Hr)	Costo Promedio
Corte de zapato	0.00	0.00	0.00	0.00
Zapato	2,134.00	0.52	0.14	0.00

Fig. 11 Cuadro de indicadores Fuente: Elaboración propia

En la figura 12. Se observa cómo se distribuyó el tiempo total de toda la jornada laboral, en específico se muestra como está distribuido el tiempo en todas las actividades de la línea tres, para así asegurar que la línea en verdad esté aprovechando los minutos disponibles. Representando los resultados de los estados de las entidades, donde el color azul representa el porcentaje de la lógica del tiempo en movimiento, el color amarillo representa el porcentaje de tiempo de espera, el color verde representa el porcentaje de tiempo de operación y el color rosa representa el tiempo bloqueado.

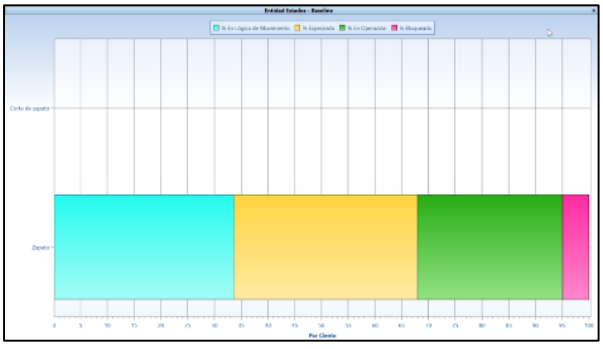


Fig. 12 Entidad de tiempos distribuidos. Fuente: Elaboración propia.

De manera adicional se utilizó la siguiente plantilla de Excel, como apoyo para realizar los balanceos de línea. Con este formato se estará trabajando para la mejora de la eficiencia de la línea de producción, ya que el objetivo de dicha línea oscila es entre los mil y los mil cien pares, pero la línea no lograba cumplir con dicho objetivo teniendo como eficacia un 53.99 %. Este indicador refleja el

porcentaje de logro de objetivos, durante los estudios iniciales la banda únicamente producía 600 pares, sobre una meta de 1100, por lo que el indicador de eficacia refleja que el proceso de la línea se encontraba muy por debajo de cumplir la meta diaria.

Y una vez realizado el llenado del formato, se realiza el balanceo de la tabla 3, de igual forma estos datos se simularán con el software antes de realizar los cambios en la línea de producción, para realizar el balanceo se toman en cuenta aspectos como la secuencia de operaciones, también se realizará una modificación para las máquinas de horno activador y la prensadora, se posicionarán de una forma en la cual el operario se le facilite el interactuar con ambas máquinas, ya que ahora éstas serán interactuadas por una sola persona.

Tabla 3. Formato de balanceo de líneas del departamento de montado. Fuente: Elaboración propia

Nombre: Cabrera Servín Ervin Adrián									
Matrícula: MS19110503			Tack time	0.52363636		31.4181818	Cada 31.42 seg. debe estar saliendo un par		
Balanceo de Líneas									
			Meta (Pares)	**1100**	Eficiencia global	**92.14%**	Jornada	576 min.	
No. De operación	Fracción	Tiempo STD x par	Maquinaria o herramienta	Capacidad	Balanceo		Min necesarios	Personal	Redondeo
1	Conformar talón	0.39	Conformador de talón	1476.92308	0.39		429	0.74479167	1
2	Colocar planta preconformada	0.28	Solder	2057.14286	0.28		308	0.53472222	1
3	Clavo de altura	0.49	Martillo	1175.5102	0.49		539.00	0.93576389	1
4	Planchar punta	0.36	Activadora de cascos	1600			0.00	0	
5	Centrar puntas	0.36	Cherim para centrar punta	1600	0.36		396.00	0.6875	1
6	Lavar suela	0.12	Dosificador	4800			0.00	0	0
7	Abastecimiento de banda	0.12		4800	0.24		264.00	0.45833333	1
8	Calentar corte en parrilla	0.30	Parilla	1920			0.00	0	
9	Montar talón y enfranques	0.30	Máquina de montar talón	1920	0.30		330.00	0.57291667	1
10	Aplicar primer en suela	0.27	Dosificador	2133.33333			0.00	0	
11	Quitar rayas	0.16	Quitarayas	3600	0.43		473.00	0.82118056	1
12	Horno envejecimiento	0.30	Horno de envejecimiento	1920			0.00	0	
13	Flamear y acentar corte	0.32	Flameadora	1800	0.32		352.00	0.61111111	1
14	Cardar piso	0.34	Cardadora	1694.11765	0.34		374.00	0.64930556	1
15	Rayar corte	0.36	Rayadora	1600	0.36		396.00	0.6875	1
16	Cardar periférerico	0.43	Cardadora	1339.53488	0.43		473.00	0.82118056	1
17	Aplicar primer	0.35	Cepillo	1645.71429	0.35		385.00	0.66840278	1
18	Horno de secado	0.31	Horno de secado	1858.06452			0.00	0	0
19	Embarrar suela	0.30	Brocha	1920	0.30		330.00	0.57291667	1
20	Embarrar corte	0.32	Cepillo	1800			0.00	0	
21	Horno activador	0.11	Horno activador	5236.36364	0.32		352.00	0.61111111	1
22	Ensuelado	0.34		1694.11765			0.00	0	
23	Prensar	0.31	Prensadora	1858.06452			0.00	0	
		0.14			0.48		528.00	0.91666667	1
24	Quitar pegamento	0.28	Cepillo de plástico	2057.14286	0.28		308.00	0.53472222	1
25	Horno Estabilizador	0.21	Horno estabilizador	2742.85714			0.00	0	
26	Sacar Horma	0.29	Yale	1986.2069	0.29		319.00	0.55381944	1
	Total	7.72						Total	16

Se puede apreciar en el formato de la tabla 3 un Takt Time de 0.52 minutos, dando a entender que las operaciones balanceadas no deben de exceder de este tiempo, también se aprecia una velocidad de banda de 31.41 segundos por par si se quiere llegar a la meta de 1,100 pares.

Con la ayuda del formato y la alimentación para el software de simulación se logró cumplir con una efectividad del 95.40 %, teniendo un tiempo planeado de 576 minutos y 30 minutos de tiempos muertos, dando como tiempo productivo un total de 546 minutos, teniendo una disponibilidad del 94.8 %. Teniendo un total de 954 pares que salieron con calidad óptima, arrojando un porcentaje de calidad del 90.51 %.

Las herramientas de balanceo de líneas y estudios del trabajo han demostrado mejorar la línea de producción de la empresa ya que con anterioridad había situaciones donde la línea solamente lograba producir 753 pares, cumpliendo con el 75.3% de la meta, pero con el balanceo de líneas aplicado, la línea tuvo una capacidad demostrada de 1054 pares, y de acuerdo con las necesidades y capacidades de la empresa mientras la meta logre superar los 1000 pares es consideración de éxito. Aunque con el balanceo realizado la línea solamente pudo lograr llegar a la meta de 954 pares, esto por factores externos a la línea.

El balanceo de líneas arrojó resultados favorables, ya que ahora la línea tres tiene la capacidad de llegar a la meta, realizando un trabajo eficiente que cumpla con las necesidades del cliente. El utilizar el software de simulación y las herramientas de estudios de tiempos, permitieron obtener mejores indicadores para la línea tres de montado de la empresa. Estos indicadores se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados generales de la línea de montado

Información general de la líena tres del área de montado después del balanceo de líneas	
Pares programados A	1000
Meta Capacidad B	1054
% Efectividad C = (H/A)*100	95.40%
Tiempo planeado D (Minutos)	576
Tiempos muertos E (Minutos)	30
Tiempo productivo (Min) F = D-E	546
% Disponibilidad G = (F/D)*100	94.79%
Piezas buenas H (Pares)	954
Tota real producido I (Pares)	1054
% Calidad J = (H/I)*100	90.51%

CONCLUSIONES

El equilibrio de líneas en la producción de calzado, específicamente en el área de montado, es esencial para mejorar la eficiencia y mejorar la productividad. Para que este tipo de estudios sea exitoso se requiere: Realizar un análisis detallado del proceso de montaje para identificar cuellos de botella, pasos críticos y actividades que consumen más tiempo; estudiar la variabilidad en los tiempos de ciclo de cada estación de trabajo para comprender mejor los requerimientos del proceso; se recomienda que el personal esté capacitado adecuadamente para realizar múltiples tareas si es necesario, lo que facilita la flexibilidad en la asignación de trabajadores a diferentes estaciones; implementar tecnologías y sistemas automatizados para reducir el tiempo de ciclo y mejorar la precisión en las tareas repetitivas; es indispensable definir métricas para medir el rendimiento de la línea, como la eficiencia, el tiempo de ciclo promedio y la utilización de la capacidad, con estas medidas además del monitoreo constante de los indicadores, se asegura cumplir con los objetivos de la empresa y mantener la competitividad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cubiles, M. R. (1966). Introducción al estudio de los métodos de trabajo. *Documentación Administrativa*.
2. Chase Richard, F. Jacobs y N. Aquilano (2009) Administración de operaciones producción y cadena de suministro Ed. McGraw Hill. México.
3. García E. García H. y Cárdenas L. (2006) Simulación y análisis de sistemas con ProModel, Ed. Prentice Hall. México.
4. Niebel W. Benjamín (2009) Ingeniería industrial Métodos, estándares y diseño del trabajo. Ed. McGraw Hill. México
5. Zapata, M. Á. M., & Cano, J. G. C. (2015). Takt Time, el corazón de la producción. *Revista Vía Innova*, *2*(1), 60-62.

CARRO DE CONTROL REMOTO MANIPULADO POR MEDIO DE COMANDOS DE VOZ

Edna Briones Andrade, Anahí Rodríguez Hernández, Oscar Núñez Olvera, Francisco Sánchez Niño

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica –Universidad Autónoma de San Luis Potosí
A229036@alumnos.uaslp.mx.

RESUMEN

El creciente desarrollo de las tecnologías de información y comunicación han permitido la incorporación de aplicaciones que permiten controlar dispositivos eléctricos mediante comandos de voz, los cuales han permitido que personas cuyas capacidades físicas limitadas o que se han visto disminuidas temporalmente incrementen su nivel de autonomía. El proyecto que se presenta consta de una interfaz de control de un sistema robótico móvil, como elemento central de control se tiene una aplicación móvil que se desarrolló en el ambiente de programación para aplicaciones móviles llamado APP Inventor, que proporciona dos modos de funcionamiento, manual y por voz. Está interfaz puede ser instalada en dispositivos Android en donde la aplicación envía comandos inalámbricos por medio del módulo de comunicación bluetooth, con esto se logra controlar el movimiento de los motores del vehículo. Como interfaz de control entre la aplicación y el robot móvil se utiliza un microcontrolador PIC18F4550, que es el encargado de la decodificación de los comandos, cada uno de los comandos realiza una tarea particular, como por ejemplo definir la activación y sentido de giro de los motores del robot móvil. La comunicación entre el microcontrolador y el dispositivo Android se realiza por medio del módulo de comunicación bluetooth HC05, el cual está configurado en modo esclavo para establecer la comunicación entre los dispositivos de manera inalámbrica.

INTRODUCCIÓN

Gracias al progresivo desarrollo de las tecnologías de la comunicación, así como también la tecnología de la información han favorecido el desarrollo de aplicaciones que permiten el control de dispositivos eléctricos por medio de comandos de voz, contribuyendo que personas con capacidades físicas que se han disminuido temporalmente puedan incrementar su nivel de autonomía. En el área de la educación se han incorporado “programas de autoayuda”, cuyo propósito es facilitar el uso de los medios informáticos a usuarios con discapacidad física y en el área de la domótica ha permitido controlar el funcionamiento de los dispositivos que se encuentran de forma regular en el hogar.

El proyecto que se presenta consta de los siguientes sistemas:

Un sistema de reconocimiento de voz el cual tiene la finalizad de establecer el grado de distorsión que puede tener el mensaje, el reconocimiento del lenguaje y recoger la frase una vez reconocida.
El sistema de control del carro se implementó por medio de un microcontrolador 18F4550 de Microchip, los comandos de control se pueden generar de forma manual, así como por comandos de voz. Este sistema también tiene la finalidad de decodificar el dato recibido y de acuerdo con esto asigna un estado el cual se encargará de activar o desactivar los motores, así como indicar la dirección de giro de estos de acuerdo con la acción que se desee realizar.

Por último, un sistema de comunicación por bluetooth que tiene la finalidad de recibir los datos enviados desde una aplicación móvil desarrollada en APP Inventor, para inmediatamente después de ser recibidos, se comience con la decodificación por parte del microcontrolador y ejecutar cada una de las tareas asignadas.

TEORÍA

El control de motores juega un papel fundamental en la ingeniería y la automatización ya que se encarga de la supervisión y regulación del funcionamiento de los motores eléctricos permitiendo controlar la velocidad, la dirección de la rotación de los motores, el torque y el arranque.

Una técnica muy utilizada en sistemas para el control de motores es el PWM también conocido como modulación de ancho de pulso, ya que permite un control preciso sobre la velocidad y el par del motor siendo esto, ideal para aplicaciones que requieren de un control preciso y una alta eficiencia.

La modulación por ancho de pulso (PWM) utiliza señales digitales para controlar las aplicaciones de potencia, en donde de acuerdo al ancho de esta señal se controla la cantidad de corriente que fluye al dispositivo. Un PWM es como un interruptor donde constantemente se activa y desactiva, regulando la cantidad de corriente que se entrega al dispositivo a controlar en donde el motor recibe corriente por un tiempo y deja de recibirlo en otro, repitiéndose constantemente este proceso. A la relación del tiempo en el que se mantiene encendida en comparación al momento en que se encuentra apagado se le conoce como ciclo de trabajo o Duty cycle (DC). Entre mayor sea el DC, mayor tiempo estará la señal en alto.

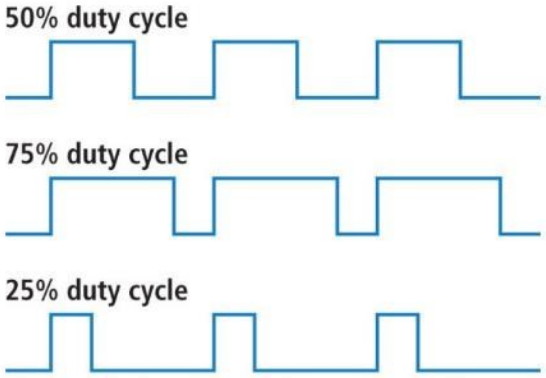


Figura 1. Ciclo de trabajo modulando el ancho de pulso

Por este motivo se llama modulación de ancho de banda porque se controla el ancho del pulso en el nivel alto(Ten) en un periodo (T). Por lo que el DC es:

$$DC = \frac{Ten}{T} \times 100$$

Cuando el ciclo del trabajo es 50%, la señal está en el nivel alto la mitad del periodo y otra mitad se encuentra en nivel bajo.

Una vez variado el ciclo del trabajo, en un motor se la velocidad ya que la tensión media del motor varia, en donde si el ciclo del trabajo es del 100% el motor girara a la máxima velocidad. Si se reduce el ciclo del trabajo, la velocidad disminuirá.

PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto consiste en un carro controlado de forma remota, mediante el uso de una aplicación móvil, la cual cuenta con dos modos de uso, los cuales son: el modo manual, que implica el uso de botones para seleccionar la dirección en la que se moverá el carro y el uso de un indicador como una barra deslizante para ingresar la velocidad, así como también de un control mediante comandos de voz, con los cuales se indicará tanto la velocidad como la dirección en la que este se moverá. Para esto se utilizó:

- Microcontrolador PIC18F4550
- Modulo bluetooth HC-05.
- Puente H L298N.
- 4 motorreductores.
- 4 llantas omnidireccionales.
- Pilas AA.

El carro cuenta con 9 movimientos los cuales son:

- Adelante
- Reversa
- Giro Izquierda y derecha hacia adelante
- Giro izquierda y derecha hacia atrás
- Desplazamiento horizontal derecha e izquierda
- Detener

Y se puede variar su velocidad mediante valores de PWM que oscilan entre 200 y 255.

Desarrollo de aplicación móvil

La aplicación móvil fue desarrollada en APP Inventor, una plataforma de programación para aplicaciones de sistemas Android, la cual está basada en un lenguaje de programación a bloques, lo que permite programar de forma sencilla y rápida. Esta plataforma está conformada de forma general en dos partes, siendo una de ellas el diseño de la interfaz gráfica, y otra donde se genera el código.

Para el presente proyecto el código consistió en dos partes, una con la cual se realizaría el control del carro de forma manual y otra donde se realizaría el control del carro, pero mediante la voz. Pero ambos modos enviaran los datos de la misma forma, que consiste de una cadena de caracteres la cual comienza con un "*", el cual tiene como función señalar el inicio de la cadena, posteriormente se enviará un carácter "M" o una "A" que indicara si se está trabajando en el modo Manual o por Voz respectivamente, enseguida se envía el valor correspondiente a la orden de movimiento a realizar (por ejemplo, derecha, izquierda, etc.), el comando correspondiente se puede observar en la tabla1. Posteriormente se envía un valor entre 200 y 255 el cual será el valor de la velocidad. Teniendo una cadena conformada por el identificador, el modo, dirección y velocidad**.**

Control manual

La aplicación móvil se muestra en la Figura 2, está consta de un joystick, el cual dependiendo de su posición se envía una letra. El joystick se encuentra dividido en 9 secciones, siendo la central la opción de stop, a la cual se regresará siempre que se suelte el joystick. Además, se cuenta con un botón de selección, el cual permitirá controlar el carro ya sea de forma manual o mediante comandos de voz, también cuenta con una barra deslizadora que permitirá enviar un número entre 200 y 255 para el PWM, así como también un botón que permitirá seleccionar el dispositivo bluetooth y así conectarlo al carro, además del respectivo botón de desconexión.

Figura 2. Interfaz gráfica control manual

Control por voz

La interfaz gráfica del control de voz se muestra en la Figura 3. Está consta de su botón de conexión al módulo bluetooth, un botón de desconexión del bluetooth, y un botón de selección para cambiar al control manual. Además de un botón que al ser presionado abrirá el asistente de voz de Google con el cual se ingresaran los comandos de voz y enviara el dato correspondiente al comando. Los comandos pueden ser dados únicamente indicando la velocidad o únicamente la dirección, o en conjunto, pero siempre en el caso de velocidad debe ser mencionado primero la palabra “velocidad” enseguida del valor entre 200 y 255. La lista de comandos se puede observar en la tabla 1.

Figura 3. Interfaz gráfica control manual

Tabla 1. Lista de comandos de voz

Comandos de voz	Dato por enviar en código ASCII
Adelante	F
Atrás	A
Izquierda adelante	I
Izquierda atrás	C
Derecha adelante	D
Derecha atrás	B
Desplazamiento izquierda	R
Desplazamiento derecha	Z
Velocidad + “Número entre 200 y 255”	Carácter ASCII correspondiente al número mencionado

Microcontrolador

Como dispositivo de control, fue utilizado un microcontrolador PIC18F4550. El cual se encarga de realizar la comunicación entre la aplicación y el robot. Este dispositivo es el encargado de recibir la cadena de caracteres enviada por la aplicación móvil mediante el protocolo de comunicación serial RS232, donde una vez que detecta la entrada de datos, comienza verificando que los datos recibidos inicien con un "*", esto debido a que ambos dispositivos (microcontrolador y aplicación) no se encuentran sincronizados, por lo cual es de suma importancia detectar el inicio de la cadena antes de asignar valores.

Una vez detectado el carácter de inicio son separados los datos y asignados a la variable correspondiente, y dependiendo de la información recibida activar o desactivar los pines correspondientes a los motores, así como escribir el ancho de pulso para la señal PWM. El dato recibido y la activación de motores se muestran en la Tabla 2.

Para controlar el sentido de giro de los 4 motorreductores fueron utilizadas 8 señales para el puente H y 1 para la velocidad por pwm, siendo esta última conectada a los cuatro motorreductores.

Tabla 2. Asignación a señales de acuerdo con estado de maquina a ejecutar

		Llanta frontal izquierda		Llanta frontal derecha		Llanta trasera izquierda		Llanta trasera derecha	
Dato	**Estado**	**B7**	**B6**	**B5**	**B4**	**B3**	**B2**	**B1**	**B0**
F	Adelante	1	0	1	0	1	0	1	0
D	Adelante derecha	0	0	0	1	0	0	0	1
I	Adelante izquierda	1	0	0	0	1	0	0	0
A	Reversa	0	1	0	1	0	1	0	1
B	Reversa derecha	0	1	0	0	0	1	0	0
C	Reversa izquierda	0	0	0	1	0	0	0	1
Z	Derecha	0	1	1	0	1	0	0	1
R	Izquierda	1	0	0	1	0	1	1	0
S	Stop	0	0	0	0	0	0	0	0

Los movimientos del carro dependen principalmente del sentido en el que giren los motorreductores, así como también de cuales se encuentren activas y cuales desactivadas.

Un caso especial de movimiento es el de desplazamiento de forma horizontal, para el cual fue necesario el uso de llantas omnidireccionales, las cuales permiten realizar este tipo de movimiento, ya que estas dependiendo del sentido de giro en que sean activados los motorreductores lograran hacer el movimiento en horizontal. La combinación de giro de las llantas para realizar este tipo de movimiento se muestra en la Figura 4 y 5.

Para los demás movimientos únicamente es necesario que todas las llantas giren en el mismo sentido o que al menos dos de ellas lo hagan.

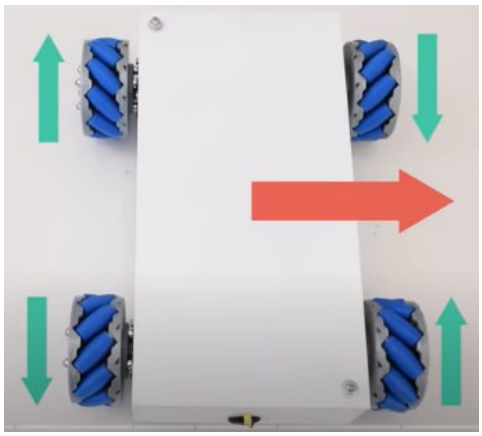


Figura 4. Desplazamiento hacia la derecha.

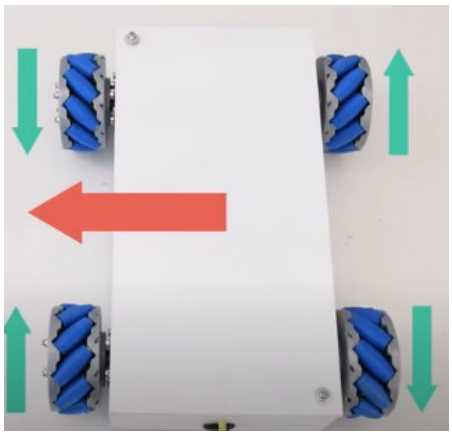


Figura 5. Desplazamiento hacia la izquierda

RESULTADOS

Una vez diseñadas tanto la aplicación como el código a implementar en el microcontrolador, se comenzó realizando algunas pruebas de funcionamiento, siendo una de ellas la comprobación de la comunicación entre el microcontrolador y la aplicación, así como también que efectivamente se estuvieran enviando las cadenas de caracteres como se deseaba. Las cuales tuvieron un resultado exitoso.

Posteriormente se hicieron pruebas conectando los motores y enviando comandos de dirección y de velocidad, tanto de forma manual como por comandos de voz. Esto con el objetivo de corregir si era necesario el sentido de giro del motor y comprobar que efectivamente este se mueva en la dirección enviada, así como también, comprobar que hubiera cambios de velocidad al variar el valor de PWM.

Estas pruebas dieron como resultado el ajuste de valores que se pueden cargar al PWM, dado que a partir de valores menores a 150 el giro del motor era prácticamente nulo, por lo cual se modificó el programa para que únicamente envíe valores de entre 200 a 255 para la velocidad. Así como también en algunos casos se ajustaron algunos valores para que el carro girara en el sentido correcto. En la Figura 6 se muestra el prototipo final del carrito.

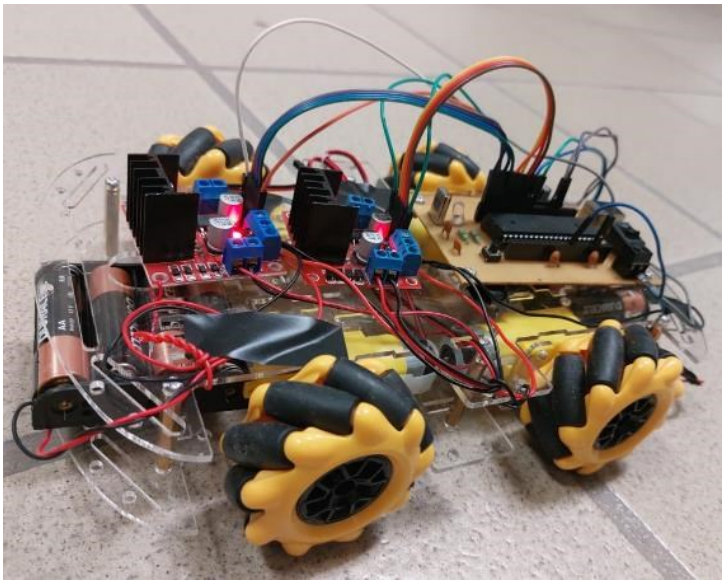


Figura 6. Carro y aplicación en funcionamiento

CONCLUSIONES

Se diseñó el sistema de control inalámbrico de un robot del tipo móvil, el cual consiste en una aplicación desarrollada en el entorno de programación APP inventor, un microcontrolador PIC18F4550 que recibe los comandos por medio de un módulo bluetooth HC-05 provenientes de la aplicación del celular. El microcontrolador controla el accionamiento y dirección de los motores de las llantas del carro.

Se plantea como trabajo a futuro desarrollar prototipos de dispositivos electrónicos que permitan mejorar la calidad de vida de las personas, sistemas de seguridad o bien domótica que sea de bajo costo y alto rendimiento

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Moumtadi, F. Granados-Lovera, J.C Delgado-Hernández, “Activación de Cargas Eléctricas a Través de Comandos de Voz vía Módulo HC – 05 y Arduino” en Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. 15, 2, 2014, pp. 175-186.
2. I. Yepez-López, E. Villalvazo-Laureano, R. Flores- Benítez, M.A. Pérez- González, “Conciencia Tecnológica”, Aguascalientes, México, 2018), núm.57.
3. T.R. Kuphaldt, “Modulación por Ancho de Pulso”, Schweitzer Engineering Laboratories,2022.

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE PROTOTIPO PARA IMPLANTACIÓN DE SEMILLAS

Humberto Rodríguez Bravo, Carlos Arturo Anguiano Luna, Juan Ángel Contreras Vargas, José de Jesús Nieto Rangel, Silvia Alejandra Hernández Ramírez.

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato.
humberto.rb@irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

En México la agricultura es una de las principales actividades en el sector agropecuario debido a su aportación y demanda de productos, siendo un país propicio para la reproducción agrícola gracias a la diversidad de suelos, climas y ecosistemas. En México se practican dos tipos de agricultura: la tradicional, dependiente de lluvias y mano de obra no salariada, y la comercial, que emplea tecnologías avanzadas y mano de obra asalariada. Sin embargo, el personal calificado para este sector enfrenta largas jornadas laborales con riesgos a problemas de salud debido a la exposición con productos, aguas oscuras y herramientas peligrosas, provocando lesiones mortales, enfermedades pulmonares y problemas en la piel asociados con tipos de cáncer por la extrema exposición al sol o incluso a productos químicos ocasionando una mala producción y calidad de vida de los trabajadores.

En el presente proyecto, se aborda la necesidad de mejorar tanto la productividad agrícola como la calidad de vida sin generar impactos negativos en lo social y ambiental. Se propone el desarrollo de un prototipo mediante métodos cuantitativos y cualitativos para obtener datos reales. El objetivo principal es resolver las problemáticas del sector agrícola mediante un software implementado en un carrito seguidor de línea adaptado con llantas todoterreno para no sufrir por las irregularidades que están presentes en el área destinada y modulado por motores paso a paso implementado en Arduino. Este dispositivo automatizado coloca las semillas en zonas de cultivo preparadas, optimizando la profundidad y distancia recomendada. El prototipo utiliza servomotores para controlar el tiempo de giro del dosificador de semillas, la distancia entre ellas y la velocidad del mecanismo piñón-cremallera que las coloca en el suelo, todo con el fin de regular las velocidades y adaptar a la necesidad de producción. También, es importante destacar que se incorpora un sistema eficiente para el control de la cantidad de semillas destinadas a cultivar en sus respectivas distancias. Se prioriza el uso de materiales resistentes, eficaces, económicos y amigables con el medio ambiente. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que se logra diseñar y construir un prototipo automatizado para la actividad de sembrado en el sector agrícola, demostrando el desarrollo beneficioso de tecnologías limitadas en actividades exhaustivas o repetitivas y así mejora la calidad del personal agrícola, reduce errores y duplica la velocidad de siembra en comparación con los métodos tradicionales. Mediante la integración de mecanismos y sistemas se puede reducir costos, optimizar la producción y sentar las bases para un futuro prototipo automatizado en la agricultura en México.

INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo de investigación se desea diseñar un prototipo desde cero para implementarlo como una herramienta en la siembra de semillas en el sector agrícola. De manera que se llevara a cabo un análisis estructural del diseño establecido como un implantador de semillas automatizado y así implementar un diseño apto para su construcción reduciendo fallas y mejorando su funcionalidad.

En este proyecto se busca plasmar la ayuda al sector agrícola con el objetivo de optimizar y mejorar la producción al campo diseñando una herramienta de sustitución para evitar el esfuerzo físico al sembrar las semillas brindando apoyo a las personas encargadas de realizar dicho trabajo. Por lo tanto, se proponen objetivos que se desarrollaran con mayor énfasis más adelante en el capítulo y para lograrlos se deberá llevar a cabo una serie de análisis sobre el sector agrícola y antecedentes de puntos importantes a manejar en el proyecto, de tal manera que nos brindara información sobre

los problemas actuales que nos llevaron a proponer dicho proyecto.

TEORÍA

La agricultura en México es un sector importante de la economía del país gracias a sus tipos de suelo, climas y ecosistemas representando una amplia baraja de opciones para la reproducción agrícola. Por lo tanto, este sector beneficia al contar con 32.4 millones de hectáreas destinadas a la cosecha, de acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria en 2017 [1], llevando a cabo el planteamiento del proyecto de un implantador de semillas para mejorar el proceso para reducir un margen de error de las sembradoras tradicionales y así mismo la calidad de vida de las personas a consecuencia de peligros hacia su salud como lesiones, enfermedades y ciertos tipos de cáncer por la exposición al sol y uso de productos químicos.

Para llevar a cabo el diseño y creación del proyecto, es necesario comprender ciertos conceptos para lograr un correcto entendimiento para que el sistema cuente con la resistencia correcta, un material adecuado, esfuerzos aplicados o cualquier situación que pueda presentar y que permita desempeñar su función de manera correcta, tocando puntos como teóricos como lo es el software utilizado, los elementos finitos, esfuerzo-deformación y automatización.

Esfuerzo

Para comprender el esfuerzo, en mecánica la fuerza que actúa por unidad de superficie (área), es decir, es el cociente entre la fuerza y la superficie en la que se aplica se le conoce como esfuerzo asociado con la resistencia del material del que está hecho el cuerpo. Estos pueden clasificarse en dos tipos: los que son perpendiculares a la superficie de aplicación y los que son paralelos a la misma. De manera que el esfuerzo puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

Donde P es la magnitud de la fuerza, A es el área donde se aplica y el esfuerzo σ es el cociente.

Deformación

La deformación de un cuerpo se especifica usando los conceptos de deformación unitaria y esfuerzo cortante que actúa en direcciones perpendiculares a la superficie del material. Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, esta tiende a cambiar la forma y tamaño del cuerpo [2]. Estos cambios en la deformación pueden llegar a ser visibles o pasar muy inadvertida. La deformación resultante de un esfuerzo se representa con la ecuación (2).

$$\Delta = \frac{PL}{AE} \tag{2}$$

De acuerdo con la Ec. (2), donde P es la fuerza aplicada, L es la longitud inicial de la pieza, A es el área transversal a la aplicación de la fuerza, E es el módulo de elasticidad del material. Se tiene que tomar en cuenta que (P/A), se mantiene constante.

Figura 1. Grafica de esfuerzo-deformación [4].

Software y Elementos Finitos

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (Diseño Asistido por Computadora) e ingeniería CAE (Ingeniería Asistida por computadora) utilizado ampliamente en industrias para diseñar y modelar componentes mecánicos, productos y sistemas.

Es un software que ofrece un diseño 3D para crear modelos tridimensionales de forma precisa y eficiente que les permite a los usuarios diseñar piezas y ensamblajes utilizando una variedad de herramientas de modelado, gracias a su interfaz intuitiva y fácil de usar. Cuenta con capacidades de simulación integradas que permiten evaluar el rendimiento de los diseños en condiciones específicas. Esto incluye análisis de tensión, análisis de flujo de fluidos, análisis de movimiento y más. Además, se integra con una variedad de software de ingeniería y herramientas de fabricación, lo que facilita la transferencia de datos y la interoperabilidad entre diferentes plataformas.

SOLIDWORKS cuenta con le herramienta del análisis por método del elemento finito, dichos elementos finitos (EF) son una técnica numérica utilizada para el análisis y la simulación. Esta metodología se basa en dividir un dominio o estructura en elementos más pequeños y discretos, donde se aplican ecuaciones matemáticas para aproximar y resolver el comportamiento del sistema completo.

1. Malla: El dominio o estructura se divide en malla compuestos por “elementos” más pequeños, como triángulos, cuadriláteros o tetraedros en caso de problemas tridimensionales que representan una porción del modelo del diseño. Cada elemento está definido por un conjunto de nodos que representan los puntos de interés en el dominio y se unen entre sí (Figura 2).

2. Funciones de forma: Para aproximar el comportamiento del sistema, se utilizan funciones de forma que definen cómo se distribuyen las variables desconocidas (como desplazamientos, temperaturas o presiones) dentro de cada elemento. Estas funciones se eligen de manera que cumplan ciertas condiciones y propiedades requeridas.

3. Ecuaciones de equilibrio: Con base en las leyes de la física aplicables al problema, como las ecuaciones de equilibrio o las ecuaciones de conservación, se establecen las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento del sistema. Estas ecuaciones se aplican localmente en cada elemento, utilizando las funciones de forma y las variables desconocidas asociadas a los nodos.

4. Matrices y sistemas de ecuaciones: Las ecuaciones matemáticas se ensamblan en un sistema global de ecuaciones, que relaciona las variables desconocidas en todos los elementos. Este sistema se resuelve utilizando métodos numéricos, como el método de eliminación de Gauss o el método de descomposición LU, para obtener los valores aproximados de las variables desconocidas.

5. Análisis y resultados: Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, se obtienen los valores aproximados de las variables de interés en todos los nodos y elementos de la malla. Estos resultados se utilizan para analizar el comportamiento del sistema, evaluar la respuesta a diferentes condiciones de carga y optimizar el diseño en función de los requisitos y restricciones establecidos.

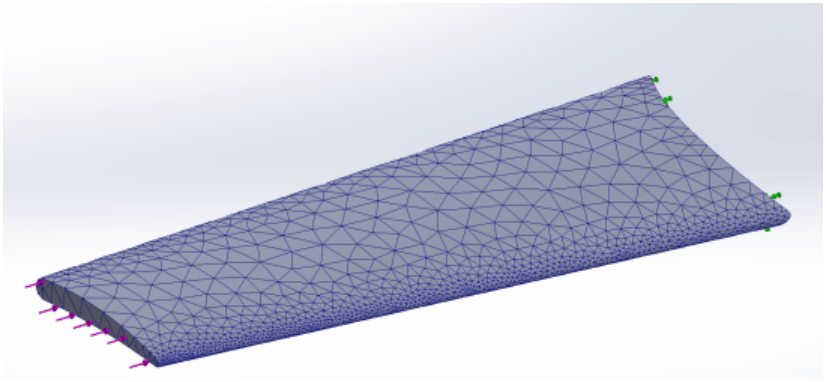


Figura 2. Mallado, elemento y nodo de una hélice.

Análisis estático

El análisis estático es un método que se usa para estudiar el comportamiento tanto de estructuras como componentes bajo cargas estáticas. Cuando se aplican cargas a un sólido, el sólido se deforma y el efecto de las cargas se transmite a través del sólido [4].

Se calculan los desplazamientos, deformaciones unitarias, tensiones y todas las fuerzas de reacción que se puedan presentar bajo el efecto de cargas aplicadas. SOLIDWORKS proporciona esta herramienta a partir del haber creado un modelo CAD y su respectiva malla relacionado al tema de elementos finitos. Esto implica definir las geometrías, materiales y condiciones como lo son las cargas y restricciones que afectan al comportamiento del modelo.

El análisis determina el rendimiento, calidad y seguridad de la pieza o ensamblaje de acuerdo con los parámetros que se introducen. De tal manera que proporciona información sobre las deformaciones, tensiones y desplazamientos en la estructura debido a las cargas para evaluar la seguridad y la integridad estructural, así como para optimizar el diseño y minimizar el peso o costo (Figura 3).

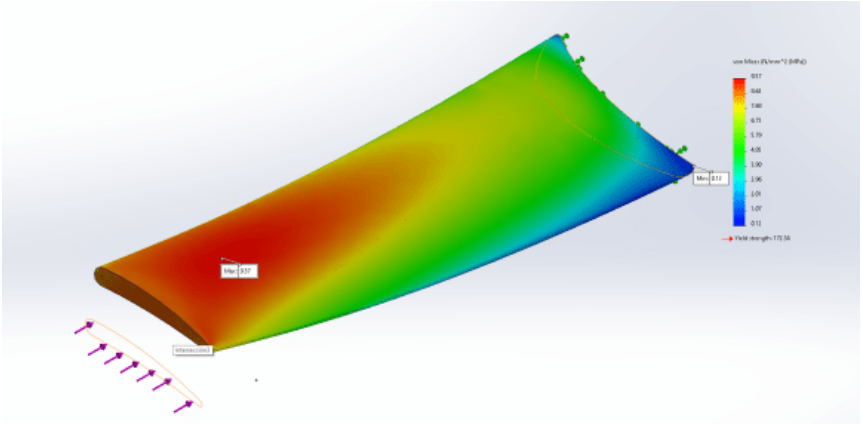


Figura 3. Representación de esfuerzos en una hélice.

De acuerdo con la figura 3, una vez creado un estudio de análisis estático SOLIDWORKS nos proporciona herramientas para visualizar los resultados, incluyendo mapas de contorno de tensiones, deformaciones y desplazamientos para interpretar dichos resultados, proponer soluciones y obtener conclusiones. Además, la escala de colores muestra la magnitud de la distribución de los resultados del modelo analizado y mejorando la interpretación e identificación de áreas críticas donde se producen altas tensiones o deformaciones excesivas para realizar cambios en el diseño según sea necesario.

METODOLOGÍA

Planificación de estudio

En el presente proyecto se decidió enfocar hacia el sector agrícola después de observar las condiciones en algunos campos de cultivo y el impacto que ha llegado a tener este sector en los últimos años tomando una gran importancia en diversos aspectos como el económico, social, tecnológico y de salud. Para adaptar el proyecto a las necesidades del sector agrícola, se realizará un estudio centrado en tres aspectos principales: las personas dedicadas a la siembra de semillas que trabajan directamente en los campos de cultivo (agricultores), los tipos de semillas más comunes en la ciudad de Irapuato y las características del terreno donde se siembran. Una vez analizados los datos, se procederá a crear el prototipo, inicialmente mediante una implementación en el software SOLIDWORKS para realizar un análisis. Esto permitirá conocer las posibles deformaciones y esfuerzos a los que estará sometido el prototipo. Se analizará cada tipo de material para su construcción par finalmente seleccionar el más adecuado para elaborar el proyecto.

El análisis determina el rendimiento, calidad y seguridad de la pieza o ensamblaje de acuerdo con los parámetros que se introducen. De tal manera que proporciona información sobre las deformaciones y tensiones en la estructura debido a las cargas para evaluar la seguridad y la integridad estructural, así como para optimizar el diseño y minimizar el peso o costo (Figura 3).

Selección de sujetos

Agricultores: Se opto por seleccionar exclusivamente a las personas dedicadas a la agricultura en la ciudad de Irapuato, con el objetivo de beneficiarlas mediante el proyecto. Se busca reducir la carga física que muchos de estos agricultores experimentan al trabajar en los campos de cultivo de la ciudad, así como también disminuir el tiempo dedicado a estas labores y provocando problemas de salud por la extrema exposición al sol o algún problema de salud que enfrentan.

Semillas: La selección en los tipos de semillas que se cultivan principalmente en Irapuato, incluye semillas de fresa, maíz trigo y sorgo. Es fundamental que estas semillas sean compatibles y se

adapten adecuadamente al prototipo desarrollado, garantizando su correcto funcionamiento con el mismo.

Tierra para sembrar: Se lleva a cabo un análisis detallado de los terrenos destinados a la siembra. Dado que el prototipo es un sistema móvil que requiere desplazarse por distintos puntos de terreno, se considera esencial que cuente con un mecanismo capaz de transitar por diversas condiciones. Además, el estudio del terreno es crucial para garantizar la correcta implantación de las semillas, asegurando que sean depositadas de manera adecuada.

Técnicas de recolección

Con el propósito de satisfacer las necesidades específicas y abordar el problema identificado, se propone el diseño de un prototipo de carrito basado en el análisis de documentos que contienen trabajos de diseño de dosificadores. En esta sección, se realizará una revisión de los estudios y proyectos previos relacionados con la siembra y tecnologías de implantación haciendo uso de la técnica de simulación de un diseño mecánico para imitar el comportamiento del sistema real a través de un modelo computacional que implica el uso de CAD, CAE y CAM.

Maquinas dosificadoras

Un dosificador es un dispositivo diseñado para medir y dispensar una cantidad especifica de líquido, polvo o producto. Estos dispositivos pueden variar desde simples herramientas manuales hasta sistemas automatizados más avanzados. Por ejemplo, tomando como referencia el diseño conceptual propuesto por Reynolds (2006), quien desarrollo un sistema inteligente de dosificación neumático de semillas (Figura 4), se buscó un enfoque que se alineara con el objetivo principal del proyecto. Esto implicaba implementarlo en áreas de cultivo donde interactuar directamente con la tierra.

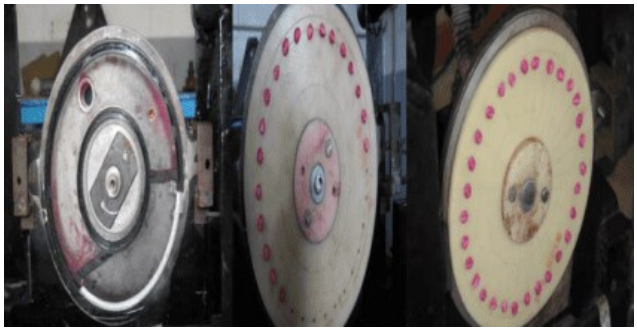


Figura 4. Plato semillero para dosificador [7].

El mercado actual ofrece variedad de prototipos y productos diseñados para la implantación de semillas. Entre ellos, se destacan los dispositivos manuales (Figura 5), los cuales fueron considerados como otro diseño para tener en cuenta en el desarrollo del diseño. Sin embargo, este producto carece de la capacidad de un sistema automatizado y de adaptabilidad a terrenos irregulares. Esto resalta la necesidad imperante de desarrollar soluciones innovadoras que aborden las necesidades específicas del sector agrícola y mejoren el proceso de implantación de semillas.

Figura 5. Dispensador de semillas.

Diseño conceptual

En base a las ideas previas, se desarrolló un dispositivo durante la fase inicial del diseño del prototipo implantador de semillas (Véase Figura 6). El proceso de diseño se inició con la concepción de un sistema manual similar al dispensador de semillas (Figura 2), el cual sería capaz de depositar las semillas a una profundidad especifica mediante una técnica sencilla. Este sistema se ideo para que solo se requiera presión manual para accionar una palanca con la mano. De esta manera, se generaría la fuerza necesaria para abrir las pinzas, con el objetivo de crear un espacio en la tierra donde se pudiera introducir la semilla.

Figura 6. Diseño conceptual a) Prototipo manual b) Sistema de resorte.

Tras evaluar el concepto anterior, se tomó la decisión de cambiar el prototipo a un concepto con mayor potencial para mejorar la autonomía y versatilidad de este. Se consideraron aspectos como la implementación de un sistema más automatizado y eficaz que permitiera abordar una producción mejorada en comparación con los métodos tradicionales, en diversas condiciones de cultivo. En consecuencia, se optó por avanzar con el nuevo concepto de un carrito adaptado con llantas todo terreno, diseñando para enfrentar irregularidades del terreno, y modulado por motores paso a paso implementados con Arduino.

Elementos del diseño del proyecto

El prototipo cuenta con mecanismos y diseños basados en los tamaños de las semillas que se tomaron en cuenta (Tabla 1). Se propone el diseño de una caja dosificadora de 160 mm x 160 mm que se encuentra en la parte superior con dos agujeros (uno centrado para el ensamblaje a un eje y otro para dejar caer la semillas).

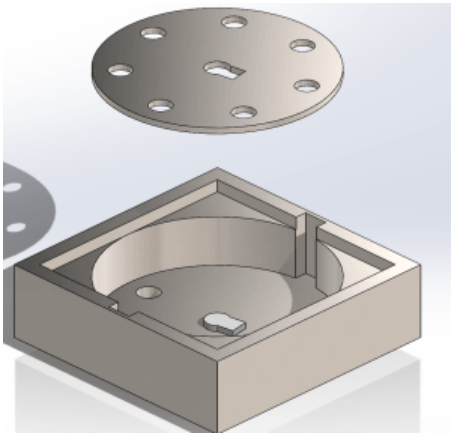


Figura 7. Caja dosificadora y compartimiento de semillas.

Esta caja almacena un compartimento con pequeños agujeros de 16 mm de diámetro en los que se colocan las semillas para su implantación, tomando en cuenta los valores estándar de las semillas mostradas en la Tabla 1. La figura 7 muestra un compartimiento que contiene alrededor de 6 orificios, cada uno de ellos siendo un espacio para una sola semilla y limitando que se genere problemas como puede ser el exceso de semillas que se pueden colocar en cada posición del surco.

Tabla 1. Pesos y tamaños de semillas.

Tipo de Semilla	**Peso**	**Tamaño**
Fresa	0.035g (peso de 100 semillas)	0.8mm -1mm
Maíz	0.15g - 0.50g (peso de una semilla)	7mm - 8mm
Trigo	25g – 40g (peso de 1000 semillas)	2.65mm
Sorgo	2.256g (peso de 100 semillas)	5mm

La caja cuenta con una división diseñada para evitar que más semillas de las necesarias pasen a través de ella. En un lado de la división, se almacenan las semillas para garantizar una distribución uniforme durante el proceso de implantación.

La estructura principal es una base fabricada en acero inoxidable, seleccionado específicamente debido al entorno en el que opera el prototipo. Este entorno implica el contacto con zonas húmedas, exposición a la lluvia, presencia de tierra y otros factores que podrían afectar el material del prototipo. El acero inoxidable se elige por su resistencia a la corrosión y su durabilidad en condiciones adversas.

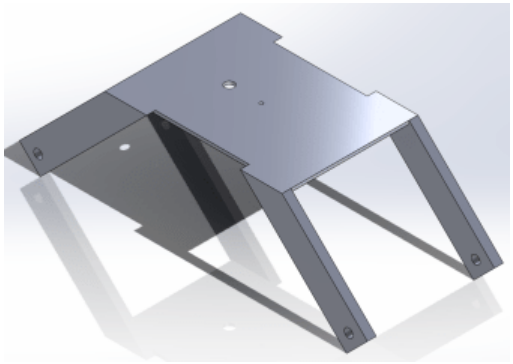


Figura 8. Base principal

Para la implantación, el prototipo cuenta con un mecanismo crucial compuesto por un sistema piñón-cremallera. Este sistema está diseñado para insertar un tubo de acero inoxidable en la ubicación correspondiente donde se colocará la semilla. Además, mediante un servomotor, se accionará dicho mecanismo de manera controlada según la necesidad de producción requerida.

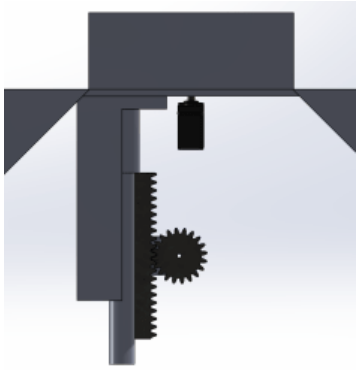


Figura 9. Mecanismo piñón-cremallera.

El mecanismo implementado tiene la función de insertar el tubo a una profundidad específica, es decir, la profundidad necesaria para plantar una semilla de manera efectiva y garantizar su crecimiento adecuado. Para lograr el funcionamiento del mecanismo el soporte tiene como función el integrar las piezas necesarias para la introducción del tubo deslizador de 20 cm (Figura 10).

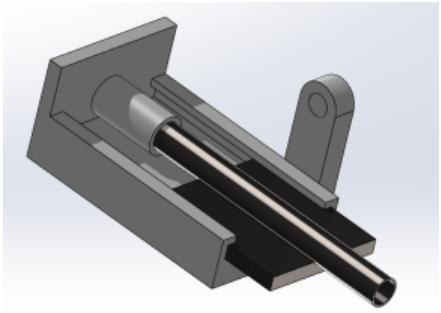


Figura 10. Soporte y tubo deslizador.

El soporte cuenta con una altura de 16 cm para permitir que el deslizador pueda moverse libremente hasta cierta distancia determinada con ayuda del mecanismo piñón-cremallera. Finalmente, se implementa un diseño de prototipo más completo, eficaz y accesible (Figura 11).

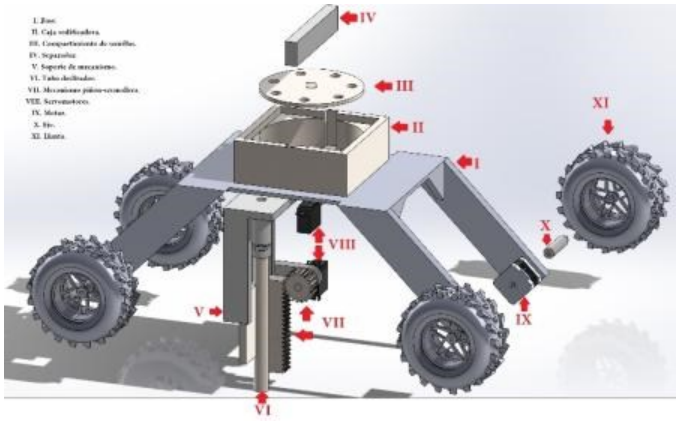
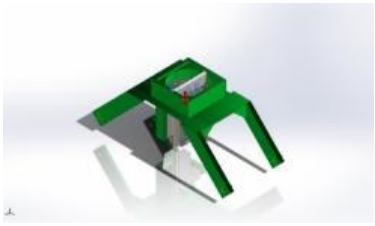
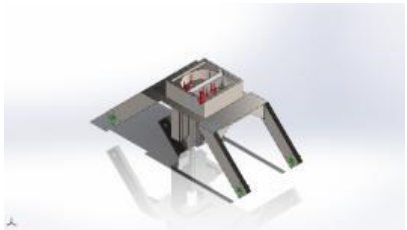


Figura 11. Diseño del prototipo final y sus partes.

Propiedades mecánicas

De acuerdo con la Tabla 2, se muestran las propiedades de los materiales que se emplearon en las piezas del diseño para analizar, en este caso el acero inoxidable (férrico) destacando en la estructura principal y soportes del proyecto. Por otro lado, el plástico ABS usado para piezas pequeñas como los ejes o elementos conectores.

Tabla 2. Propiedades de los materiales.

Modelo de Referencia	Propiedades
	**Nombre:** Acero Inoxidable **Tipo de modelo:** Isotrópico elástico **Límite elástico:** 1.72339e+08 N/m^2 **Resistencia a la tracción:** 5.13613e+08 N/m^2 **Módulo elástico:** 2e+11 N/m^2 **Coeficiente de Poisson:** 0.28 **Densidad de masa:** 7,800 kg/m^3 **Módulo de corte:** 7.7e+10 N/m^2 **Coeficiente de expansión térmica:** 1.1e-05 /Kelvin
	**Nombre:** ABS **Tipo de modelo:** Isotrópico elástico lineal **Resistencia a la tracción:** 3e+07 N/m^2 **Módulo elástico:** 2e+09 N/m^2 **Coeficiente de Poisson:** 0.394 **Módulo de corte:** 1,020 kg/m^3 **Módulo de corte:** 3.189e+08 N/m^2

El prototipo solo cuenta con dos tipos de materiales que se utilizan con cierto fin por destacar en el sector seleccionado. En el caso del acero inoxidable gran parte de la estructura se compone de este material que tiene un papel crucial debido a sus propiedades únicas que lo hacen ideal para diversas

aplicaciones sobre todo en el sector agrícola como la resistencia a la corrosión por la humedad, productos químicos, fertilizantes y pesticidas. Además, cuenta con una durabilidad y alta resistencia para soportar cargas y aunque el costo inicial es alto su durabilidad y bajos costos de mantenimiento a largo plazo compensan la inversión.

En cambio, el plástico ABS es un polímero termoplástico utilizado en diversas industrias por sus propiedades mecánicas y estéticas. En este caso, se determinó usar este tipo de plástico por el uso de la impresión 3D en algunas de las piezas pequeñas que ayudan al funcionamiento del prototipo como es el caso de ejes o algunas difíciles de hacer con acero inoxidable por su estructura un poco complicada.

Condiciones de sujeciones y cargas

Se determinan las sujeciones que se encargan de darle a una pieza una configuración inalterable durante un análisis que implica que las dimensiones y la forma de la estructura no cambian bajo las condiciones dadas. Para el análisis estático se determina que los cuatro agujeros de la base y el piñón estén en una condición fija para restringir sus grados de libertad.

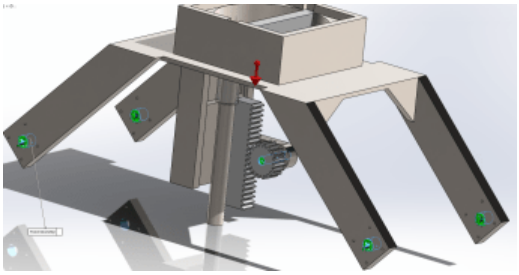


Figura 12. Geometría fija o sujeciones.

Una vez seleccionado las zonas fijas, se determinan dos aspectos a considerar. El primero es la gravedad de 9.81 m/s^2 (flecha azul), que se encuentra implicada en el comportamiento del diseño, y la segunda bajo una presión de 1 MPa (flechas rojas) y otro usando 0.8 MPa, ambas hacia una de las caras del compartimiento de semillas, tal y como se muestra en la figura 15.

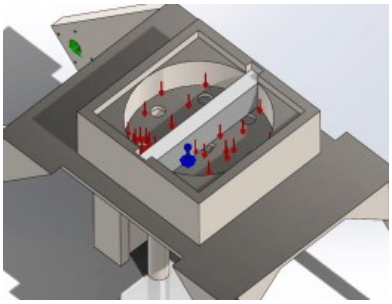


Figura 13. Cargas aplicadas (presión y gravedad).

Mallado

Después de aplicar las condiciones anteriores, se utilizaron dos tipos de mallados, un mallado basado en la curvatura combinada (Figura 14a) debido a la estructura de nuestro diseño y un mallado basado en curvatura (Figura 14b). Por medio de la herramienta SOLIDWORKS se realiza una técnica numérica de cada una de las piezas de nuestro modelo, basada en los elementos finitos.

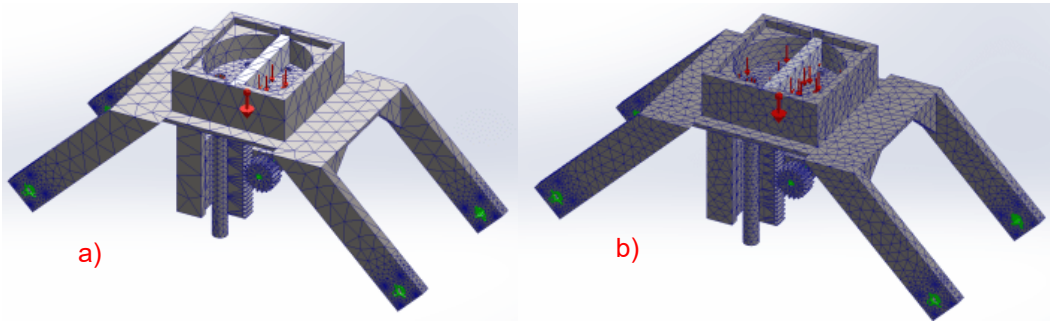


Figura 14. Análisis estático a) Mallado basado en la curvatura combinada b) Mallado basado en curvatura.

Ambos análisis se tomaron en cuenta con las mismas condiciones, pero con la diferencia de usar un parámetro de mallado distinto, en el de curvatura combinada se utiliza un factor de mallado intermedio, en cambio, en el modelo basado en la curvatura se utiliza un factor de mallado fino. Con la finalidad de comparar los resultados y cambios en el análisis.

RESULTADOS

Distribución de tensiones

Una vez realizado diferentes pruebas en el análisis, se tomaron en cuenta dos comparaciones de resultados para mostrar el comportamiento con un mallado en curvatura combinada. Las condiciones simulan el soporte fijo con unión rígida y a una presión de 1MPa aplicado a la parte superior en el compartimiento de semillas con la intervención de la gravedad.

Si se modifica la altura del tubo deslizador, el análisis muestra resultados diferentes. Si colocamos dicho tubo en una posición que lo comprometa a topar con una pieza y dejando un hueco o espacio (Figura 15), las cargas se distribuyen de otra manera.

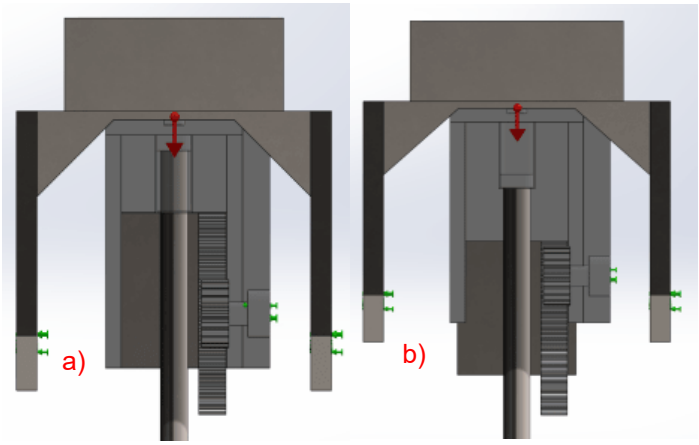


Figura 15. Cambio de posición del tubo deslizador a) Posición inicial b) Posición a 3.9 cm.

Si se utiliza la posición inicial (Figura 15a), se muestra la distribución de tensiones Von Mises mediante una escala de colores y donde se obtuvieron resultados mostrando zonas donde se concentra una máxima tensión alcanzado un valor máximo de 92.40 MPa y una mínima en una zona de la cremallera de 0.

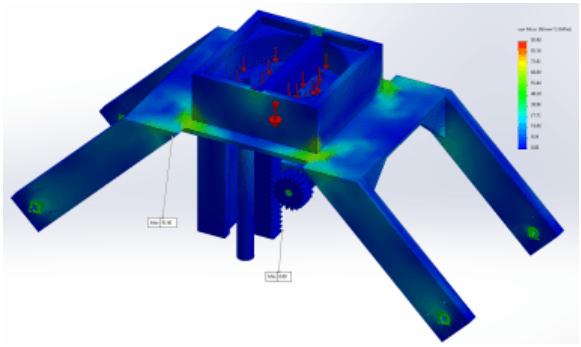


Figura 16. Distribución de tensiones en la posición inicial.

De acuerdo con la distribución, la figura 16 muestra unas tensiones principalmente en la base debido a la presión ejercida. Sin embargo, al analizar diferentes resultados siempre se presenta una máxima tensión en una zona poco visible pero importante, en este caso los 92.40 MPa suceden en un extremo de base mostrado en la Figura 17.

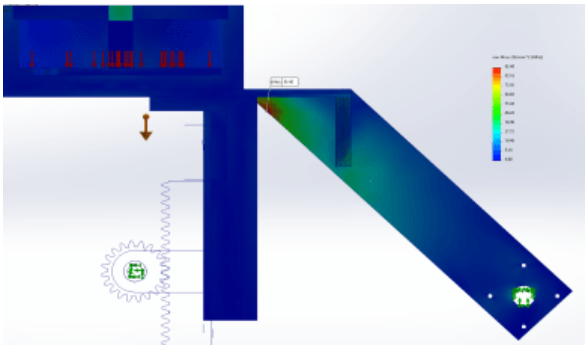


Figura 17. Máxima tensión alcanzando un valor de 92.40 MPa (Color rojo).

Por otro lado, al crear un cambio de posición del tubo como en la Figura 15b, este sufre una tensión mayor que en el resultado e incluso cambiando a su zona opuesta la tensión con un valor de 94.40 MPa. Además, ahora el tubo muestra un gran cambio en zonas donde anteriormente no se mostraba algún resultado, tal es el caso del tubo deslizador, el cual aumenta la zona de tensión (color verde) ocupando la mitad del tubo aproximadamente (véase Figura 18).

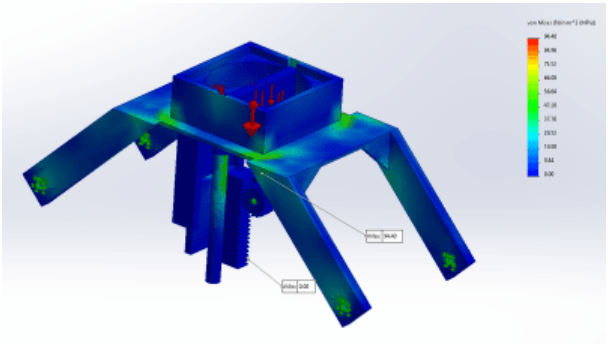


Figura 18. Distribución de tensiones en la posición de 3.9 cm.

Finalmente, se realiza un cálculo del factor de seguridad del diseño y asi concluir si en realidad es necesario rediseñar el prototipo y hacer cambios en la estructura. Usando la ecuación 3, podemos demostrar que nuestro factor es perfecto y aceptable dentro de los límites establecidos.

$$n = \frac{\sigma_{material}}{\sigma_{diseño}} \quad (3)$$

Si nuestro factor de seguridad es mayor a 1 (n>1), indica que nuestro material y estructura es capaz de soportar cargas y dar un análisis perfecto dentro de los límites.

$$n = \frac{172.339\ N/mm\text{^}2}{92.40\ N/mm\text{^}2} = 1.865$$

De tal manera que si dividimos el esfuerzo máximo del material (límite elástico) entre el esfuerzo máximo del diseño completo, obtendremos un factor mayor a 1 (Figura 19).

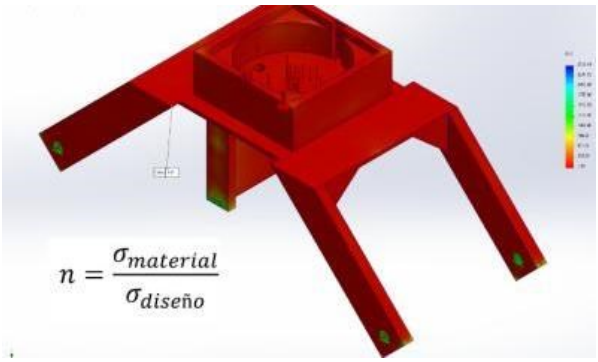


Figura 19. Factor de seguridad de 1.87.

Si comparamos los resultados con un mallado fino basado en la curvatura combinada y uno basado en curvatura se puede observar que los valores son mucho más precisos e incluso aumentan los valores en los esfuerzos y disminuye nuestro factor de seguridad (Véase Figura 20).

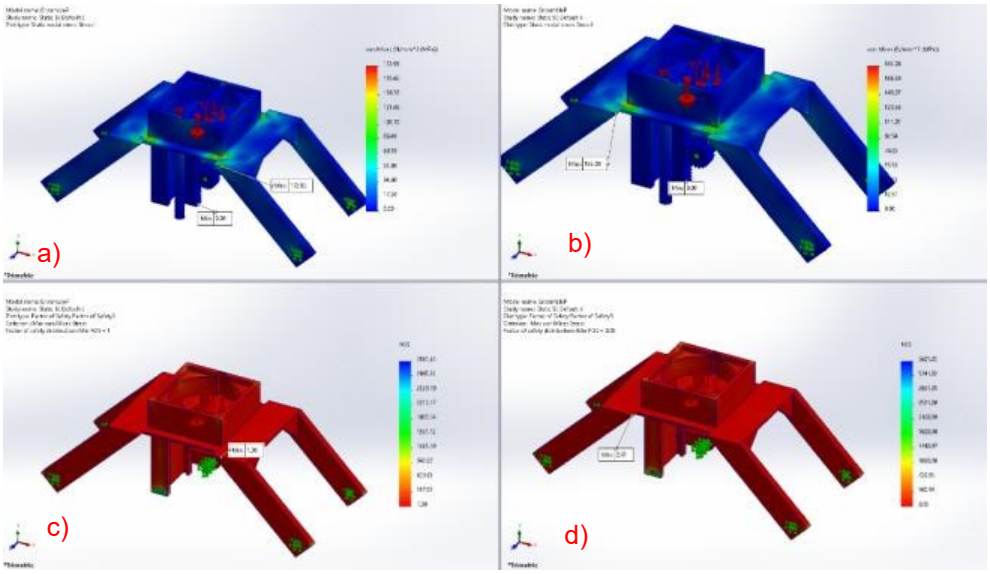


Figura 20. Comparación de resultados tensiones y factor de seguridad.

Los resultados corresponden a la tensión von Mises (Figura 20a) y factor de seguridad (Figura 20c) en un mallado basado en curvatura combinada. Por otro lado, la tensión von Mises (Figura 20b) y el factor de seguridad (Figura 20d) con mallado basado en curvatura. En la figura 21 se muestran los 4 desplazamientos de los diferentes mallados que se obtuvieron en el análisis estático. Dichos resultados corresponden al desplazamiento con mallado intermedio basado en curvatura combinada con presión de 1 MPa (Figura 21a), mallado fino basado en curvatura combinada a una presión de

0.8 MPa (Figura 21b), mallado basado en curvatura a una presión de 1 MPa (Figura 21c) y un mallado fino basado en curvatura combinada a una presión de 1 MPa (Figura 21d), respectivamente.

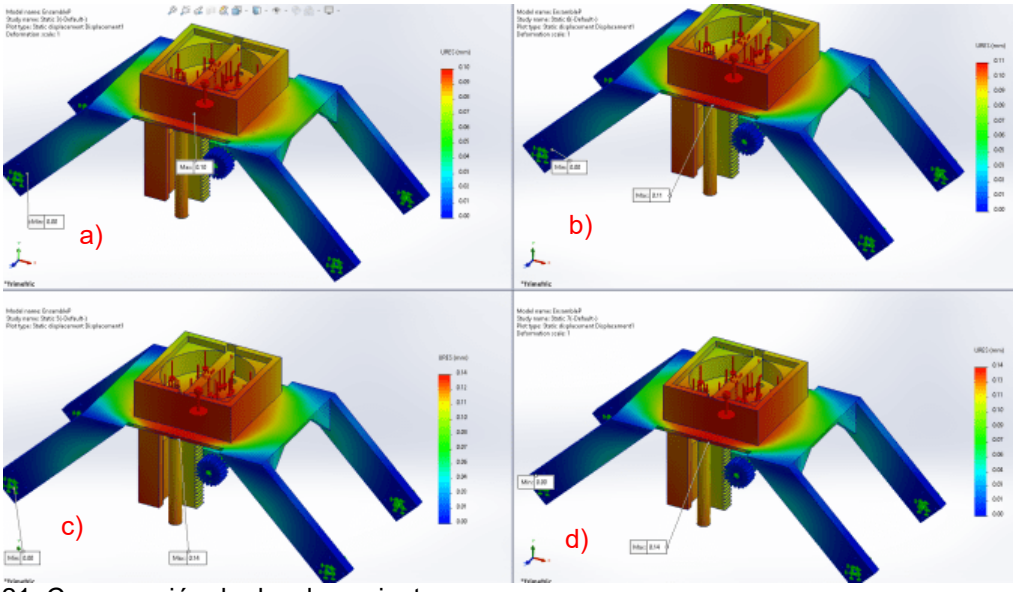


Figura 21. Comparación de desplazamientos.

En la tabla 3, se muestra una comparación de las variaciones entre resultados con la finalidad de aclarar y ordenar estos, en los cuales se observa un aumento en tensiones y una reducción en el factor de seguridad.

Tabla 3. Comparación de resultados en análisis estático.

Resultado	Curvatura combinada (malla fina)	Curvatura (malla fina)	Curvatura combinada (malla intermedia)	Curvatura combinada (malla fina)
Presión	1 MPa	1 MPA	1 MPa	0.8 MPa
Tensiones	172.72 MPa	185.04 MPa	92.40 MPa	138.61 MPa
Factor de seguridad	1	0.93	1.87	1.24
Desplazamientos	0.14 mm	0.14 mm	0.10	0.11

Principalmente se utilizó una malla basada en la curvatura combinada con un factor de mallado intermedio, pero al tener una estructura más compleja es mejor optar por una malla fina ya que nos proporciona resultados más precisos y detallados, es decir, nuestro análisis más apto es con un mallado basado en la curvatura a una presión de 8 MPa (Figura 22).

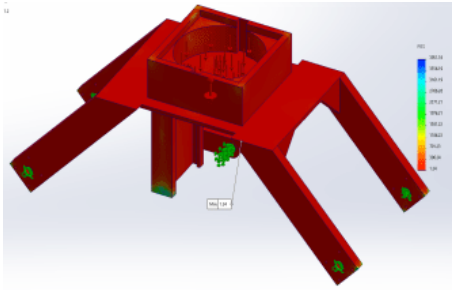


Figura 22. Distribución de tensiones y factor de seguridad a una presión de 0.8 MPa.

CONCLUSIONES

Al someterse a una presión pequeña el diseño y materiales pueden llegar a no verse afectados e incluso llegar a no preocuparse por si falla, pero si se le aplican bajo condiciones mayores se puede observar gráficamente el comportamiento posible de fallas estructurales como es el caso de la base al sufrir en varios análisis el mismo efecto en la zona. Por lo tanto, el realizar un análisis de elementos finitos con un software como SOLIDWORKS se puede evitar problemas en costos y sugerir un cambio de estructura o materiales. Al realizar algunos análisis nos dimos cuenta de que cambian los esfuerzos según las condiciones de contacto que les puedas dar, porque si se llega aplicar dicho análisis, pero con el deslizador a tope con un acoplamiento, se crea un esfuerzo y ruptura de estos elementos.

En conclusión, el análisis estático del prototipo revelo unas áreas críticas en específico, las cuales llegar a tener altas tensiones provocando una inestabilidad al soporte, por lo que se requiere un pequeño rediseño para asegurar la integridad estructural y no comprometer el prototipo a un posible problema. Además, al hacer uso de diferentes mallados e incluso presiones distintas podemos observar y deducir cual de nuestros análisis son más precisos y a que valores pueden soportar nuestros materiales para sufrir alguna deformación y soportar la carga, incluso al analizar e interpretar los resultados sufrieron muchos cambios aunque por muy mínimos que parezcan en realidad pueden llegar a resultar en una falla en nuestra construcción del proyecto tal y como se muestra en la diferencia de una presión de 1 MPa comprometiendo al material a no cumplir con un factor de seguridad decente o fiable a diferencia de una presión de 0.8 MPa. Finalmente, nuestro diseño cuenta con un factor de seguridad de n=1.24, es decir, el componente es capaz de soportar la carga sin fallar. Futuras investigaciones incluirán el análisis dinámico y pruebas experimentales, asi como algunas mejoras del diseño.

BIBLIOGRAFÍA.

1. M. Soto (2022). “La agricultura: el motor de nuestra economía”. TecScience. Disponible: https://tecscience.tec.mx/es/divulgacion-ciencia/la-agricultura-el-motor-de-nuestra-economia/.

2. Hibbeler, R. Mecánica de materiales. México: PEARSON EDUCACION, 2006.

3. Gere, J. M. MECANICA DE MATERIALES. MEXICO: THOMSON, 2014.

4. Análisis estático lineal (2021). Ayuda de SOLIDWORKS. (s. f.). https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/c_Linear_Static_Analysis.htm

5. Valdés Rodríguez, Ofelia & José, Tejero & Valle, Del & Alberto, Servín & Muñoz, Gamboa. Determinación de las Curvas Esfuerzo-Deformación sobre Cargas Axiales de una Raíz Tropical. (2014)

6. Herrera López, M. J., Medina Chaverria, J., & Quintero Riaza, H. F. “DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA EL EMPAQUE DE FORRAJE DE MAÍZ PARA ENSILAJE: DOSIFICACIÓN Y COMPACTACIÓN”. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 61, no. 2, pp. 4676-4685, 2008.

7. Reynolds Chávez, M. A. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DOSIFICACIÓN NEUMATICO DE SEMILLA. Tesis Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, 2006.

8. Celigüeta-Lizarza, J. T. (2011). Método de los elementos finitos para análisis estructural.

PRIMERA APROXIMACIÓN A PROTOTIPO PARA EVALUAR PROPIEDADES ELECTRICAS DE GRAFITO EXPUESTO A UV

Estefania Alejandra Hernández Rangel [1], Jessica Paola Córdova Fraga[1], Estefanía López Calderón [1] Modesto Antonio Sosa Aquino, Angélica Hernández Rayas, Svetlana Kashina, Gonzalo Páez Padilla Gonzalo, José Marco Balleza Ordaz.

[1,2] División de Ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. León, Gto. México.
[3,4]Centro de Investigaciones en Óptica A.C. León, Gto. México.
ea.hernandezrangel@ugto.mx

RESUMEN

El grafito, un alótropo del carbono con estructura cristalina bidimensional, exhibe propiedades conductoras. En este estudio, se ha analizado la respuesta de dos tipos de grafito comercial (9B y 2B) a la irradiación con fuentes de radiación UV-A y UV-C. Se diseñó un circuito eléctrico para medir cambios de voltaje en el material. Los resultados muestran una respuesta eléctrica a ciertas frecuencias, correlacionada con los cambios producidos al estar expuesto a la luz UV.

INTRODUCCIÓN

La Dosimetría Personal se rige como un recurso indispensable para el personal que se desenvuelve en entornos con fuentes de radiación ionizante, siendo fundamental para su protección. Ya que posibilita la medición precisa de la dosis de radiación recibida por los trabajadores expuestos, permitiendo así establecer protocolos que garanticen el cumplimiento de los objetivos de Seguridad Radiológica.

El objetivo primordial de la Dosimetría Personal es medir y, como consecuencia de esta medición, limitar las dosis que reciben el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE). Es imperativo asegurar que el límite equivalente de dosis anual de 50 mSv (5 rem), según lo establecido en el ICRP N°.25, no sea rebasado. Además, se busca mantener tan baja como sea razonablemente posible la dosis recibida por cualquier individuo expuesto a la radiación [1]. Además de que es útil para la verificación indirecta de instalaciones y equipos, proporcionando orientación en la toma de decisiones en casos de accidentes y contribuyendo a la planificación futura del trabajo.

El POE se clasifica en dos condiciones de trabajo, conforme al ICRP N°.26. La condición A permite una exposición anual que podría superar 3/10 de los límites de la dosis equivalente, mientras que la condición B indica una exposición anual poco probable de exceder estos límites. Los POE bajo la condición A deben llevar consigo dosímetros personales en todo momento y someterse a exámenes médicos anuales, mientras que aquellos en la condición B utilizan los dosímetros ocasionalmente para verificar sus niveles de exposición [1].

En México, la dosimetría personal tiene su enfoque principal en el sector salud, específicamente en áreas como radiología, medicina nuclear y radioterapia, así como en otros campos donde se emplean fuentes de radiación para diagnóstico o tratamiento médico. En el país, los métodos de dosimetría más utilizados son la dosimetría por película y la dosimetría termoluminiscente (TLD). Predominantemente, el TLD es preferido debido a la sensibilidad de las películas a factores ambientales, como temperatura y humedad, que afectan su precisión hasta en un 30%. La Dosimetría Termoluminiscente se ha vuelto esencial, gracias a sus ventajas sobre las películas, como su Z efectiva, resistencia a factores ambientales, mayor precisión y reutilizabilidad [2].

A pesar de ser una opción aparentemente perfecta, los dosímetros termoluminiscentes presentan desventajas, como un mayor costo que abarca tanto el material como los equipos asociados para su lectura. Este elevado costo ha llevado a que la mayoría de los hospitales, por no decir que todos, dependan de empresas externas para la lectura de sus dosímetros. La demanda creciente de

servicios de Dosimetría Personal, impulsada por el aumento en el uso de fuentes y dispositivos generadores de radiaciones ionizantes, tanto en el sector industrial como en clínicas y hospitales, ha generado una necesidad crítica. Actualmente, solo 9 empresas prestadoras de este servicio para usuarios externos y 3 instituciones que lo ofrecen internamente aparecen en el directorio del Programa Permanente de Supervisión de los Servicios de Dosimetría Personal de Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) para todo el país [2]

TEORÍA

Radiación

La radiación es el fenómeno físico mediante el cual la energía se propaga en forma de ondas electromagnéticas (radiación electromagnética) o partículas energizadas (radiación corpuscular) a través del vacío o de un medio material. La radiación se clasifica en dos categorías principales: ionizante y no ionizante.

La radiación no ionizante es de menor intensidad y su energía es suficiente para hacer vibrar las moléculas de la materia, generando calor a través de esta vibración. Ejemplos de radiación no ionizante incluyen las ondas de radio, parte del espectro ultravioleta (UV), la luz visible y las microondas [3]. En contraste, la radiación ionizante posee energía suficiente para arrancar electrones de los átomos o moléculas, produciendo cambios a nivel atómico y generando iones [4]. Esta radiación es comúnmente emitida por átomos inestables (radiactivos) y se presenta en forma de partículas α (núcleos de helio), β (electrones o positrones), y γ (fotones).

La luz ultravioleta constituye una pequeña parte del espectro electromagnético, abarcando un rango de longitudes de onda desde aproximadamente 100 a 400 nm. Esta se clasifica en tres tipos basados en su longitud de onda: UV-A, UV-B y UV-C. Esta sección del espectro comienza con el UV-C, que va de 100 a 280 nm. Esta es la parte más energética y dañina del UV, ya que es la única parte de este grupo clasificada como radiación ionizante. Sigue el UV-B, que va de 280 a 320 nm. Aunque una exposición excesiva puede causar daño en la piel, como quemaduras solares, y aumentar el riesgo de cáncer de piel, es esencial en la síntesis de vitamina D y no se considera un riesgo grave, por lo que se clasifica como radiación no ionizante. Finalmente, el UV-A va de 320 a 400 nm. Es la menos dañina y energética de todas, y aunque tiene la capacidad de penetrar profundamente en la piel, al igual que el UV-B, se clasifica como radiación no ionizante.[5]

Los efectos de la radiación en los tejidos se clasifican en dos categorías: efectos estocásticos (probabilísticos) y no estocásticos (deterministas). Los efectos no estocásticos dependen de la dosis absorbida y se manifiestan cuando esta supera un cierto umbral, depositando suficiente energía para causar daño en el tejido. Por otro lado, los efectos estocásticos no tienen un umbral de dosis y la probabilidad de que ocurran aumenta con la dosis, aunque su aparición es aleatoria por naturaleza. [6]

La dosis absorbida es una magnitud que indica la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de un material. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la dosis absorbida se mide en grays (Gy), que equivalen a joules por kilogramo (J/kg).[6]

El número atómico efectivo (Zeff) es una representación del material basada en una medida ponderada, en la que se combinan los números atómicos individuales de los elementos que constituyen el material, de acuerdo con sus fracciones de masa y su contribución a la interacción con la radiación. El Zeff es crucial para entender cómo el material absorberá y dispersará la radiación.[7]

Grafito

El grafito puro es un componente caro y difícil de conseguir, mientras que los lápices comerciales contienen grafito en cierto porcentaje en su composición. De hecho, cuanto mayor sea la proporción de grafito respecto a la de arcilla (a la cual también se añade algo de cera), más blanda será la mina del lápiz. La escala comprende 20 durezas, que se subdividen en letras, siendo B la más blanda de todas y estas las que tienen más contenido de grafito. El primero de este grupo es el lápiz 2B, que contiene 74% de grafito, 20% de arcilla y 5% de cera. Mientras que el 9B, siendo el último de este grupo, es el lápiz más blando de todos, con casi un 90% de grafito.[8]

Esta alta proporción de grafito en los lápices más blandos se relaciona directamente con las propiedades estructurales únicas del grafito. El grafito exhibe una fascinante estructura cristalina bidimensional (2D), compuesta por capas individuales de átomos de carbono enlazados covalentemente de forma hexagonal y apiladas verticalmente. En esta disposición, cada átomo de carbono está hibridado sp2, generando una estructura hexagonal en capas. Estas capas, aunque débilmente unidas debido a las fuerzas de Van der Waals, permiten un deslizamiento fácil entre ellas. La complejidad de la estructura del grafito se manifiesta en su disposición en capas, donde el ángulo entre los enlaces conectados por el átomo central indica la hibridación y factores de repulsión presentes. Por ejemplo, la hibridación sp corresponde a un ángulo de 180°, sp2 a 120°, sp3 a 109.5° y sp3d2 a 90°.[9]

A pesar de no adherirse estrictamente a la regla del octeto, que establece configuraciones electrónicas similares a los gases nobles, el grafito muestra alta estabilidad experimentalmente. Esta estabilidad se debe a que el electrón adicional en la estructura del grafito se deslocaliza sobre todos los átomos de carbono, confiriéndole robustez. Cabe destacar que el carbono en el grafito tiene cuatro electrones de valencia, y el electrón restante se deslocaliza en la estructura, formando un enlace pi con otro átomo de carbono. La presencia de electrones deslocalizados contribuye significativamente a la conductividad térmica y eléctrica del grafito.

En cuanto a los defectos en materiales carbonáceos, especialmente en carbonos simétricos sp2, son inevitables y de gran relevancia. La irradiación provoca la excitación de electrones, ocupando las trampas de defectos puntuales generadas por el dopaje. La concentración y capacidad de almacenamiento de estas trampas pueden resultar beneficiosas para aplicaciones dosimétricas. Aquí, la aparición de defectos, como la vacancia de un ion negativo, indica áreas con una carga positiva excesiva y el potencial de actuar como trampas de electrones.

En el contexto de los dosímetros de grafito, ciertas características clave incluyen la capacidad para crear dosímetros con un amplio rango dinámico de medición de dosis, resistencia al agua y corrosión, y la ventaja de ser un material de bajo costo con dependencia mínima de fotones, además de tener un Zeff cercano al tejido humano blando (7.4).[10]

En relación con la irradiación, la singular estructura del grafito y el cambio en su hibridación afecta sus propiedades térmicas y eléctricas, como la conductividad y la resistencia. Esto permite un análisis eléctrico del material en función de estos cambios, abriendo la puerta a aplicaciones adicionales en dispositivos o mediciones.

Ley de Ohm

La ley de ohm establece que la corriente eléctrica (I) que circula por un conductor es directamente proporcional al voltaje (V) e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (R) del conductor. [11]

$$I = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}}$$

Es decir, la resistencia de un material, que depende de su geometría y composición, determina el flujo eléctrico que circula a través de dicho material.

Leyes de Kirchhoff

Las leyes de Kirchhoff se basan en los principios de conservación de la carga y la energía. Así, Kirchhoff establece lo siguiente:

Primera ley (Ley de corrientes): Establece que la corriente total que entra en la unión de dos o más ramas en un circuito es igual a la corriente que sale de dicha unión. Esto se enuncia como: "La suma de las corrientes que entran a un nodo (corriente total de entrada) es igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo (corriente total de salida)".[11]

$$\sum_{k=1}^{n}(\boldsymbol{I_k}) = \mathbf{0}$$

Donde $\boldsymbol{I_k}$ representa las corrientes que entran y salen del nodo, con signos positivos para las que entran y negativos para las que salen.

Segunda ley (Ley de voltajes): Establece que, dentro de una trayectoria cerrada, o un lazo, la suma algebraica de las caídas de voltaje es igual a cero. Esto se enuncia como: "En un circuito, la suma de todas las caídas de voltaje localizadas en una trayectoria cerrada única es igual a la suma de los voltajes de las fuentes en dicha espira".[11]

$$\sum_{k=1}^{n}(\boldsymbol{V_k}) = \mathbf{0}$$

Donde $\boldsymbol{V_k}$ representa los voltajes en cada elemento del lazo, con signos positivos para caídas de voltaje y negativos para aumentos de voltaje debidos a fuentes.

Divisor de Voltajes

El divisor de voltaje consiste simplemente en un circuito cerrado en el que un grupo de resistencias se encuentran conectadas en serie a una fuente de voltaje. De esta manera, por la ley de Ohm, el voltaje suministrado se reparte entre cada uno de los elementos que conforman el circuito. De igual manera, al ser un circuito cerrado, se cumple la segunda ley de Kirchhoff. Basado en estos dos principios, se puede establecer una ecuación que describa el voltaje que circula por cada uno de estos elementos, que es:

$$\boldsymbol{v_i} = \left(\frac{\boldsymbol{R_i}}{\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{R_i}}\right)\boldsymbol{v}$$

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación de muestras

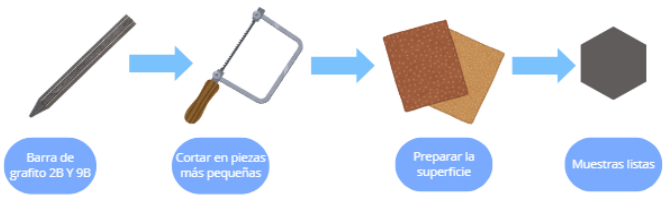


Figura 1. Procedimiento de obtención de muestras.

Los materiales fueron seleccionados según el porcentaje de grafito en su composición: el 2B tiene un 74%, y el 9B tiene un 90% de grafito [7], ambos son grafitos obtenidos de manera comercial de la marca LYRA. Se corta la barra de grafito en muestras más pequeñas con una sierra. Las muestras tienen una forma hexagonal, con un área de 1.44 cm² y 2.4 $\pm$0.2 cm de grosor. Para acondicionar la superficie de la muestra, se lija cada cara del grafito. Dicho procedimiento puede ser observado en **figura 1**.

Caracterización eléctrica

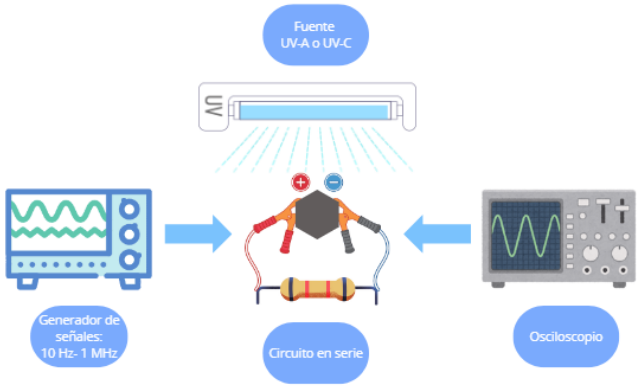


Figura 2. Instrumentación para caracterización eléctrica.

La instrumentación diseñada para la caracterización se basó en un circuito en serie conectado a un generador de señales que inducía frecuencias al circuito, asegurando que siempre mantenga un 1 V de voltaje. El circuito consistía de una resistencia testigo de 2.2 Ω o 5.6 Ω conectada a una muestra. Se calcularon el valor de estas resistencias equivalentes utilizando la ley de Kirchhof. La fuente de alimentación del generador de frecuencia y el osciloscopio estaban conectados en serie.Se registra el cambio en el voltaje de la muestra a una frecuencia establecida, para después ser irradiada durante un minuto con luz UV de 368 nm y 2.7 mW de potencia, y se registra nuevamente la respuesta eléctrica. Luego, se cambia la frecuencia y se repite el proceso. Se siguió el mismo procedimiento con la fuente UV-C.

RESULTADO

UV-C: En la **figura 3** se muestra la caracterización eléctrica del grafito 9B con las resistencias testigos utilizadas. Se observa que el voltaje aumenta junto con la frecuencia, independientemente de la resistencia utilizada.

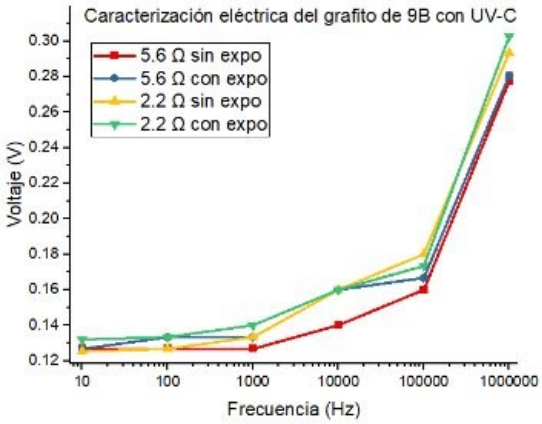


Figura 3. Caracterización eléctrica del grafito 9B con la resistencia de 2.2 Ω y con 5.6 Ω, voltaje del material con y sin exposición a fuente UV-C.

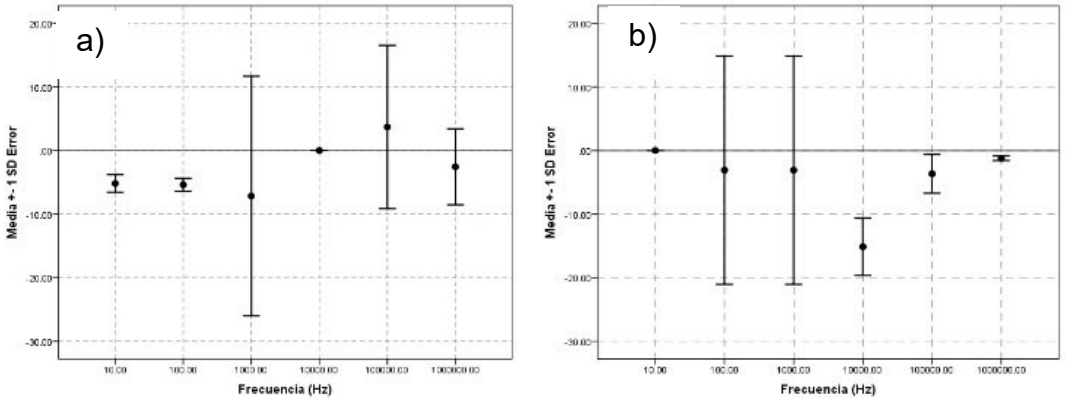


Figura 4. a) Desviación estándar de la caracterización eléctrica 9B UV-C con la resistencia de 2.2 Ω y **b)**5.6Ω.

La desviación estándar (**Figura 4**) en su eje vertical representa el error en la medición, mientras que el eje horizontal señala la frecuencia que el generador está pasando a través del material. Cada punto en el gráfico representa la sensibilidad del material a la exposición. La línea que cruza por el cero actúa como referencia: si un punto se encuentra por debajo de esta referencia, el material es más sensible sin la exposición que con ella a esas frecuencias. Si el punto está por encima de la referencia, el material es sensible al cambio en su estructura debido a la exposición a esa frecuencia precisa. En este estudio, nos interesan especialmente estos últimos puntos. En el caso del grafito 9B expuesto a UV-C, mostrado en la **Figura 4(a)**, se puede observar un punto de interés en la resistencia de 2.2 Ω, que indica sensibilidad a la exposición a una frecuencia de 100 KHz.

UV-A: En la **figura 5** se muestra la caracterización eléctrica del grafito 9B con sus resistencias testigos correspondientes.

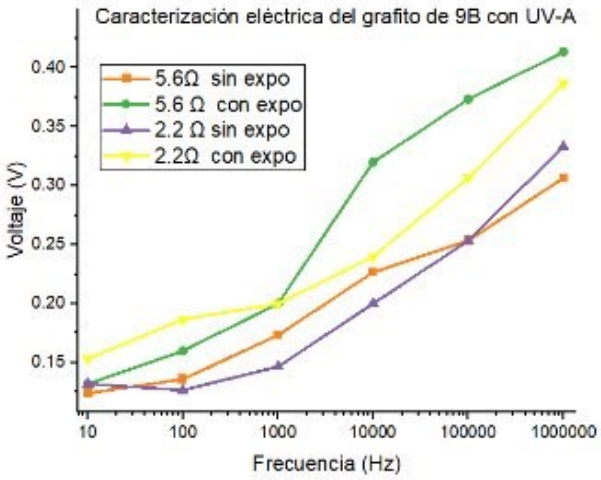


Figura 5. Caracterización eléctrica del grafito 9B con la resistencia de 2.2 Ω y con 5.6 Ω, voltaje del material con y sin exposición a fuente UV-A.

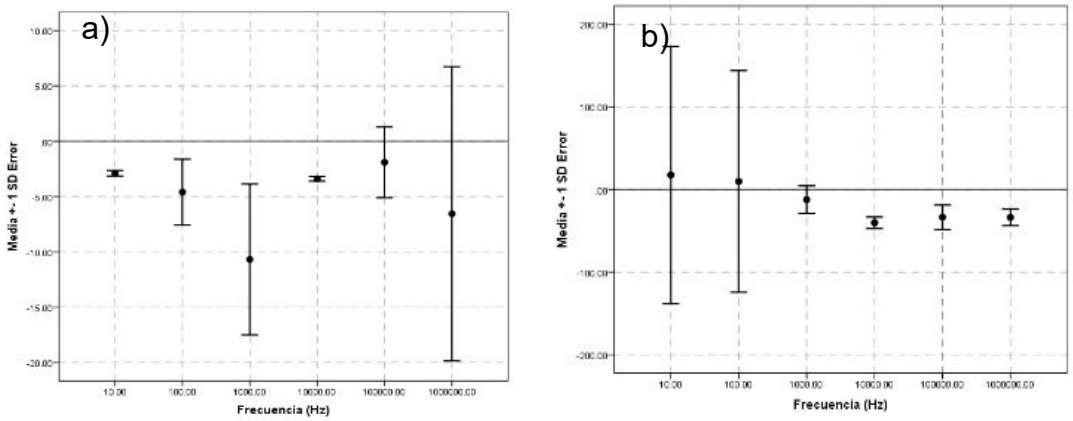


Figura 6. a) Desviación estándar de la caracterización eléctrica 9B UV-A con la resistencia de 2.2 Ω y **b)**5.6Ω.

Para el caso del grafito 9B expuesto a UV-A, como se observa en la **Figura 6 (b)** parece presentar sensibilidad a la exposición a las frecuencias de 10 y 100 Hz con la resistencia de 5.6 Ω, aunque también hay mayor error.

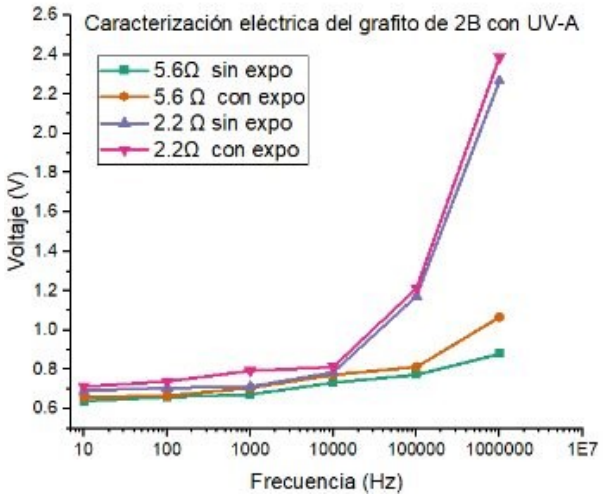


Figura 7. Caracterización eléctrica del grafito 2B con la resistencia de 2.2 Ω y con 5.6 Ω, voltaje del material con y sin exposición a fuente UV-A.

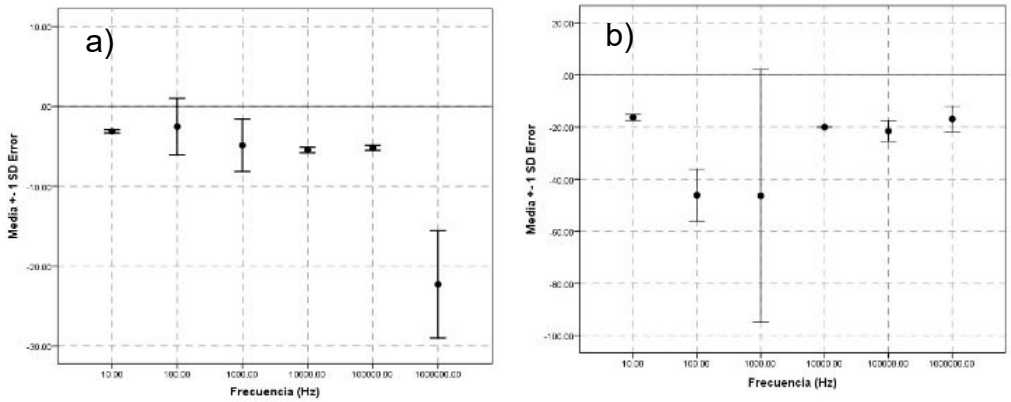


Figura 8. a) Desviación estándar de la caracterización eléctrica 2B UV-A con la resistencia de 2.2 Ω y **b)**5.6Ω.

En cambio, para el grafito 2B con la fuente de UV-A parece no presentar ningún punto de sensibilidad a exposición como se muestra en la **Figura 8**. Sin embargo, si se presentan más frecuencias en las que el material es más sensible sin la exposición.

CONCLUSIONES

Aunque el material presenta ciertos puntos de sensibilidad a determinadas frecuencias, incluyendo un punto general sin exposición a 10 Hz, y excepto para el grafito 9B expuesto a UV-A con una resistencia de 5.6 Ω, que sí muestra sensibilidad a la exposición, las barras de error son lo suficientemente amplias como para que ninguna de estas mediciones resulte significativa. El comportamiento de las muestras tiene dependencia en la fuente. Se recomienda un cambio en la instrumentación y un aumento en las mediciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. ICRP guidance for occupational exposure—radiation emergency medical management. (n.d.). Hhs.gov. https://remm.hhs.gov/ICRPguidelines.htm. Accessed 25 Aug 2023

2. Salazar, M. A. & Proxtronics / Asesoría Integral en Dosimetría Termoluminiscente S.A de C.V (Eds.). (2006). La Dosimetria Personal en México. Primer Congreso Americano del IRPA 2006 /FXXIV Reunión Anual de la SMSR y XVII Congreso Anual de la SNM.

3. Información básica sobre la radiación | US EPA. (2024, 3 mayo). US EPA. https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion

4. ¿Qué es la radiación? (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion

5. Seguridad ante el sol del verano. (2023, 3 julio). Centers For Disease Control And Prevention. https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html

6. Andisco, D., Blanco, S., & Buzzi, A. E. (2014). Dosimetría en radiología. *Revista argentina de radiología*, *78*(2), 114-117.

7. Attix, F. H. (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Wiley-VCH.

8. Los grados de dureza de los lápices de grafito. (s. f.). https://papeleria-tecnica.net/graduacion-dureza-lapices-grafito/

9. Roy, A. (2024, 1 enero). Graphite Structure, Characteristics: 31 Complete Quick Facts - LAMBDAGEEKS. Lambda Geeks. https://es.lambdageeks.com/graphite-structure/

10. Soto, D. E. C. (2015). Síntesis de materiales termoluminiscentes.

11. THOMAS, F. (2007). *Principios de circuitos eléctronicos*. Pearson Educación.

ESTUDIO COMPARATIVO DE HUESO CORTICAL VS. MATERIAL COMPUESTO EN TENSIÓN Y COMPRESIÓN UTILIZANDO INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA DIGITAL

Jesús Javier Padilla Heredia, Manuel Humberto De la Torre Ibarra, Juan Margarito Sarabia Torres, Claudio Frausto Reyes

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C – Unidad Aguascalientes.
javierph@cio.mx.

RESUMEN

Cuando una persona sufre daños irreparables en el sistema óseo debido a enfermedades o traumas que generan la destrucción parcial de dicho sistema, surge la necesidad del uso de prótesis. Los dispositivos protésicos, o simplemente prótesis, son fabricadas de manera tradicional a partir de metales (titanio, acero, tantalio, etc) que presentan alta resistencia a la fractura, pero un costo y peso elevado. Debido a lo anterior, se ha optado por la transición hacia materiales compuestos de polímeros que presenten la ventaja de un peso menor y un costo accesible. El uso de materiales compuestos en prótesis ha permitido el desarrollo de mejores y modernos dispositivos protésicos por su bajo peso y alta resistencia. Sin embargo, presentan baja resistencia a la fractura, esfuerzo cortante y la deformación. De esta manera, el desarrollo y mejora de materiales compuestos que sean utilizados como prótesis llega a construir un área prioritaria de investigación con puntos de repercusión médico, social y económico.

En el desarrollo de materiales compuestos, se prepararon diferentes combinaciones de material compuesto según su relación de matriz polimérica con partículas de refuerzo y se compararon con muestras de hueso cortical bovino, debido a que este tipo de hueso tiene la mayor similitud con el hueso cortical humano. Se diseñó, se desarrolló y se programó un prototipo de máquina de tensión-compresión para llevar a cabo el estudio comparativo entre hueso cortical y material compuesto. El prototipo fue diseñado para ejercer hasta 500 kg, en tensión o compresión, logrando detectar cambios en decenas de gramos durante la aplicación de la carga sobre las muestras. El estudio comparativo fue realizado por medio una técnica óptica no destructiva la cual es capaz de medir deformaciones en el orden de micrómetros utilizando una fuente de luz coherente como lo es un láser, dicha técnica se basa en la comparación de un holograma del objeto en estado de referencia contra un holograma grabado una vez que sucedió la deformación. La técnica se denomina Interferometría Holográfica Digital (DHI por sus siglas en inglés). Utilizando DHI fue posible analizar las muestras de material compuesto y hueso de forma remota, en tiempo real y en campo completo para identificar la carga en la cual comienza la fractura en las muestras al ser evaluadas en condiciones de tensión o compresión ejercidas por el prototipo desarrollado para el presente trabajo. Se logró obtener curvas de caracterización mecánica encontrando la proporción de matriz polimérica con partículas de refuerzo que presentan una respuesta mecánica similar a la de hueso cortical porcino.

INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la población mundial el número de personas que sufren daños en el sistema óseo debido a enfermedades o traumas en los que ocurre la destrucción parcial de dicho sistema, ha ido en aumento. Se ha solucionado esta problemática utilizando implantes de tejido autólogo sano, o bien, implantes de tejido humano donado. Sin embargo, existen desventajas como lo son el riesgo de infección, suministración de inmuno depresores, imposibilidad de extraer suficiente cantidad de hueso, así como los aspectos legales.

Cuando el daño en el sistema óseo no puede ser solucionado, se llevan a cabo prótesis en donde se ha encontrado que metales como el titanio, tantalio y acero presentan alta resistencia a la fractura, sin embargo, presentan desventajas por su alto peso y un costo elevado. Se ha intentado la transición de materiales metálicos a materiales compuestos de polímeros, sin embargo, estos materiales presentan baja resistencia a la fractura y a la deformación. Siendo así que el desarrollo y

aplicación de materiales diversos para ser utilizados como implantes o prótesis llega a construir un área prioritaria de investigación con puntos de repercusión médico, social y económico [1,2] .

Resulta importante el desarrollo de nuevos materiales compuestos que presenten una respuesta mecánica comparable a la de un hueso. En este trabajo se emplea hueso cortical porcino por ser phantom al de un ser humano como valor de referencia. Se prepararán muestras de hueso cortical, así como de composite que simulen su respuesta mecánica.

TEORÍA

Pruebas ópticas no destructivas

Las pruebas ópticas no destructivas, como la interferometría holográfica digital (DHI) e interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI), permiten obtener información sobre la deformación del objeto sin dañarlo. Caracterizan desplazamientos, deformaciones, vibraciones, esfuerzos y fracturas. Dentro de las ventajas sobresalientes de dichas técnicas es que los resultados obtenidos dan información sobre toda la superficie del objeto, y no solo en puntos aislados [3].

Interferometría holográfica digital (DHI)

DHI brinda la posibilidad de analizar las muestras de manera remota, en tiempo real y en campo completo. Posee una alta sensibilidad capaz de registrar deformaciones rápidas con el uso de una cámara rápida. Graba el patrón de interferencia a través de un holograma de imagen que tiene la superposición de los frentes de onda del objeto y de la referencia. El uso de un holograma imagen permite capturar la amplitud del frente de onda del objeto (intensidad) así como su fase. DHI es una técnica de doble exposición que necesita adquirir un par de hologramas de imagen mediante una cámara digital (CCD o CMOS). El primer holograma corresponde a un estado inicial en cualquier momento del tiempo, mientras que el segundo holograma es en un estado deformado del objeto y que se desea comparar.

DHI utiliza una portadora de frecuencia espacial para obtener la fase óptica (medición de deformación mecánica) y así evitar el uso de técnicas de recuperación de fase como corrimiento, que pueden implicar el uso de partes móviles dentro del sistema óptico. Una vez registrados los hologramas, se obtiene la diferencia de fase relativa por medio de la transformada de Fourier, lo cual permite observar la fase envuelta en tiempo real [4].

DHI fuera del plano

Un interferómetro fuera del plano tiene su máxima sensibilidad a desplazamientos que se produzcan en el eje óptico, es decir, perpendiculares a la superficie del objeto [4]. La configuración básica de un sistema DHI fuera del plano se presenta en la figura 1.

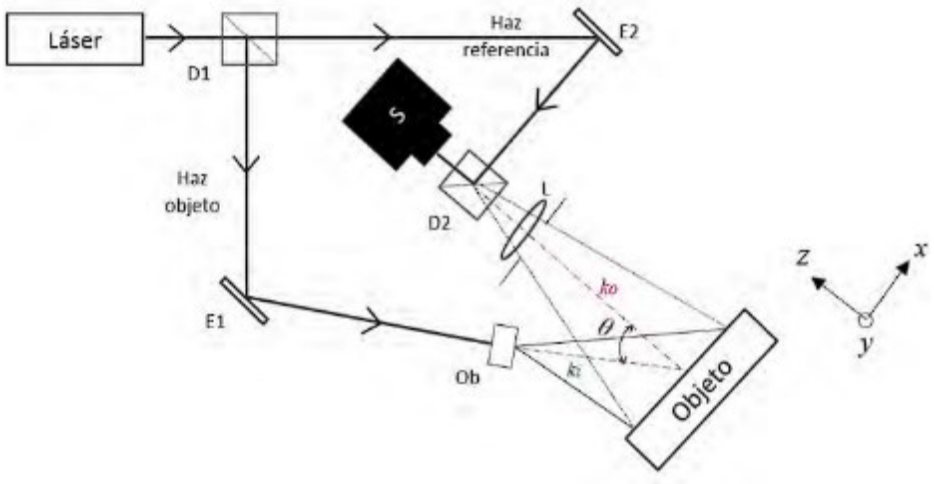


Figura 1. Diagrama de interferómetro DHI fuera del plano.

De la figura 1, se utiliza un haz de luz laser que es dividido por un divisor de haz (D1) en dos haces: Haz de referencia y Haz objeto. El haz objeto se dirige hacia el espejo (E1), que al pasar por un objetivo de microscopio (Ob) se expande en la superficie de la muestra a un ángulo (θ), la luz esparcida por la muestra pasa por una lente con pupila (L) y llega al cubo combinador (D2). Mientras que el haz de referencia se dirige al espejo (E2) que lo refleja a D2 el cual junta ambos haces de luz y los dirige al sensor(S).

La interferencia de los haces objeto y referencia cuando son correlacionados con un segundo holograma de imagen pueden recuperar el desplazamiento del objeto. Esta comparación da como resultado franjas de interferencia las cuales se pueden analizar posteriormente. Las franjas de interferencia se manifiestan como líneas de ancho definido, que varían en intensidad desde un máximo hasta cero .Y por medio de un algoritmo de Fourier se puede obtener la fase óptica envuelta que permite obtener los mapas de desplazamiento [3].

Pruebas mecánicas de compresión y tensión

El comportamiento mecánico de un material está determinado por la relación entre el esfuerzo y la deformación. La alteración de las dimensiones de una muestra, resultado de la tensión aplicada, se le denomina deformación. Mientras que, la fuerza que actúa sobre el área unitaria se le denomina esfuerzo. Utilizando una maquina universal se puede obtener el diagrama de esfuerzo-deformación unitario.

Dependiendo de las características de la maquina universal, este diagrama se puede obtener en uno o dos pasos. Cuando la maquina solo registra la fuerza aplicada, se calcula el esfuerzo ($\boldsymbol{\sigma}$), que es la fuerza (F) actuando por unidad de área (A):

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{A}} \tag{1}$$

Usando el módulo de elasticidad del material y la ley de Hooke, se calcula la deformación (ε) que es el cambio en la forma como consecuencia de la tensión aplicada [4].

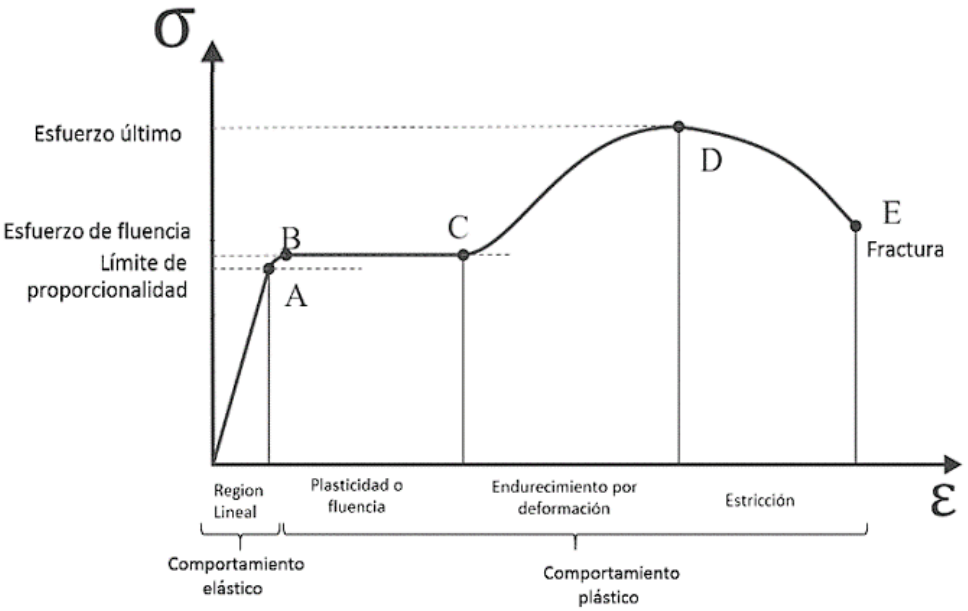


Figura 2. Diagrama esfuerzo vs. deformación unitarios.

De esta grafica se pueden determinar varios parámetros del material o el tipo de comportamiento mecánico que posee. Siendo ejemplo, materiales suaves, blandos, rígidos, etc.

DHI en pruebas mecánicas

Se ha utilizado la técnica DHI fuera del plano en pruebas de compresión para analizar las afectaciones en hueso cortical bovino debido a la degradación de sus componentes orgánicos e inorgánicos. También se ha hecho uso de la técnica DHI junto con tomografía de coherencia óptica de dominio de Fourier (FD-OCT) para analizar la deformación del hueso cortical bajo compresión para obtener información del desplazamiento y deformaciones a diferentes profundidades [5,6,7].

PARTE EXPERIMENTAL

Se diseñó y desarrolló una máquina de ensayos de capacidad de hasta 1,000 kgf en compresión y tensión que pueda ser monitoreada durante las pruebas con DHI, el esquemático de la máquina se muestra en la figura 3

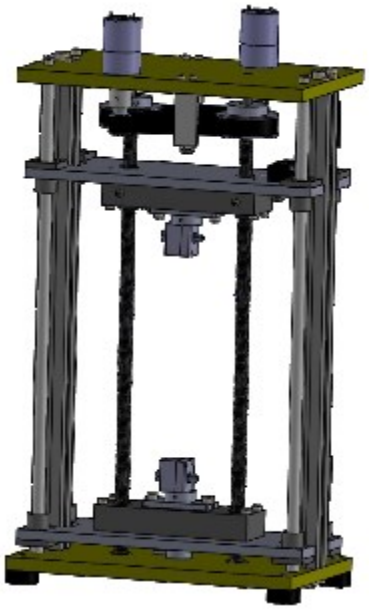
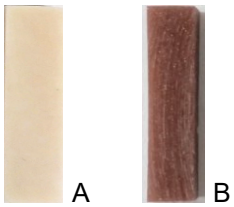


Figura 3. Máquina de ensayo desarrollada

El objeto bajo estudio fue hueso cortical bovino y material compuesto. El hueso femoral bovino se seccionó en probetas con geometría prismática de 5x5x30 mm para las pruebas de compresión. En el caso del material compuesto, se generaron prismas de las mismas dimensiones a partir de polimetilmetacrilato (PMMA) con partículas de cobre como refuerzo, en la figura 4 se muestran las probetas de hueso y PMMA con cobre.



A B

Figura 4. A: Probeta de hueso cortical B: Probeta de PMMA con partículas de cobre

Una vez elaboradas las probetas, se sometieron a pruebas de compresión en la máquina de ensayos diseñada. Las pruebas de compresión se monitorearon con un arreglo óptico DHI para conocer las

deformaciones de las probetas fuera del plano con respecto al eje en que se ejerce la fuerza de compresión. El arreglo óptico se presenta en la figura 5.

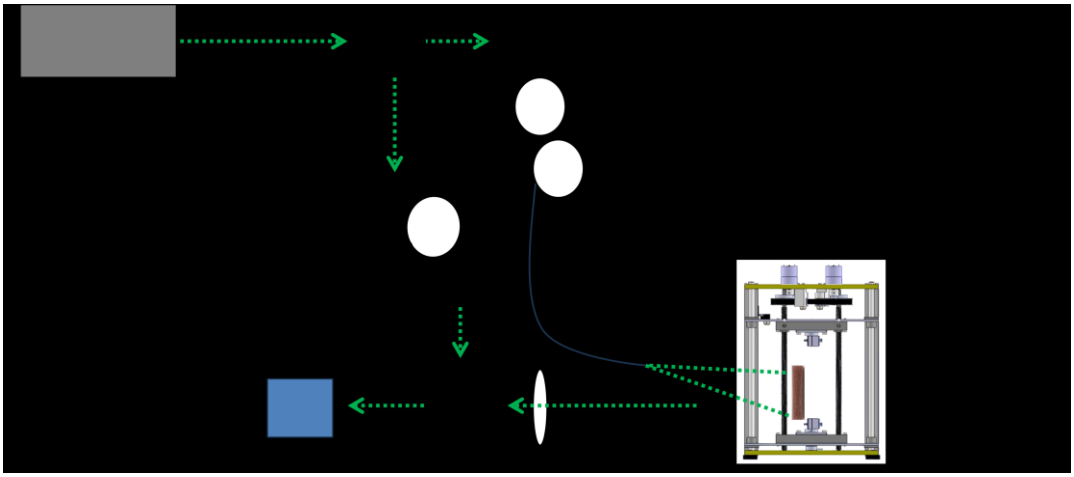


Figura 5. Vista esquemática del arreglo DHI.

RESULTADOS

La máquina de ensayo diseñada y desarrollada es capaz de aplicar una carga con un incremento implementando un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) para controlar la potencia (PWM) aplicada por parte de los motores a partir del error determinado. Además de controlar el PWM, también se controla la variable del tiempo de acción de los motores (τ) a partir del error determinado. Observar figura 6.

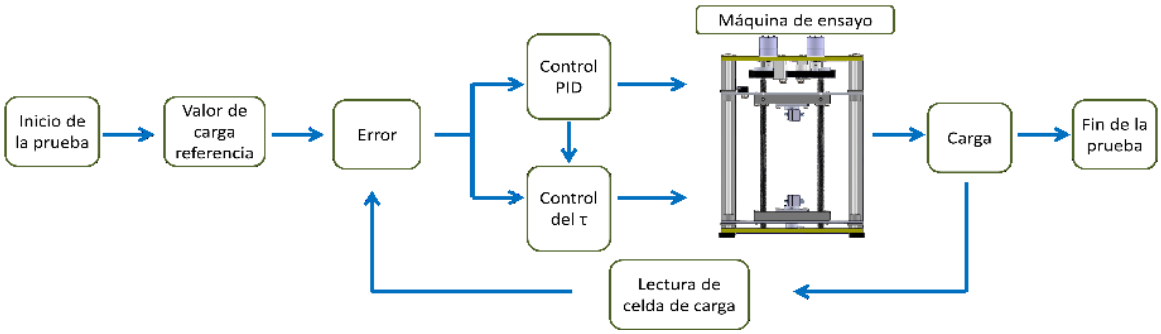


Figura 6. Diagrama de flujo del funcionamiento de la máquina de ensayo

Se realizaron pruebas de compresión en hueso (C) y composite con cobre (Cu) para determinar el valor de carga en donde se genera su fractura, figura 7.

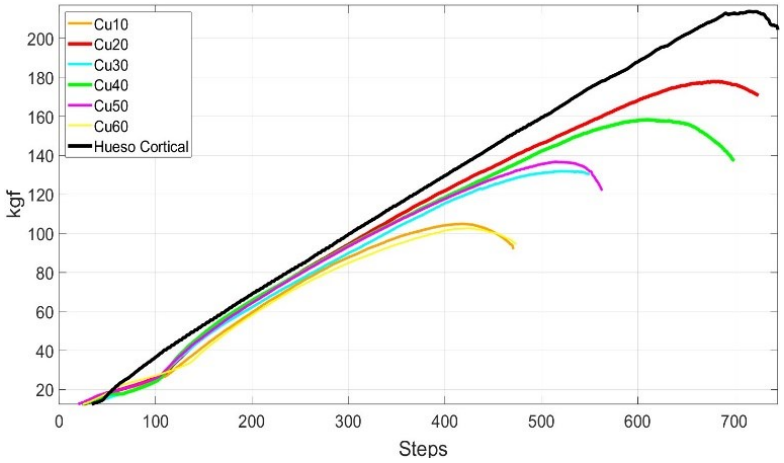


Figura 7. Grafica de carga para Hueso cortical y Composite con diferente concentración de Cu.

A la par, se logró observar la deformación a partir del patrón de franjas de interferencia y los mapas de fase al inicio de la prueba, a la mitad y al finalizar la prueba (fractura del material), figura 8.

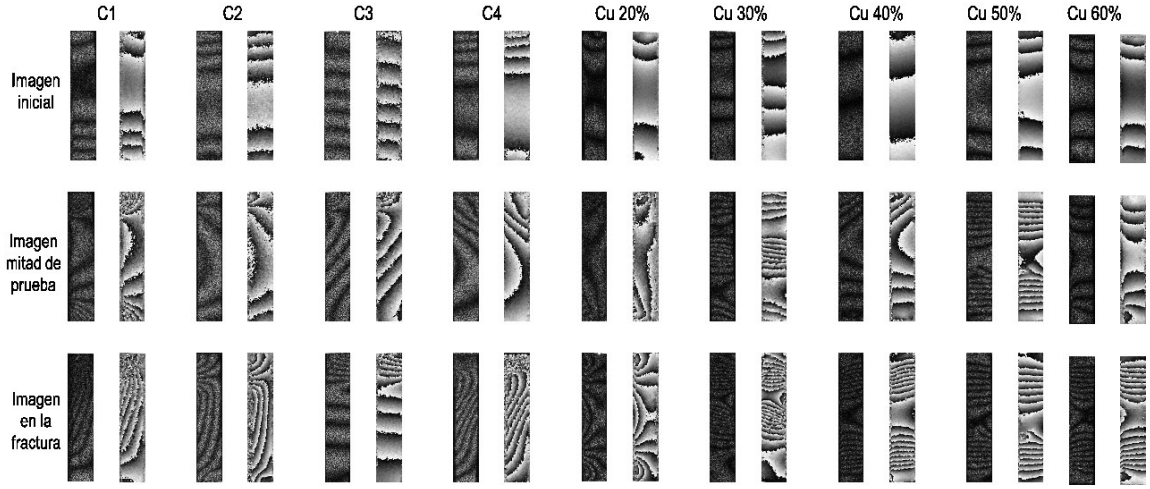


Figura 8. Mapas de franjas y fase óptica

CONCLUSIONES

La máquina de ensayo diseñada y desarrollada es capaz de ejercer una carga lineal a las muestras de hueso y composite. Siendo posible monitorear la prueba utilizando Interferometría Holográfica digital al inicio, durante la generación de la fractura y al momento de la fractura. Se obtuvieron las gráficas de carga, así como los mapas de franjas y fase óptica para realizar la comparativa mecánica entre hueso cortical y composite.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hernández, M . et al. “Tendencias en el desarrollo de matrices compuestas para reparación ósea”. [Memorias Convención Internacional de Salud Pública]. 2012. Cuba Salud. ISBN 978-959-212-811-8.
2. M. S. Scholz, et al. “The use of composite materials in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: A review”. Composites Science and Technology. Vol 71, 2011, pp. 1971-1803.
3. Mendoza, F. “Pruebas ópticas no destructivas. “Academia Mexicana de Ciencias. Ciencia, vol. 54 núm. 4. 2003. octubre-diciembre.
4. González, M. “Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas”. 2017. [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.].
5. Tavera,C. et al.. “Cortical bone quality affectations and their strength impact analysis using holographic interferometry.” BIOMEDICAL OPTICS EXPRESS. Vol 9, 2018, No. 10.
6. De la Torre, M. et al. “Concurrent optical inspection to boost characterization of plastic cortical bone under mechanical deformation”. Applied optics. Vol.62, 2023, No.6.
7. M. De la Torre, et al. “Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: A review”. Optics and Lasers in Engineering. Vol 87, 2016, pp. 32-58.

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS EMPLEANDO REDES NEURONALES

José Carlos García Vélez[1], José Joel Rodríguez Argüello[1], Dalyndha Aztatzi Pluma[1], Jesús Norberto Guerrero Tavares[1], Jesús Ignacio Castro Salazar[1], Gerardo Vázquez Guzmán[2]

[1]Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, [2]Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato.

dalyndha.ap@abasolo.tecnm.mx.

RESUMEN

La agricultura es una de las principales actividades económicas en México, a lo largo de los años su demanda ha incrementado debido a que la población aumenta. La implementación de nuevas tecnologías ha permitido incrementar la calidad de los productos y disminuir los costos de producción. En los últimos años, el aprendizaje profundo con redes neuronales ha sido implementado en diversos sectores debido a su capacidad para procesar con alta exactitud datos complejos. Estas técnicas se han empleado para desarrollar sistemas más eficientes para identificar y clasificar imágenes, como en la agricultura. En esta área se ha empleado para diagnosticar de forma automática la calidad de los cultivos y, subsecuentemente implementar estrategias y/o procedimientos que incrementen la producción de este sector. Las redes convolucionales (CNN por sus siglas en inglés) han sido empleadas para detectar plagas en cultivos agrícolas, obteniendo hasta un 96% de exactitud; sin embargo, su aplicación en tiempo real aún tiene grandes limitantes.

Con el objetivo de desarrollar una estrategia más robusta y que el modelo neuronal que se obtenga sea capaz de emplearse en tiempo real con diversos enfoques dentro de la agricultura, este trabajo se centra en implementar redes neuronales para el reconocimiento de cultivos agrícolas. Para ello, se entrenó una CNN pre-entrenada (VGG19) cuya capa final fue modificada para reconocer 8 tipos de cultivos típicos de la región de Guanajuato: agave, trigo, maíz, jitomate, cebolla, zanahoria, brócoli y lechuga. Los pesos sinápticos fueron modificados empleando el optimizador “Adam”, para medir el desempeño de la red neuronal se empleó la función de costo entropía cruza y la métrica para medir el desempeño de la red es la exactitud. Se generó un banco de imágenes de 4950 imágenes de las cuales el 79% son empleadas para el entrenamiento de la red neuronal, 19% para validación y el 2% para prueba. Se obtuvo una exactitud de alrededor del 99% y errores de 0.001% en las tres etapas, lo que nos indica que el modelo puede ser empleado para el reconocimiento de los cultivos mencionados. Posteriormente, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) en línea, en la cual el modelo entrenado se implementa para realizar reconocimiento de los cultivos en tiempo real o bien, a partir de imágenes. Además, si el modelo no es capaz de reconocer la imagen esta se almacena para incrementar la base de datos de imágenes y posteriormente, volver a entrenar la red neuronal, de tal manera que la exactitud ha incrementado en tiempo real.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las principales actividades económicas en México, a lo largo de los años, la demanda de productos provenientes de esta actividad económica ha crecido debido al incremento de la población. La implementación de nuevas tecnologías ha permitido incrementar la calidad de los productos y disminuir los costos de producción. En los últimos años, el aprendizaje profundo con redes neuronales ha sido implementado en diversos sectores debido a su capacidad para procesar con alta exactitud datos complejos. Estas técnicas se han empleado en la agricultura para desarrollar sistemas más eficientes capaces de identificar y clasificar imágenes para un propósito en particular. En esta área se ha empleado para diagnosticar de forma automática la calidad de los cultivos y, subsecuentemente implementar estrategias y/o procedimientos que incrementen la producción de este sector [1]. Las redes convolucionales han sido empleadas para detectar plagas en cultivos agrícolas, obteniendo hasta un 96% de exactitud; sin embargo, su aplicación en tiempo real aún tiene grandes limitantes.

En este trabajo, se desarrolló una interfaz gráfica que aproveche las capacidades de las redes neuronales para identificar cultivos agrícolas de manera automatizada. Esta herramienta no solo simplifica la identificación de cultivos, sino que también ofrece información valiosa para la toma de decisiones en la gestión agrícola.
Al integrar el aprendizaje automático, la interfaz tendrá la capacidad de mejorar su precisión con el tiempo, adaptándose a las variaciones en las condiciones del campo y ofreciendo recomendaciones cada vez más precisas. Además, al facilitar la identificación de cultivos, esta tecnología puede contribuir a optimizar prácticas agrícolas, mejorar la gestión de recursos y aumentar la eficiencia en la producción de alimentos.

Este estudio se basa en el reconocimiento de los avances en inteligencia artificial aplicada a la agricultura y la investigación previa en el campo del reconocimiento de imágenes. Se espera que los resultados obtenidos impulsen el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras para el sector agrícola, promoviendo una agricultura más inteligente y sostenible en beneficio de la sociedad.

TEORÍA

Marvin Minsky, definió a la Inteligencia Artificial (IA) como: “la ciencia de construir máquinas para que hagan cosas que, si las hicieran los humanos, requerirían inteligencia”. [2] La IA ha revolucionado numerosos campos, y el reconocimiento de imágenes no es la excepción. Por ejemplo, existen sistemas capaces de reconocer y rastrear objetos y personas en imágenes y/o videos en tiempo real. Dentro del IA, la capacidad de las redes neuronales para analizar y clasificar información visual ha abierto un camino para aplicaciones innovadoras en el área de la agricultura, a fin de optimizar los procesos agrícolas. [3]

De forma específica, la clasificación y/o reconocimiento de los diferentes tipos de cultivos por especie es uno de los sistemas de clasificación más utilizado por agencias estatales relacionadas con el sector agrícola, esto con el objetivo de llevar un mejor intercambio de datos, intercambio de productos y comparativas estadísticas con otros sectores del país; de esta manera, muchos países utilizan este método de monitoreo de sus productores agrícolas internos. Por lo que la implementación de inteligencia artificial en este sector es relevante. Las redes neuronales artificiales son una gran herramienta para resolver problemas de clasificación.

Redes Neuronales Convolucionales Profundas

Las redes neuronales convolucionales son un tipo de redes neuronales efectivas que ayudan a las tareas de la visión artificial, como la clasificación y segmentación de imágenes entre otras aplicaciones. Estas consisten en múltiples capas de filtros convolucionales de una o más dimensiones, después de cada capa generalmente se añade una función que realiza un mapeo no lineal. Dentro de esta área, existen las Redes Neuronales Convolucionales Profundas (Deep Convolutional Neural Networks o DCNN) son variantes avanzadas de las redes neuronales convolucionales (CNN) diseñadas para abordar tareas más complejas y aprender representaciones más profundas y abstractas de los datos de entrada.

Las redes neuronales profundas suelen tener una estructura compleja de capas ocultas con una gran variedad de capas diferentes, como una capa convolucional, una capa de max-pooling, una capa densa y otras capas únicas. Estas capas adicionales ayudan al modelo a comprender mejor los problemas y a proporcionar soluciones óptimas a proyectos complejos. Una red neuronal profunda tiene más capas (más profundidad) que una CNN y cada capa añade complejidad al modelo, al mismo tiempo que permite a dicho modelo procesar las entradas de forma concisa para proporcionar la solución ideal.
Estas DCNN han sido entrenadas con algunos casos de estudios, son redes con un alto grado de complejidad y han sido validadas. Algunas de ellas son: LeNet, GoogLeNet, AlexNet, VGGNet, entre otras. Estos modelos de redes neuronales entrenadas han sido empleadas para entrenarse con otros datos y se ha observado que arrojan mayor exactitud. Esto se debe a la transferencia de aprendizaje, este es un tipo de aprendizaje automático en el que un modelo obtenido al resolver un problema se

aplica para resolver otro problema distinto pero relacionado. Este trabajo se centrará en las VGGNet, la cual fue desarrollada para aumentar la profundidad de la CNNs con el fin de incrementar el rendimiento y es aplicada al reconocimiento facial y clasificación de imágenes. Dentro de la VGGNet, existen dos modelos el VGG-16 y VGG-19, donde el número se refiere al número de capas con pesos sinápticos que tiene cada red (las convolucionales y las densas, las de pooling no se cuentan). En la Figura 1 se muestra la arquitectura del modelo VGG-19, Simonyan y Zisserman de la Universidad de Oxford crearon una CNN de 19 capas (16 convolucionales, 3 completamente conectadas) que utilizaba estrictamente filtros de 3×3 y paso de 1, junto con capas de agrupación máxima (max pooling) de 2×2 con paso de 2. Para reducir la cantidad de parámetros en redes tan profundas, se utilizan pequeños filtros de 3 × 3 en todas las capas convolucionales y se utiliza mejor con su tasa de error del 7.3%. El modelo VGG-19, con un total de 138 millones de parámetros, está entrenado en más de un millón de imágenes y puede clasificar imágenes en 1000 categorías de objetos, por ejemplo, teclado, mouse, lápiz y muchos animales. Como resultado, el modelo ha aprendido representaciones de características ricas para una amplia gama de imágenes.

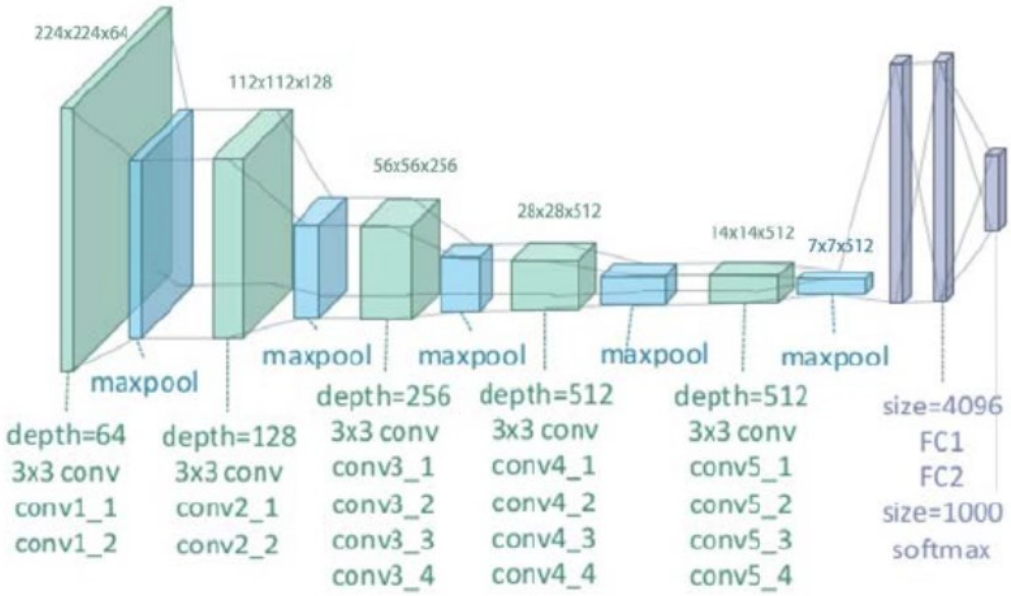


Figura 1. Imagen de la arquitectura de red neuronal convolucional profunda del modelo VGG-19, donde FC significa completamente conectada [4].

El uso de las DCNN para resolver problemas de clasificación ha tenido un gran auge debido al desarrollo tecnológico y las herramientas que han surgido, como Python. El lenguaje de programación que se uso fue Python, siendo un lenguaje con amplias aplicaciones, pero especialmente la aplicación del Aprendizaje Profundo, y que además es un lenguaje de programación de código abierto y amigable con el usuario. A continuación, se describen algunas librerías relevantes para la implementación las DCNNs:

-*Numpy,* encargada de generar arreglos (Arrays) multidimensionales y su manipulación.
-*TensorFlow,* permite construir y entrenar las redes neuronales para detectar patrones y razonamientos usados por los humanos.
-*Keras,* es la biblioteca de red neuronal profunda de Python contando con un eficiente soporte de procesamiento de datos y su visualización.
-Matplotlib es la librería encargada de generar gráficas y desplegar las imágenes.[5]
El desarrollo tecnológico ha permitido desarrollar interfaces gráficas funcionales con alto poder de respuesta, es decir una interfaz gráfica que tenga un motor de búsqueda/identificación basado redes neuronales profundas. Para la interfaz gráfica se emplearon los siguientes programas:

-*JavaScript*, s un lenguaje de programación ligero, interpretado, o compilado justo-a-tiempo (just-in-time) con funciones de primera clase.
-*Librería CSS*, es utilizado para describir la presentación de documentos HTML (y XML). Permite controlar el diseño, la apariencia y el formato de los elementos HTML en una página web. Con CSS, puedes definir estilos como colores, fuentes, márgenes, espaciado, alineación, tamaños, entre otros, para personalizar la apariencia de tu sitio web.
-*BOOTSTRAP,* es un popular framework de desarrollo frontend que facilita la creación de sitios web modernos y responsivos. Utiliza HTML, CSS y JavaScript para proporcionar una variedad de componentes y estilos predefinidos que puedes utilizar para diseñar y construir rápidamente interfaces de usuario atractivas y funcionales.

La base de datos es divida en 3 partes pertenecientes al entrenamiento, validación y prueba usando funciones de activación encargadas de devolver una salida a partir de un valor de entrada, normalmente es un conjunto de valores de salida en un rango determinado como (0,1) o (-1,1), buscando funciones que minimicen el costo computacional.

PARTE EXPERIMENTAL

En este estudio, se presenta una metodología integral para el reconocimiento y clasificación de cultivos agrícolas mediante el empleo de redes neuronales convolucionales profundas (DCNN) junto con el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) accesible a través de un navegador web. Un aspecto notable de este proyecto es la implementación de una arquitectura distribuida, donde el backend y el frontend de la interfaz se han desarrollado de forma independiente y se ejecutan en servidores diferentes, proporcionando así una mayor flexibilidad y escalabilidad al sistema. Esta combinación de técnicas permite la creación de un sistema interactivo y eficiente que facilita a los usuarios la consulta y utilización del modelo de la red neuronal entrenada para el reconocimiento de cultivos agrícolas. La metodología implementada en desarrolló de este proyecto para alcanzar los objetivos se describe a continuación:

- ✓ Se realiza la instalación del entorno de desarrollo para el modelo DCNN, para ello se realizó la instalación de Visual Studio para poder trabajar y desarrollar el código en el lenguaje de programación de Python.
- ✓ Progresivamente se realizan las instalaciones de los software y paquetes de librerías que se utilizaran.
- ✓ Se obtuvo una base de datos, la cual consistió en 612 imágenes de cada uno de los 8 tipos de cultivos seleccionados como casos de estudio (agave, trigo, maíz, jitomate, cebolla, zanahoria, brócoli y lechuga); todas las imágenes fueron etiquetas de forma consistente. Esta base de datos se obtuvo de la descarga de imágenes de internet, usando la extensión de Google Image dowloader y son almacenadas en carpetas para cada una de las especias, cabe mencionar que las imágenes fueron filtradas, para eliminar aquellas imágenes que tenían mucho ruido, como texto, entre otros.
- ✓ Posteriormente, se utilizó la siguiente división para cada una de las etapas del modelo, por lo que, para el entrenamiento se utilizó un 80% de las imágenes descargadas; para la validación el 20% de las imágenes descargadas y para la prueba del modelo, se utilizó un total de 39 imágenes.
- ✓ Se utilizaron técnicas como la generación de datos mediante ImageDataGenerator para el preprocesamiento y aumento de datos, así como la incorporación de capas densas (Flatten, Dense) para la clasificación final de las imágenes.

- ✓ Posteriormente, se realiza la implementación del modelo pre-entrenado VGG19 empleando el lenguaje de programación Python, se usaron diversas librerías de Python, incluyendo TensorFlow, Keras, Matplotlib y NumPy, entre otras.
- ✓ Para el entrenamiento y validación del modelo VGG-19 se implementa el optimizador "Adam" para medir el desempeño de la red neuronal. Además, se empleó la función de costo entropía cruza y la métrica para medir el desempeño de la red es la exactitud.
- ✓ Una vez entrenado y validado el modelo, se genera el entorno en donde se desarrolla la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) y los módulos que trabajan en conjunto como el Controlador de errores y de Base de datos. Esta fue desarrollada considerando un backend para una API que integra dos endpoints clave, diseñados para ofrecer una experiencia fluida y colaborativa a los usuarios.
- ✓ Después de esto se prepara el despliegue del Backend y por consiguiente se realiza la preparación del entorno de desarrollo del Frontend (una vez que se comienza a trabajar con el Frontend) se debe de codificar de igual manera, generar su estructura, darle una ubicación y someterlo a varias pruebas). Este backend, construido utilizando Flask en Python, aprovecha la versatilidad y eficiencia de estas tecnologías para proporcionar dos funcionalidades principales. El primero de estos endpoints permite a los usuarios enviar imágenes a través de una interfaz gráfica web, con el propósito de obtener predicciones sobre su contenido. Esta funcionalidad se apoya en el poder de las redes neuronales convolucionales, específicamente la arquitectura VGG19, conocida por su capacidad para reconocer patrones complejos en imágenes y generar predicciones precisas.
- ✓ El segundo endpoint está diseñado para recibir feedback de los usuarios, con el objetivo de mejorar la precisión de las predicciones en futuros entrenamientos. Esta retroalimentación proporcionada por los usuarios se integra en el proceso de entrenamiento del modelo, permitiendo una mejora continua en su capacidad para reconocer y clasificar imágenes de manera más precisa.
- ✓ Por último, se realiza el lanzamiento de la interfaz de usuario implementada con el modelo para la clasificación de cultivos.

RESULTADOS

Se entrenó al modelo de la red neuronal con 490 imágenes con sus respectivas etiquetas de cada uno de los 8 cultivos; así mismo se implementó una etapa de validación de los resultados, utilizando 91 imágenes de cada cultivo. En la Figura 2 se una muestra una imagen de cómo se generó la base de datos; se descargaron las imágenes de los cultivos, se etiquetaron y se dividió la información según lo descrito en la metodología para las etapas de entrenamiento, validación y prueba.

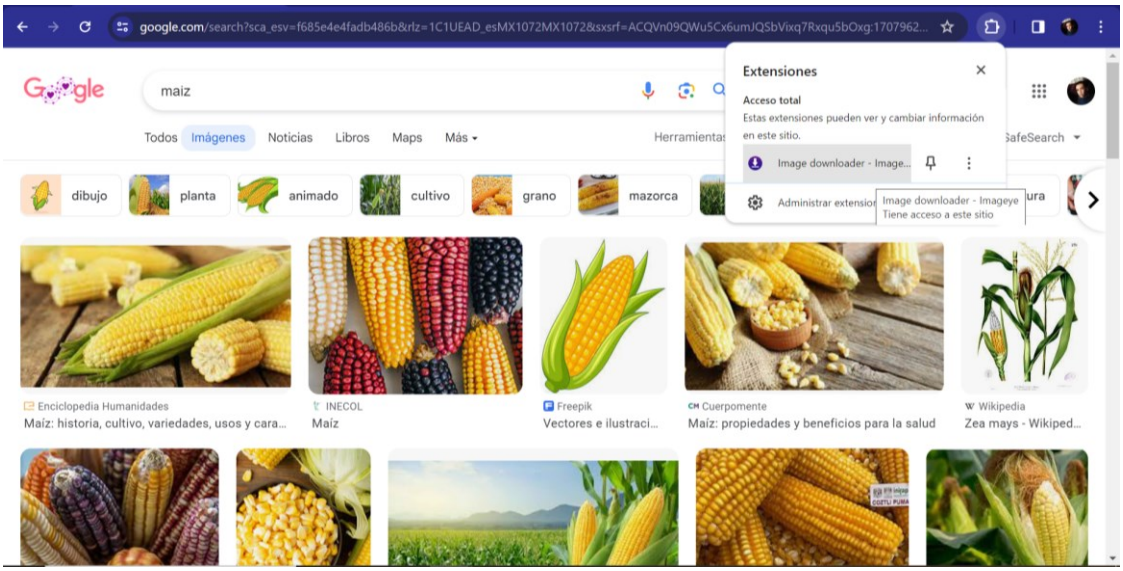


Figura 2. Ilustración de la descarga de imágenes de maíz para obtener la base de datos. Este procedimiento se aplica para cada uno de los cultivos.

De las imágenes seleccionadas aleatoriamente para la etapa de validación, se realizó un preprocesamiento a las imágenes, que consiste en realizar un acercamiento de imagen (ZOOM) con el objetivo de que exista un mayor reconocimiento en los detalles, a fin de realizar la predicción y con ello la clasificación correcta de los cultivos.

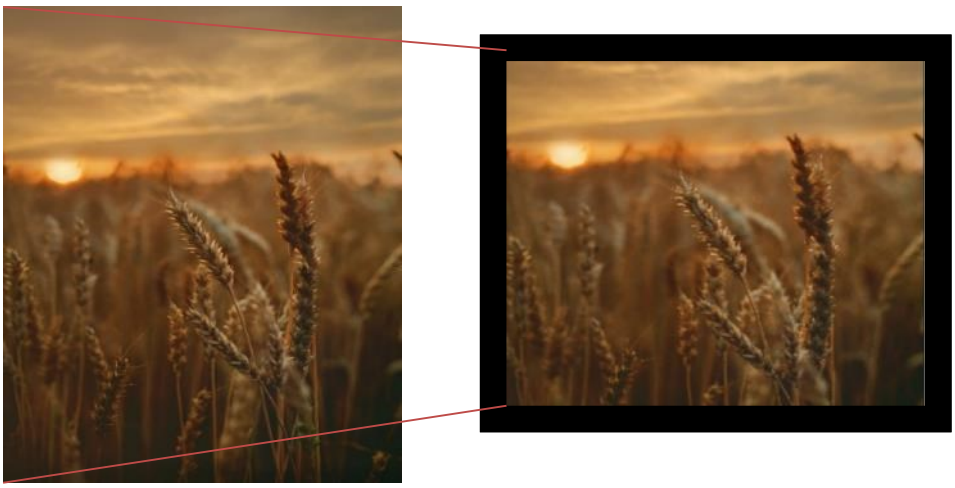


Figura 3. Acercamiento (zoom) de una imagen del cultivo de trigo que se implementó en la etapa de preprocesamiento de información.

En la Figura 4 se muestra la gráfica de evolución de la exactitud de las etapas de entrenamiento y validación. Se observa que cercano a las 5 épocas, la exactitud se mantiene constante en uno; lo que nos indica que el modelo ha sido entrenado para reconocer los cultivos de forma exitosa. Esto mismo se puede corroborar en la Figura 5, donde se observa el error del entrenamiento y la validación del sistema; ya que la evolución del error, cercano a las 5 épocas, este disminuye hasta aproximadamente 0.001%. La etapa de prueba fue implementada, obteniendo un error de 0.004% y una exactitud de 99.8%, aunque el error y la exactitud indican un adecuado reconocimiento de los cultivos, este disminuye en comparación a las etapas de entrenamiento y validación, lo que nos da indicio de que modelo requiere ser optimizado.

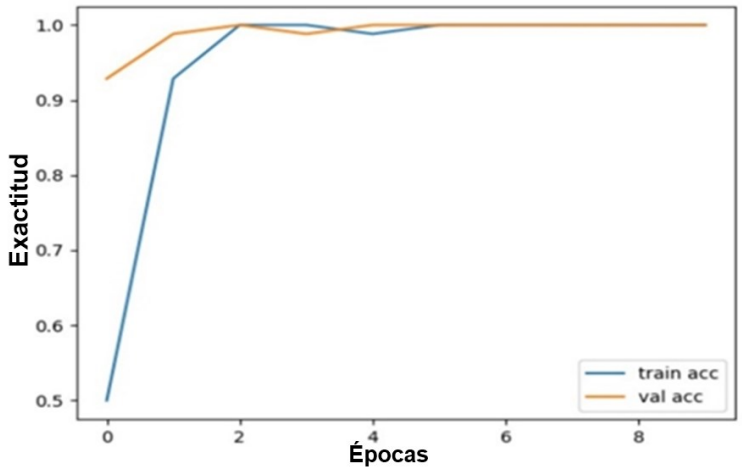


Figura 4. Gráfica de la exactitud en el entrenamiento (train acc) y validación (val cc) del modelo implementado.

Una de las etapas que fue implementada en este proyecto consistió en el desarrollo de una interfaz gráfica siguiendo el protocolo de Interfaz de programación de aplicaciones (API) y está disponible en el siguiente vínculo https://clasificadordecultivos.com/index.php. En la Figura 6 se puede observar la interfaz, en el inciso a) se muestra como el usuario puede elegir una imagen y después de algunos segundos, este recibirá una predicción, si la imagen corresponde a uno de los cultivos con los que se entrenó la DCNN. En la Figura 6 b) se muestra cómo se cargó una imagen de brócoli y fue detectada correctamente, adicionalmente se da una breve descripción del cultivo predicho. La GUI fue ha sido probada en distintos ambientes, es decir, además de elegir una imagen, se puede realizar una detección en tiempo real.

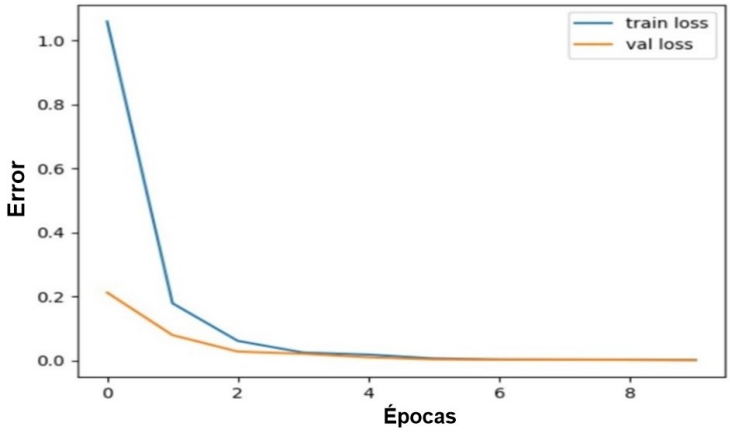


Figura 5. Gráfica del error en el entrenamiento (train loss) y validación (val loss) del modelo implementado.

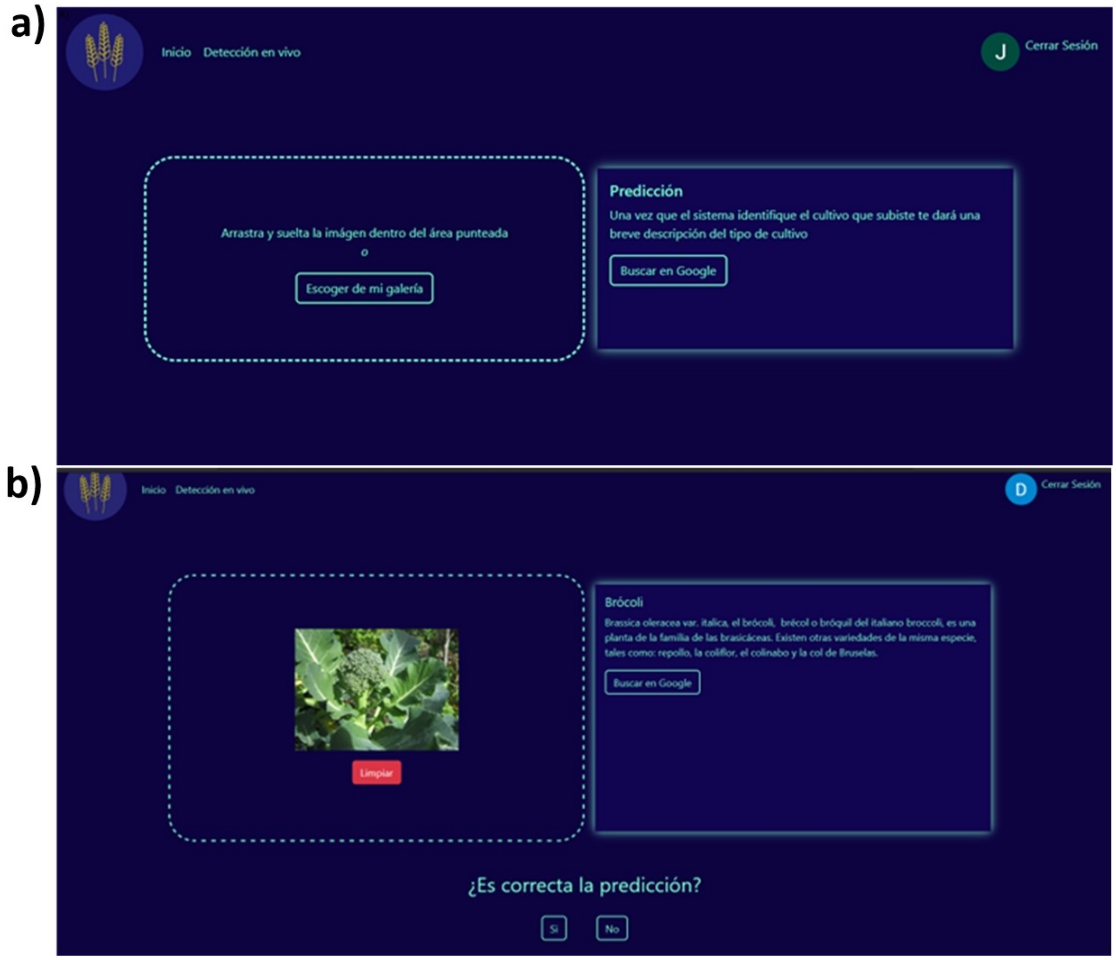


Figura 6. Capturas de la Interfaz de programación de aplicación desarrollada, donde se implemento el modelo de DCNN desarrollado en este proyecto.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) en línea, en la cual el modelo entrenado se implementa para realizar reconocimiento de los cultivos en tiempo real e imágenes. Los errores de entrenamiento y de validación son de alrededor de 0% y la exactitud en estas etapas es cercana al 100%. Cuando la interfaz se empleó en tiempo real, este modelo presentó errores de aproximadamente 0.001% para los 8 cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

1. T. J. Saleem and M. A. Chishti, “Deep Learning for the Internet of Things: Potential Benefits and Use-Cases,” Digital Communications and Networks Vol. 7, 4, 2021, pp. 526–42.
2. R. R. Aldeguer, "Perspectivas de la Inteligencia artificial," Técnica Industrial, vol. 1, 2009, pp. 2.
3. B. P. Orozco, "Inteligencia Artificial," INCyTU, vol. 12, 2018, pp. 2.
4. Y. Zheng, C. Yang, and A. Merkulov, "Breast cancer screening using convolutional neural network and follow-up digital mammography", Proc. SPIE 10669, Computational Imaging III, 1066905 (14 May 2018), pp. 1-13.
5. R. Pino; A. Gómez; y N. Martínez. Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva. Madrid: Universidad de Oviedo, 2001.

PREPARACIÓN DE ELASTÓMEROS CON FORMA RE-PROGRAMABLE A BASE DE CRISTALES LÍQUIDOS Y ENLACES DINÁMICOS DE PUENTE DISULFURO

Leticia Larios López, Rosa Julia Rodríguez González, Isaura Felix Serrano

Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México
leticia.larios@ciqa.edu.mx

RESUMEN

El desarrollo de materiales poliméricos de aplicación tecnológica que puedan ser reutilizados o reprocesados es un reto que en la actualidad ha motivado un buen número de trabajos científicos y tecnológicos. Un grupo de materiales que podría cumplir con estos requerimientos son los elastómeros líquido-cristalinos (LCE) que incorporan enlaces dinámicos en su estructura química. Por sus características particulares, este tipo de materiales puede responder a un estímulo externo como luz, calor, humedad, electricidad, cambios en pH, etc., exhibiendo un cambio en la forma física prefijada durante su preparación; cambio que puede ser reversible una vez que se ha suspendido el estímulo. Por tales características, los materiales elastoméricos LC encuentran una potencial aplicación en la fabricación de dispositivos ligeros de accionamiento mecánico en diversas áreas de la biomedicina, bio-robótica, y en músculos artificiales, por mencionar algunos ejemplos. Es así, que en este trabajo se reporta la preparación de cuatro elastómeros LC conteniendo enlaces dinámicos de puente disulfuro (SS-LCE), y se evalúa la capacidad de estos materiales para ser reprocesados y reprogramados en su forma. Para la preparación de los SS-LCE se siguió un procedimiento en dos etapas. En la primera etapa se obtuvo un oligómero líquido-cristalino con funcionalidades tiol (SH-257), mediante una reacción tiol-acrilato entre el mesógeno nemático diacrilato RM257 y un exceso (1.25 o 1.5) de un espaciador flexible ditiol (EDDET o HDT). Este oligómero fue caracterizado por POM y la textura de *Schlieren* observada corroboró que se mantiene la mesofase cristal líquido nemática de su precursor. Posteriormente, en una segunda etapa, se hizo reaccionar el SH-257 y el entrecruzante PETMP en una relación equimolar para obtener el gel correspondiente. Los geles SS-LCE fueron cortados en piezas pequeñas, lavados y puestos a secar en la estufa de vacío a 80°C por 5 horas, con lo que se obtuvieron materiales suaves de color blanco. Estas piezas pequeñas fueron colocadas en moldes de teflón y/o de aluminio y procesadas en una prensa de presión a una temperatura controlada de 180°C y diferentes intervalos de tiempo. De esta manera se obtuvieron placas planas flexibles de diferentes homogeneidades y grosores, dependiendo de la cantidad de material y el tamaño del molde utilizado, tiempo y presión de procesamiento, etc. Con el propósito de evaluar la capacidad de termo-accionamiento reversible, las películas de elastómeros SS-LCE fueron sometidas a diferentes procesos para obtener una programación de forma y luego expuestas a ciclos de calentamiento y enfriamiento, observándose un termo-accionamiento reversible mayor a 30%. Los resultados obtenidos claramente muestran que los procedimientos utilizados y las formulaciones planteadas en este trabajo fueron adecuados para preparar elastómeros líquido-cristalinos reprocesables, reprogramables y con termo-accionamiento mecánico reversible.

INTRODUCCIÓN

Los elastómeros líquido-cristalinos (LCE) son materiales poliméricos con memoria de forma que poseen en su estructura molecular grupos rígidos, cadenas flexibles y un bajo contenido de puntos de entrecruzamiento. Estos materiales resultan interesantes porque combinan activamente la elasticidad entrópica de un elastómero con la auto-organización molecular de los cristales líquidos. Derivado de estas características, los LCE tienen la capacidad de exhibir una deformación programada (o prefijada) en respuesta a un determinado estímulo externo como calor, luz, electricidad, etc. [1]. Esta deformación puede observarse como una flexión, doblez, contracción, o incluso una combinación de estas, dependiendo de las propiedades físicas del LCE y de la programación de forma que se le haya inducido previamente. Por estas y otras características, en la última década se ha incrementado el interés por el desarrollo y aplicación de materiales LCE, vislumbrando un futuro promisorio en la aplicación de estos materiales en diversas áreas [2, 3] como

la biomedicina, ingeniería de tejidos, bio-robótica, así como en el desarrollo de elementos accionadores flexibles, robots suaves, fibras biónicas, etc.

Existen reportados diversos procesos para la síntesis de los LCE [4-6], con los que se han podido elaborar materiales elastoméricos con buena resistencia mecánica, alta tenacidad y elongación a la rotura, así como algunos de ellos con características no citotóxicas, dependiendo de la formulación empleada. Una metodología en dos etapas, reportada por Yackacki y col. y que hemos utilizado en el grupo de trabajo, es una reacción de adición de Michael tiol-acrilato [4, 7] seguida de una reacción de fotopolimerización. Este método permite obtener elastómeros homogéneos, robustos y con excelente memoria de forma. Sin embargo, estos sistemas no tienen la posibilidad de ser reprocesados debido a que sus componentes se mantienen unidos entre sí por enlaces covalentes fijos, y un tratamiento térmico para intentar re-procesar estos materiales provocaría el rompimiento irreversible de estos enlaces, con la consecuente pérdida de su identidad estructural. Para contrarrestar esta limitante, y generar materiales LCE con posibilidad de ser re-utilizados o re-procesados, en los últimos años ha surgido como una alternativa la incorporación de enlaces dinámicos en la estructura química del elastómero [8-10]. Este tipo de enlaces tienen la particularidad de que, bajo ciertas condiciones, pueden romperse y regenerarse, confiriendo al LCE un carácter re-procesable. Un tipo de enlaces dinámicos, y que es el interés de este trabajo, son los enlaces covalentes de puente disulfuro (S-S), los cuales presentan una reacción de doble desplazamiento (reacción de metástasis), que puede ser activada por calor y por luz, sin necesidad de que haya un catalizador involucrado. Uno de los primeros trabajos al respecto fue reportado en 2017 [8], en donde los grupos mesogénicos de los LCE portadores de enlaces disulfuro fueron re-programados desde polidominios a monodominios. Estos autores también observaron que se elastómero era re-procesable y auto-reparable a altas temperaturas, por lo que usando la misma formulación de LCE prepararon un actuador tubular controlado por un estímulo eléctrico externo [9].

Considerando la facilidad de re-procesamiento que los enlaces dinámicos disulfuro le confieren al elastómero, en este trabajo se reporta la preparación de cuatro elastómeros SS-LCE que incorporan en su estructura química diferentes proporciones de grupos cristal líquido (RM257), un espaciador o extensor de cadena (EDDET o HDT) y grupos de entrecruzamiento (PETMP). Asimismo, en este trabajo se propone que, en el proceso de síntesis, no es necesario aislar el oligómero LC funcionalizado con grupos SH en ambos extremos de la cadena. De manera que la formación de los puntos de entrecruzamiento, que ocurre por la reacción de oxidación de los tioles, a lo largo de la cadena puede hacerse de manera secuencial y directa, optimizando los procesos de síntesis de los SS-LCE portadores de enlaces dinámicos covalentes de puente disulfuro.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales. Los reactivos utilizados en este trabajo fueron el mesógeno nemático diacrilato 1,4-Bis-[4-(3-acriloxipropiloxi) benzoiloxi]-2-metilbenceno (RM257, 97.3%), el espaciador 2,2'-(etilendioxi) dietanotiol (EDDET, 95%) o 1,6-hexanoditiol (HDT), el entrecruzante tetrakis(3-mercapto propionato) pentaeritritol (PETMP, 95%), dipropilamina (DPA, 99%), peróxido de hidrógeno al 9%, yoduro de sodio, tiosulfato de sodio, acetona, metanol, y tetrahidrofurano. Con excepción del RM257, todos los reactivos y disolventes fueron adquiridos de Aldrich, Co., y fueron usados como se recibieron, a menos que se indique algo diferente.

Preparación del elastómero SS-LCE E0 portador de puentes disulfuros (método 1). Este elastómero fue sintetizado siguiendo los procedimientos reportados en la literatura [8, 9]. De acuerdo con esta referencia, primero se llevó a cabo la síntesis y purificación del oligómero SH-257 y posteriormente se preparó el elastómero. Para ello, 9.42 g del mesógeno RM257 y 3.64 g del espaciador EDDET fueron disueltos en 50 mL de acetona, y luego 0.2 g del catalizador DPA se agregaron al sistema de reacción. Esta mezcla fue mantenida en agitación a temperatura ambiente por 18 horas. Transcurrido este tiempo, el oligómero obtenido como un líquido viscoso, fue recuperado y precipitado tres veces en metanol. Posteriormente, en una segunda etapa se obtuvo el elastómero SS-LCE E0, para lo cual 4.733 g (1.45 mmol) del SH-257 y 0.373 g del entrecruzante EDDET fueron disueltos en THF.

Enseguida se agregaron 1.333 mL de una solución de H_2O_2 al 9% y 8 mg de yoduro de sodio. La mezcla se dejó agitando por 24 h, observándose la formación de un gel, el cual fue cortado en piezas pequeñas y puesto en agitación en una solución de tiosulfato de sodio al 5% y luego, lavado tres veces con agua destilada. Finalmente, el elastómero fue secado en una estufa a 85°C durante 20 horas, y se procedió a su caracterización química y térmica.

Preparación de los elastómeros SS-LCE E1, H2 y E5 portadores de puentes disulfuros (método 2). El procedimiento seguido para la preparación de estos elastómeros fue similar al utilizado para el E0, con la salvedad de que, en este método, no fue necesario purificar el oligómero SH-257 y la preparación del LCE se llevó a cabo *in-situ*. Estos elastómeros fueron formulados utilizando una base de 4.0 g (6.8 mmol) del mesógeno RM257 y THF seco, recién destilado. En la tabla 1 se reporta el tipo y proporción del grupo espaciador (EDDET o HDT) así como la relación de entrecruzante, utilizados en cada formulación elastomérica.

Tabla 1. Formulación de los elastómeros SS-LCE

SS-LCE	EDDET/HDT /RM257	EDDET/HDT /PETMP
E0*	5/0/4	4/0/2
E1	3/0/2	4/0/2
H2	0/3/2	0/4/2
E5	5/0/4	4/0/2
* A partir del oligómero SH-257		

Caracterización de los materiales. Para la caracterización química por resonancia magnética nuclear se utilizó un espectrómetro Bruker modelo Ascend de 400 MHz, y cloroformo deuterado como disolvente. Para obtener los espectros de infrarrojo (FTIR) se utilizó un espectrofotómetro Nicolet modelo iS5 Thermo-Scientific, iD7-ATR en modo de reflectancia total atenuada (ATR). La caracterización por microscopía óptica de luz polarizada se efectuó en un microscopio Olympus B53, equipado con un sistema de micrografía digital MicroPublisher 3.3 RTV y una platina de temperatura controlada Linkam. La caracterización térmica de los SS-LCE se llevó a cabo en un calorímetro de barrido diferencial DSC-2000 Q-Series de TA Instruments, utilizando muestras de 5 mg, confinadas en portamuestras de aluminio, que fueron calentadas/enfriadas a una velocidad de 10°C/min. Finalmente, para el análisis de re-procesamiento y programación de forma de los SS-LCE, estos fueron colocados en moldes de teflón y/o de aluminio, y comprimidos en una prensa de presión a una temperatura de 180°C por diferentes intervalos de tiempo.

RESULTADOS

En el proceso de preparación de los SS-LCE se requiere primero de la formación de un oligómero SH-257, el cual se obtiene a partir del mesógeno diacrilato RM257 y una cierta proporción del espaciador ditiol EDDET o HDT (ver tabla 1). La caracterización química por espectroscopía de RMN de ^1H del oligómero y de sus correspondientes precursores permitió confirmar que la reacción tiol-acrilato se llevó a cabo de manera exitosa. Como se observa en la Figura 1, en el espectro del SH-257 se combinan las señales del mesógeno RM257 y del espaciador EDDET, y ya no están presentes las señales correspondientes a la funcionalidad acrilato (8.5-6.5 ppm) del mesógeno RM257 pero se mantiene el triplete (en 1.6 ppm) que indica la presencia de la funcionalidad tiol. Estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura para este tipo de oligómero [8]. Tomando en cuenta que el multiplete centrado en 8.17 ppm, corresponde a los 4 protones del anillo bencílico y que las señales alrededor de 3.6 ppm corresponden a los metilos vecinos a los átomos de oxígeno del EDDET, se determinó que el grado de polimerización del oligómero fue de 4.2.

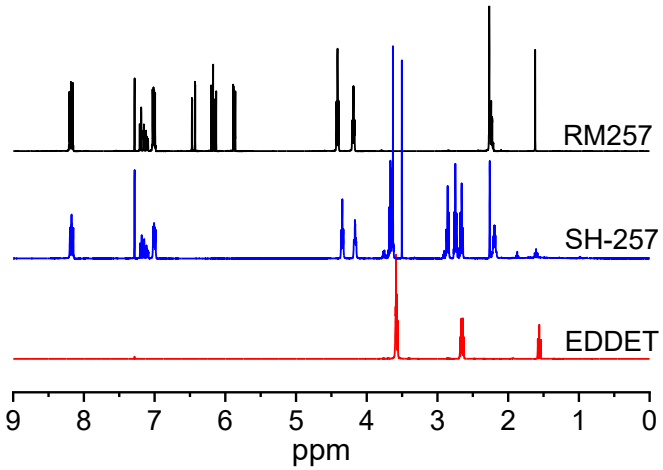


Figura 1. Espectros de RMN de ^{1}H del oligómero LC SH-257 y de sus precursores.

Por otro lado, en cuanto a las características mesomórficas del oligómero se encontró que es un cristal líquido a temperatura ambiente y que tiene una transición a un líquido isotrópico a una temperatura alrededor de 48°C, como se infiere de las imágenes de la Figura 2, obtenidas de su caracterización por POM durante un proceso de enfriamiento. Es así que este compuesto desarrolla texturas de tipo homeotrópico y Schlieren, que son texturas típicas de cristales líquidos nemáticos [11]. Estos resultados indican que por la incorporación del espaciador flexible EDDET, ocurre un claro abatimiento de las transiciones térmicas del mesógeno RM257, el cual muestra una fusión a 60°C y una temperatura de isotropización de 130°C [12].

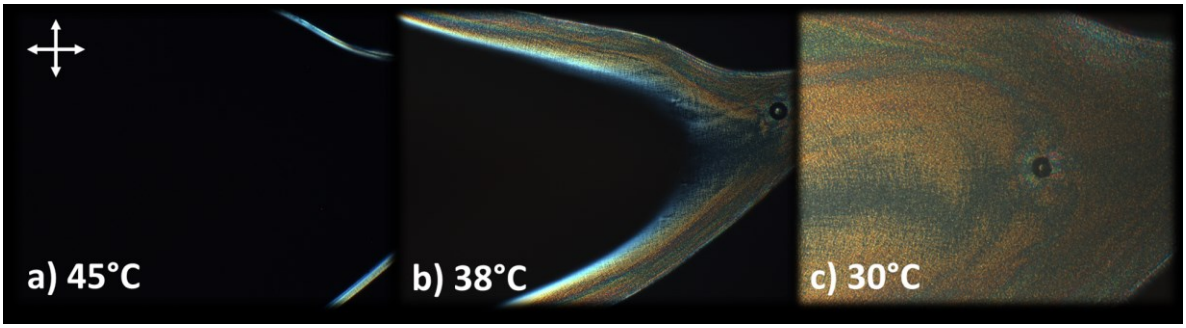


Figura 2. Imágenes POM del oligómero SH-257 obtenidas durante el ciclo de enfriamiento.

Como se describió en la parte experimental, para la obtención de los elastómeros SS-LCE portadores de los enlaces de puente disulfuro se utilizaron dos métodos de síntesis. El primero de ellos, reportado por Wang y Cai [8], requirió de la síntesis y purificación del oligómero SH-257 usando acetona y metanol, respectivamente; y después, este oligómero disuelto en THF fue usado para la formulación del elastómero correspondiente (E0). Mientras que en el procedimiento usado por primera vez en este trabajo (método 2), el oligómero SH-257 fue sintetizado directamente en THF, y sin purificación adicional fue utilizado en la formulación de los elastómeros E1, H2 y E5, lo que optimiza el proceso de síntesis. En ambos métodos, los SS-LCE presentaron de inicio una apariencia física de geles; que una vez cortados en piezas pequeñas, lavados y secados fueron obtenidos como sólidos suaves con una coloración ligeramente amarilla, como se ilustra en la Figura 3 (izquierda). El tipo y proporción del grupo espaciador usado en cada formulación marca cierta influencia en las características físicas del elastómero. Por ejemplo, en esta figura se observa que la apariencia del elastómero con espaciador HDT (H2) es un sólido blanco más opaco que el elastómero que fue formulado con EDDET (E1), aun cuando ambos SS-LCE poseen la misma proporción de componentes (espaciador, mesógeno y entrecruzante) como se indica en la Tabla 1.

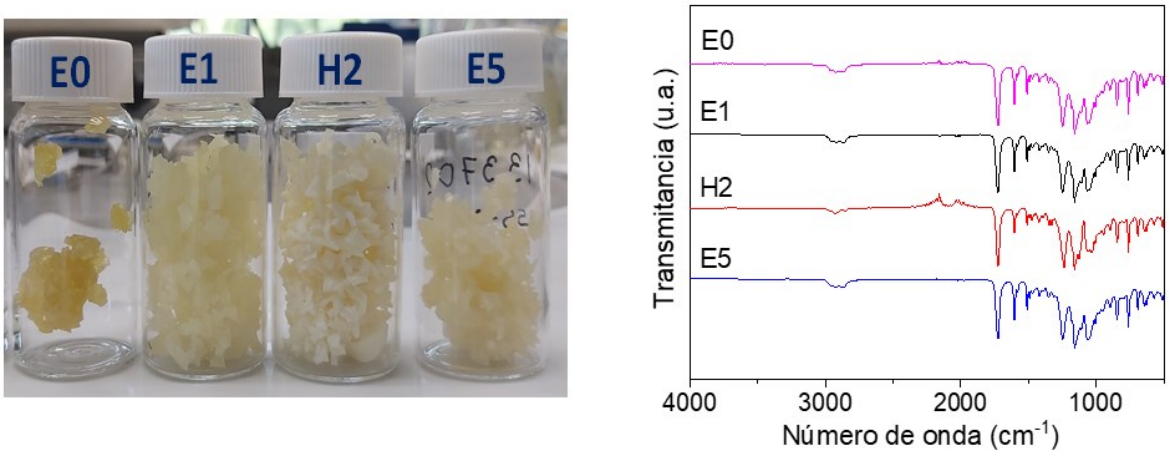
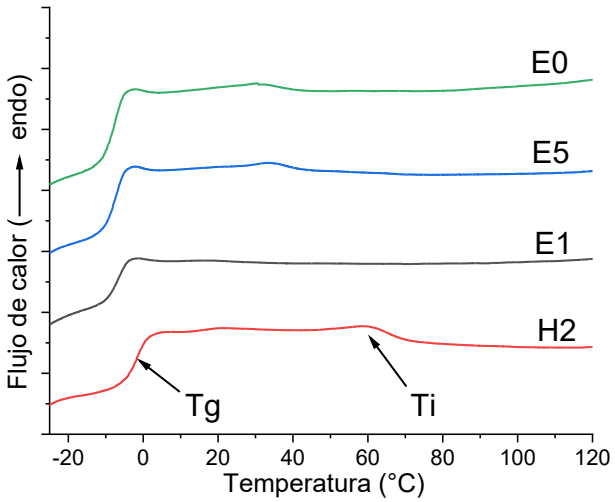


Figura 3. Apariencia física y espectros de FTIR de los elastómeros SS-LCE portadores de enlaces disulfuro.

Estos resultados, claramente indican que hay un efecto del tipo de espaciador utilizado en la formulación del elastómero, lo que va a influir en el comportamiento térmico del material como se mostrará más adelante. Todos los SS-LCE fueron caracterizados por espectroscopía de infrarrojo, y los espectros obtenidos corroboran las señales esperadas en estos materiales (Figura 3 derecha).

En la Figura 4 se reportan las curvas DSC de los cuatro elastómeros SS-LCE, obtenidas durante el segundo ciclo de calentamiento, las cuales exhiben la forma típica para los elastómeros líquido-cristalinos [13]. Es así que, los termogramas muestran claramente un cambio en la línea base (entre -10 y 0°C), y que está asociado con la temperatura de transición vítrea (Tg). También se observa una endoterma ancha de baja magnitud (entre 17 y 59°C) que corresponde a la temperatura de isotropización (Ti) del SS-LCE. Es notable la similitud que hay en los termogramas de los elastómeros E0 y E5, en donde se observa un mismo valor de la Tg (-7.6°C) y apenas una ligera diferencia en la Ti. Considerando que ambos materiales tienen la misma formulación elastómerica (ver tabla 1) y que solamente se varió el método de preparación, es evidente que no hay un efecto significativo en el método usado para obtener este SS-LCE.



SS-LCE	Tg (°C)	Ti (°C)
E0	-7.6	31.0
E5	-7.6	33.2
E1	-7.0	[a]17.0
H2	-1.8	59.0

[a] transición apenas detectable

Figura 4. Termogramas DSC de los elastómeros SS-LCE, temperaturas de transición vítrea (Tg) y de isotropización (Ti) obtenidas durante el segundo calentamiento a 10°C/min.

Por lo anterior y, considerando que el método 2 consta de un menor número de etapas, se puede concluir que este procedimiento es el más adecuado, sencillo y útil para la preparación de elastómeros líquido cristalinos portadores de enlaces dinámicos de tipo puente disulfuro.

Es importante mencionar que la proporción entre el grupo espaciador ditiol y el mesógeno diacrilato determina la distancia que habrá entre un grupo de entrecruzamiento y otro, lo cual tendrá influencia en la mayor o menor rigidez que pueda haber en el elastómero, así como en sus propiedades térmicas y mecánicas. Con el propósito de estudiar esto, se analizaron los termogramas de los elastómeros E5 y E1, los cuales poseen una proporción de EDDET/RM257 de 5/4 y 3/2, respectivamente. Como se observa en la Figura 4, el termograma del elastómero E5 muestra una clara endoterma centrada en 33.2°C, mientras que esta transición en E1 apenas es perceptible. Además, la Tg del E1 es 0.6°C mayor que en el SS-LCE E5, lo que indica que se trata de un sistema más rígido. Estos resultados concuerdan con reportes en la literatura [10], en donde se ha asociado este comportamiento a que un aumento en la relación ditiol/diacrilato genera sistemas con una mayor densidad de entrecruzamientos y, por lo tanto, sistemas más rígidos y robustos.

Por otro lado, en este trabajo también se estudió el efecto del tipo de espaciador (EDDET o HDT) en la formulación del SS-LCE. Para ello se comparó el comportamiento térmico de los elastómeros E1 y H2, que fueron formulados con EDDET y HDT, respectivamente. De acuerdo con la Figura 4, el elastómero H2 tiene su Tg en -1.8°C y la Ti en 59°C. Comparando estos valores con los obtenidos para E1, es claro que el espaciador HDT favorece un incremento de 5.2°C en la Tg. Estos resultados demuestran que las propiedades térmicas y mecánicas de los SS-LCE pueden ser moduladas tanto por el contenido como por el tipo de grupo espaciador utilizados en la formulación del elastómero.

Los enlaces de puente disulfuro son del tipo de enlaces covalentes dinámicos que bajo ciertas condiciones pueden romperse y volver a formarse [8-10], confiriendo al material que los contiene un carácter reprocesable. Es así, que en este trabajo también fue evaluada la capacidad de procesamiento y re-procesamiento de los SS-LCE. La Figura 5a ilustra la apariencia del elastómero SS-LCE antes y después de ser procesado en película. Como se observa en estas imágenes, el tratamiento térmico en la prensa de presión permitió que las partículas del SS-LCE fueran compactadas de manera uniforme dando como producto una película homogénea. Los SS-LCE fueron procesados en repetidas ocasiones y con diferentes formas sin mostrar cambios aparentes en su estructura química, como lo indican los espectros de FTIR de los SS-LCE obtenidos antes y después de ser procesados en películas (ver Figura 5b). De esta manera se confirma el carácter re-procesable de estos elastómeros portadores de enlaces dinámicos de puente disulfuro.

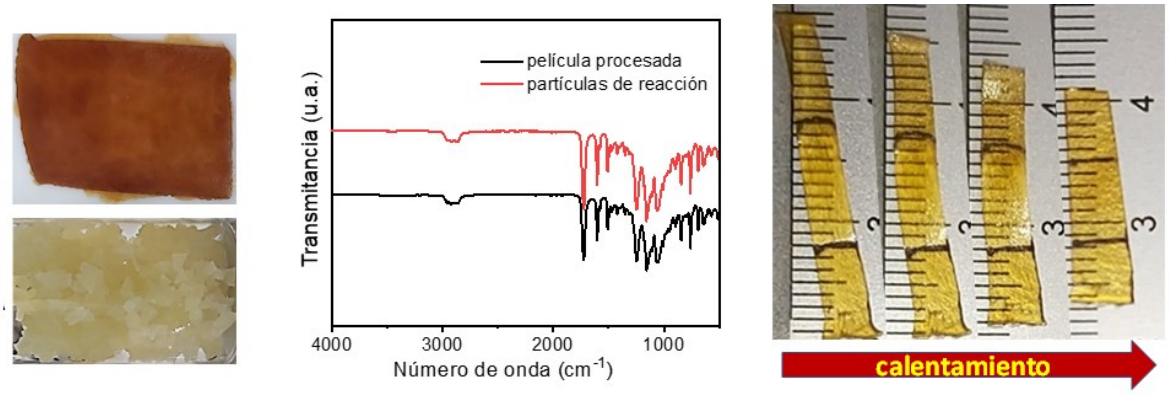


Figura 5. (a) Apariencia física y (b) espectros de FTIR del SS-LCE E5 antes y después de ser procesado en película y, c) deformación reversible en el SS-LCE E5 en respuesta a un estímulo térmico.

Finalmente, con el propósito de evaluar la capacidad de termo-accionamiento, las películas de elastómeros SS-LCE fueron tratadas para obtener una programación de forma y luego fueron sometidas a ciclos de calentamiento y enfriamiento. En la Figura 5c, se ilustra el proceso de contracción que experimenta un SS-LCE programado (mesógenos alineados) con forma rectangular, cuando fue expuesto a un estímulo térmico. Una vez que el estímulo fue retirado, el material regresó a su forma inicialmente programada, mostrando un termo-accionamiento reversible mayor a 30%.

CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta en este trabajo fueron obtenidos de manera exitosa cuatro elastómeros líquido-cristalinos portadores de enlaces dinámicos de puente disulfuro (SS-LCE). Con la optimización del procedimiento de síntesis, los SS-LCE pudieron obtenerse de una manera más sencilla y directa que lo reportado en la literatura. Estos materiales mostraron propiedades de reprocesamiento y reprogramación en forma, exhibiendo un termo-accionamiento reversible mayor a 30%. No obstante que estos materiales experimentaron ciertos fenómenos de oxidación durante el re-procesamiento, los resultados de FTIR indicaron que conservan su estructura química prácticamente sin cambio. Se demostró que las propiedades térmicas y mecánicas de los SS-LCE pueden ser moduladas tanto por el contenido como por el tipo de grupo espaciador utilizados en la formulación del elastómero. Por último, los resultados obtenidos mostraron que los procedimientos utilizados y las formulaciones planteadas en este trabajo fueron adecuados para preparar elastómeros líquido-cristalinos reprocesables, reprogramables y con termo-accionamiento mecánico reversible.

Agradecimientos. Se agradecen las facilidades técnicas del Laboratorio Nacional de Materiales Grafénicos, y en especial el apoyo de J.A. Mercado Silva. Este trabajo fue soportado financieramente por el CIQA (proyecto interno 6704).

BIBLIOGRAFÍA

1. Q. Li, “Intelligent Stimulli-Responsive Materials”, John Wiley & Sons, 1era Ed., 2013.
2. Jiang H., Lia Ch., Huang X., Actuators based on liquid crystalline elastomer materials, Nanoscale, 2013, 5, 5225-5240.
3. M.E. Prévôt, S. Ustunel, E. Hegmann, “Liquid Crystal Elastomers—A Path to Biocompatible and Biodegradable 3D-LCE Scaffolds for Tissue Regeneration”, Materials 2018, 11, 377; doi:10.3390/ma11030377.
4. C.M. Yakacki, M. Saed, D.P. Nair, T. Gong, S.M. Redd, C.N. Bowman, “Tailorable and programmable liquid-crystalline elastomers using a two-stage thiol–acrylate reaction”. RSC Adv., 2015, Vol. 5, 18997-19001. doi:10.1039/c5ra01039j.
5. E.J. López Torres, A.S. Valencia Aguilar, M.A. De Jesús Tellez, R.J. Rodríguez González, D. Navarro Rodríguez, L. Larios López, “Preparación de elastómeros líquido-cristalinos portadores de grupos azobenceno”, Avances de la Ciencia en México 2017, (ISBN 978-607-95228-8-9), 3571-3576.
6. X. Dong, X. Zhou, y col., “Monodomain liquid crystal elastomer bionic muscle fibers with excellent mechanical and actuation properties”, iScience, 2023, 26, 106357.
7. H. Guo, M. O. Saed y E. M. Terentjev, “Thiol–acrylate side-chain liquid crystal elastomers”, Soft Matter, 2022,18, 4803-4809, DOI: 10.1039/d2sm00547f.
8. Z. Wang, H. Tian, Q. He, Sh. Cai, “Reprogrammable, Reprocessible, and Self-Healable Liquid Crystal Elastomer with Exchangeable Disulfide Bonds”, ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, 33119−33128.
9. . Q. He, Z. Wang, Y. Wang, A. Minori, M.T. Tolley, Sh. Cai, Sci. Adv. 2019; 5: eaax5746 “Electrically controlled liquid crystal elastomer–based soft tubular actuator with multimodal actuation
10. Zhijian Wang, Qiguang He, Yang Wang and Shengqiang Cai “Programmable actuation of liquid crystal elastomers via ‘‘living’’ exchange reaction” Soft Matter, 2019, 15, 2811.

11. D. Demus, J. Goodby, G.W. Gray, H.-W. Spiess, V.Vill, “Hanbook of Liquid Crystals”, Ed. WileyVHC (1998); S. Kumar, “Liquid Crystals”, Cambridge University Press (2001).
12. Kamal, T., & Park, S. Y. (2014). “A liquid crystal polymer based single layer chemo-responsive actuator. Chemical communications”, 50(16), 2030-2033.
13. S.V. Fridrikh y E.M. Terentjev, “Polydomain-monodomain transition in nematic elastomers” Physical Review E, 1999, Vol. 60, No.2. 1847-1857

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ASISTIDA POR FLUJO (FAC) DE UN MATERIAL BIMETÁLICO (ACERO API 5L X65-INCONEL 825) CON RESPECTO AL ACABADO SUPERFICIAL EN LA FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN

José Luis Hernández Nava[1], Manuela Díaz Cruz [1*], Juan Vicente Méndez Méndez[2], A. Cervantes Tobón[1], Israel Arzate Vázquez [2], Antonieta García Murillo [3], Felipe de Jesús Carrillo Romo [3].

[1]Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.
[2]Instituto Politécnico Nacional, Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, IPN-CNMN, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.
[3]Instituto Politécnico Nacional-CIITEC Azc., Cerrada de Cecati s/n, Sta. Catarina, Azc., C.P. 02250, Ciudad de México, México.
mdiazc@ipn.mx

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo con el fin de estudiar la velocidad de corrosión asistida por flujo (FAC) de un material bimetálico compuesto por un acero API 5L X65 y un Inconel 825 a dos acabados superficiales (pulido y lija #2000) los cuales fueron sometidos a una salmuera dulce para estudiar la formación de productos de corrosión. Las pruebas electroquímicas se realizaron en una cámara de impacto (jet impingement) con 3 diferentes ángulos de impacto sobre el material bimetálico previamente desbastado (#2000 y pulido a espejo), además se utilizó un electrodo auxiliar y un electrodo de referencia (electrodo de grafito y un electrodo de calomel respectivamente). Las pruebas fueron realizadas a una velocidad de flujo de 2.36 m/s para tres ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

Mediante resistencia a la polarización lineal (RPL) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se determinaron las velocidades de corrosión para los diferentes casos de acabado de la superficie y ángulo de impacto. Los resultados demostraron que a 30° presento la mayor velocidad de corrosión con un acabado superficial a pulido a espejo.

Este comportamiento se atribuye a que los esfuerzos de corte afectan la superficie, además, la menor rugosidad superficial provoca que los productos de corrosión no se anclen y los escasos productos que se anclaron son removidos de la superficie por efecto del flujo proporcionando una mínima protección al material.

Los productos de corrosión se caracterizaron por microscopia electrónica de barrido (MEB) observándose diferente morfología, dichos productos depositados presentan diferentes composiciones químicas a causa de la salmuera y por el efecto de la reacción química. Las especies cristalinas de los productos de corrosión se determinaron mediante difracción de rayos X por haz rasante (DRX) para los 3 ángulos con sus respectivos acabados superficiales, observado que las estructuras cristalinas que proporcionan la menor velocidad de corrosión en las muestras lijadas a #2000 es la siderita ($FeCO_3$) y en el caso de las muestras pulidas a espejo fue la cementita (Fe_3C) principalmente.

Mediante perfilometría óptica se determinaron las diferentes rugosidades antes y después de la formación de los productos de corrosión, observando que a mayor rugosidad del material bimetálico se tiene una disminución de la velocidad de corrosión, debido a la formación de valles y crestas.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del flujo en tuberías cobra gran importancia debido a las velocidades que se alcanzan, ya que el flujo es capaz de remover mecánicamente las capas de óxido protectoras que se forman en las paredes del acero, seguido de la liberación de cationes ferrosos en la superficie del metal y el constante desprendimiento y arrastre de éstas capas, a este fenómeno se le conoce

Corrosión Asistida por Flujo (*Flow Accelerated Corrosion, FAC*) [1,2]. El adelgazamiento de las paredes del material es causado por reacciones químicas o electroquímicas que ocurren en la superficie del metal, las cuales son las causantes de la degradación del mismo.

La FAC puede ser afectada por diferentes variables tales como, composición química del material, temperatura, pH, el contenido de oxígeno, la velocidad de fluido, así como del medio que se transporte ya sea dulce (CO_2) y/o amargo (H_2S). Sin embargo, los principales factores son la velocidad de flujo y su turbulencia debido a que afectan la capa límite en el interior de la tubería y por la solubilidad de los iones en disolución [3].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se muestra el desarrollo experimental que se llevó a cabo para la presente investigación.

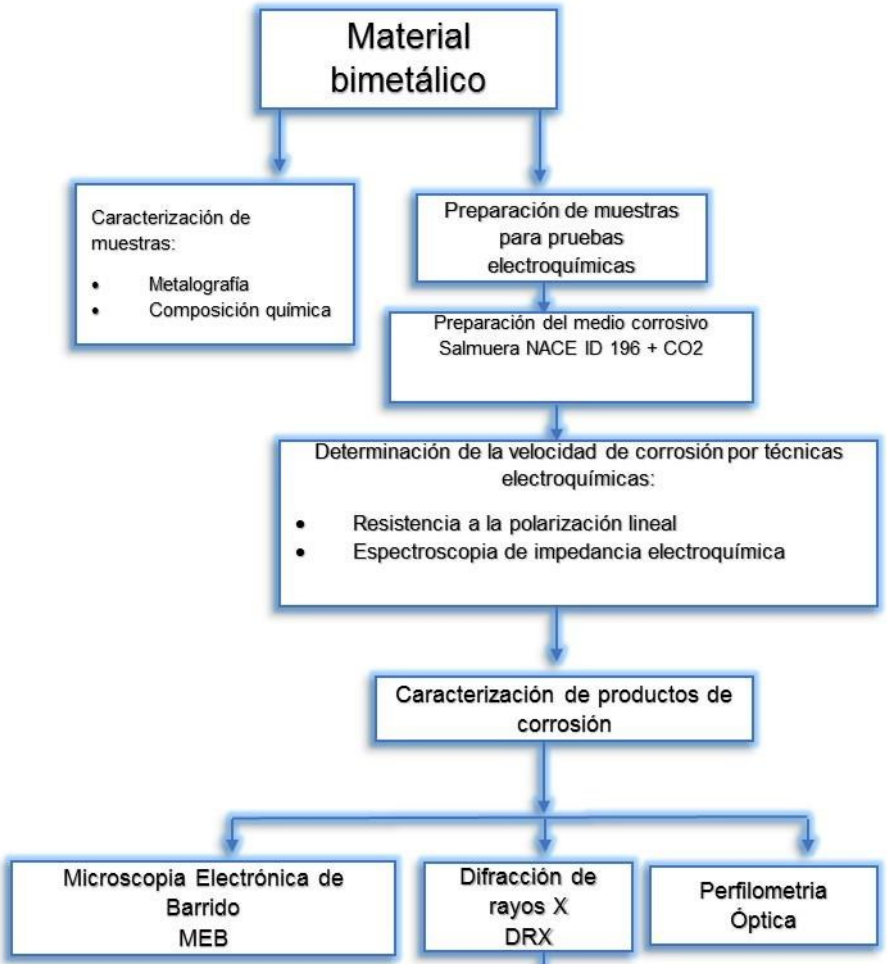


Figura 1. Metodología experimental.

En la Figura 2 se muestra el equipo experimental utilizado durante la investigación, el cual consta de una cámara de impacto fabricada de acrílico de 5 mm de espesor. Se hace recircular un flujo constante mediante una bomba de succión controlando la velocidad de flujo con el uso de un rotámetro de una Salmuera NACE 1D-196 + CO2 con (1 bar de presión) y con un pH de 5-6 (medio acido).

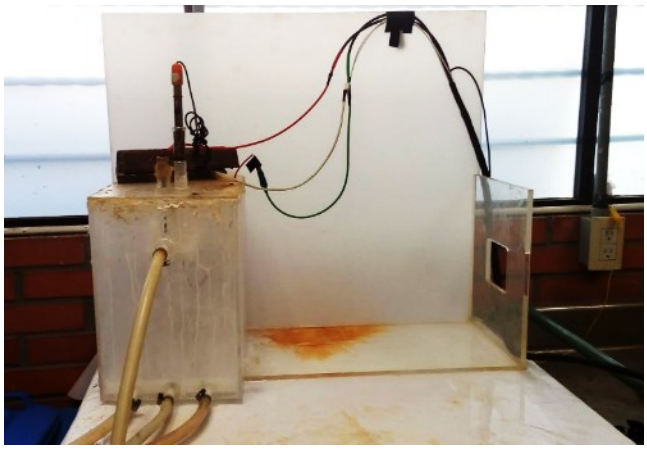


Figura 1. Equipo experimental empleado en la investigación (cámara de impacto)

Para llevar a cabo las pruebas electroquímicas para obtener la velocidad de corrosión del bimetálico empleado en la presente investigación se elaboraron probetas rectangulares, las cuales fueron sometidas a un medio corrosivo en este caso se trata de una salmuera NACE ID-196 adicionada con CO_2 (1 bar de presión) cuya composición se describe en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Salmuera NACE 1D-196 (12L)

NaCl (s)	1278.9468 g
$CaCl_2$*2H_2O (s)	53.7276 g
MgCl2*6H2O (s)	24.732 g

Tabla 2. Pesos de reactivos para la adición de CO_2

$CaCO_3$	615 g
HCl	36.6187 mm
pCO_2	CO_2 obtenidos
1 Bar=0.9871 atm	22.071556 g= 22071.556 ppm

RESULTADOS OBTENIDOS

El material bimetálico se caracterizó metalográficamente con el fin de determinar su microestructura y las fases presentes, para el acero al carbono, se utilizó nital 3 como reactivo de ataque. La aleación de inconel 825 fue atacada con un reactivo preparado con 10ml HNO_3, 15ml HCl, 10ml ácido acético y 5 gotas de glicerina por un periodo de 30 segundos a 1 minuto.

La parte superior corresponde a la zona longitudinal del acero API 5L X65 a 50 magnificaciones, observando granos semiequiaxiales e incluso algunos granos alargados en algunas zonas y una mayor cantidad de ferrita (fase clara) y menor presencia de perlita (fase obscura). La parte inferior de la Figura muestra la zona del Inconel 825.

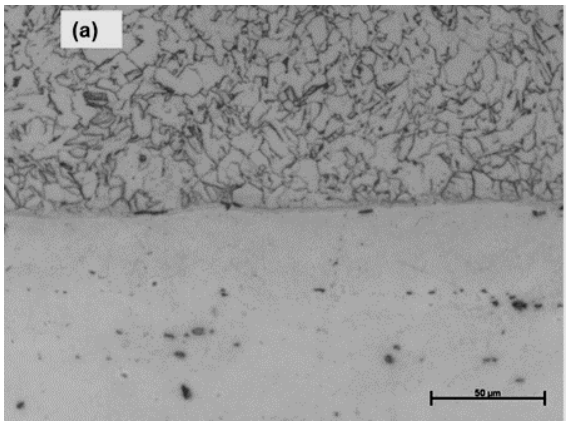


Figura 2. (a) Metalografía del material bimetálico, parte superior Acero API 5L X65 y parte inferior Inconel 825.

La Figura 3 muestra la microestructura del Inconel 825, donde los granos de la matriz se consideran que son de austenita (fase clara) donde se muestran una distribución no uniforme y precipitados de Cr-Ni-Mo (fase obscura) ocupando grandes zonas con la fase de austenita en ciertos límites de grano.

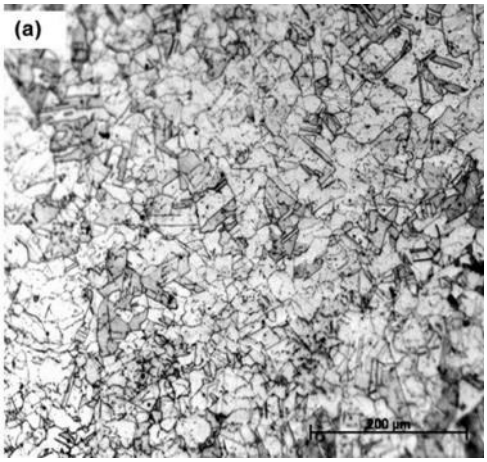


Figura 3. Metalografía del Inconel 825.

Las Tabla 3 y 4 muestran la composición química del material bimetálico obtenida mediante la técnica de espectroscopía de emisión de chispa.

Tabla 3. Composición química acero API 5L X65.

Aleación	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
API 5L X65	0.154	1.357	0.231	0.023	0.014	0.061	0.001	0.022	98

Tabla 4. Composición química inconel 825.

Aleación	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Inconel 825	0.021	0.13	0.91	0.04	0.01	26.1	51.5	11	0.55	10

En la Figura 4 se muestra la velocidad de corrosión en función del ángulo de impacto para los dos acabados superficiales. De manera general se puede observar que cuando existe mayor rugosidad (lija #2000) la velocidad de corrosión se incrementa conforme se aumenta el ángulo de impacto. El comportamiento es contrario cuando se tiene un acabado superficial pulido a espejo.

Para ambos casos del acabado superficial en la posición de 60°, las velocidades de corrosión tienden a igualarse, pero es menor en el acabado lija #2000.

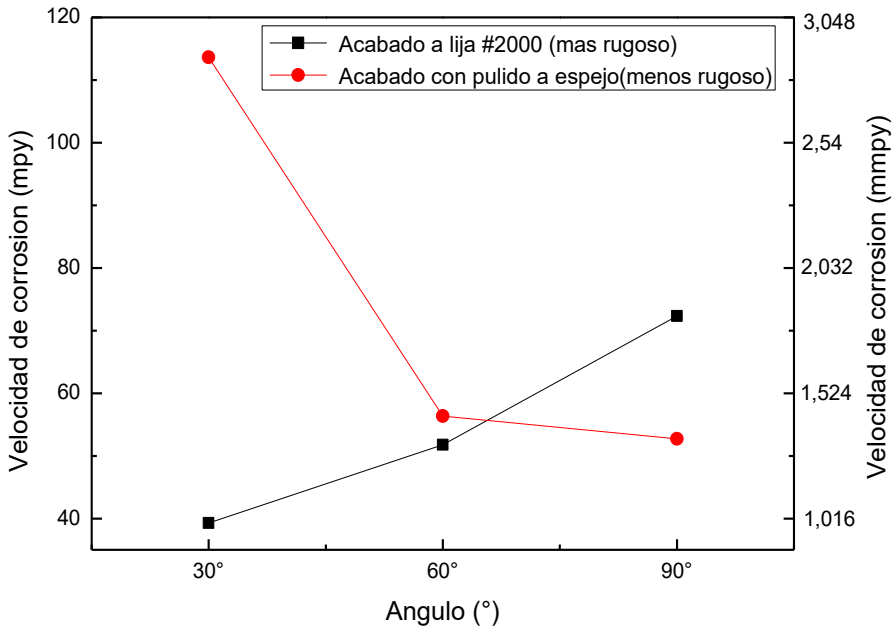


Figura 4. Velocidad de corrosión generada para los ángulos de 30°, 60° y 90° con acabado superficial lija #2000 y pulido a espejo.

En la Figura 5 se muestra la morfología de los productos de corrosión para ambos acabados superficiales a 30°. En el cupón con acabado a lija #2000 5a se puede apreciar que los productos formados en la interface tienen un mayor tamaño que las formadas en acabado pulido a espejo 5b.

Debido a la morfología de los productos formados para la lija #2000 tienden a ser más protectores y densos debido a que el acabado superficial permite a la superficie anclar dichos productos y, por ende, se tiene una disminución de la velocidad de corrosión (Figura 4). Sin embargo, para el acabado superficial a pulido a espejo se presentan menos productos de corrosión debido a que la superficie es menos rugosa formándose solo productos en la zona inter facial como se muestra en la micrografía a pulido a espejo 5b.

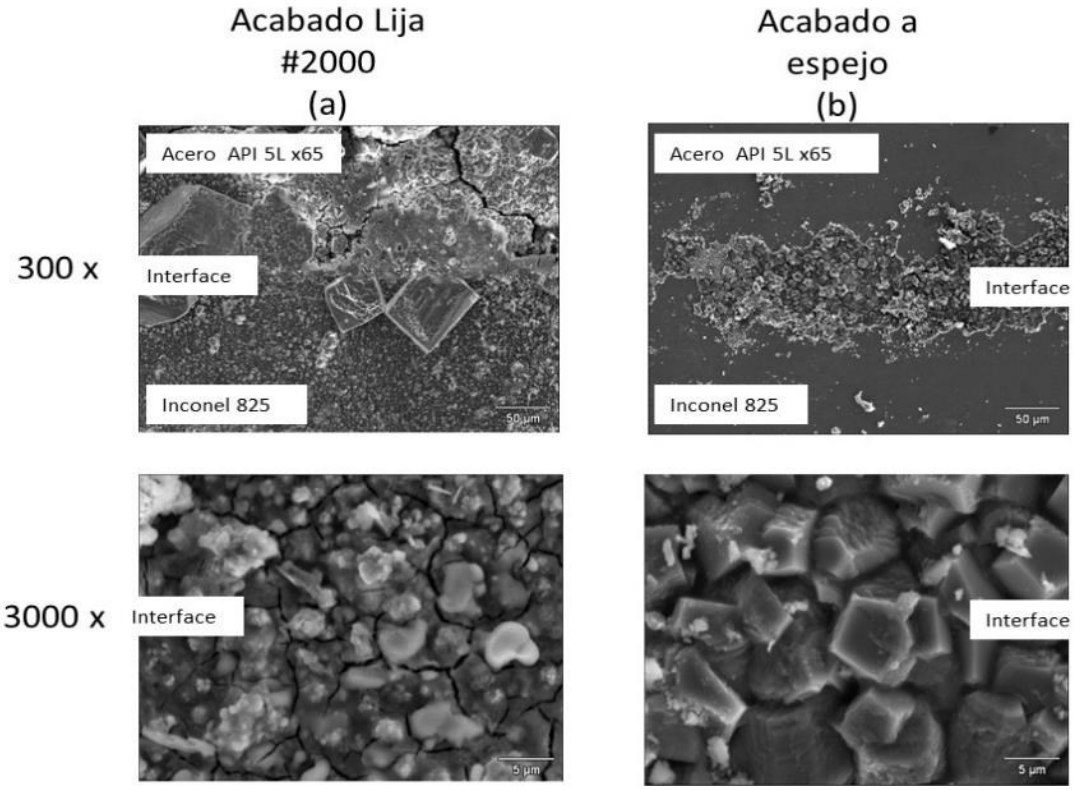


Figura 5. Micrografías de la superficie del material bimetálico en la interface a (a) lija #2000 y (b) pulido a espejo.

La Figura 6 muestra el patrón de difracción para el ángulo de 30° para ambos acabados superficiales. Se observa que para el acabado a lija #2000 presenta una mayor gama de estructuras cristalinas, tales como; siderita ($FeCO_3$), cementita (Fe_3C) y algunos óxidos de hierro (FeO, Fe_2O_3 y Fe_3O_4) están presentes, por lo cual se obtiene la menor velocidad de corrosión tal como se muestra en la Figura 4. Este comportamiento se atribuye a que la siderita se encuentra en mayor proporción, siendo este un producto de corrosión más protector [4,5].

Para el difracto para acabado pulido a espejo, los productos de corrosión muestran que la formación de la Siderita ($FeCO_3$) no se lleva a cabo, porque predominan los óxidos superficiales (FeO y Fe_2O_3)

con mayor intensidad y por ende se tiene el incremento de la velocidad de corrosión debido a que los óxidos son menos estables que los carbonatos.

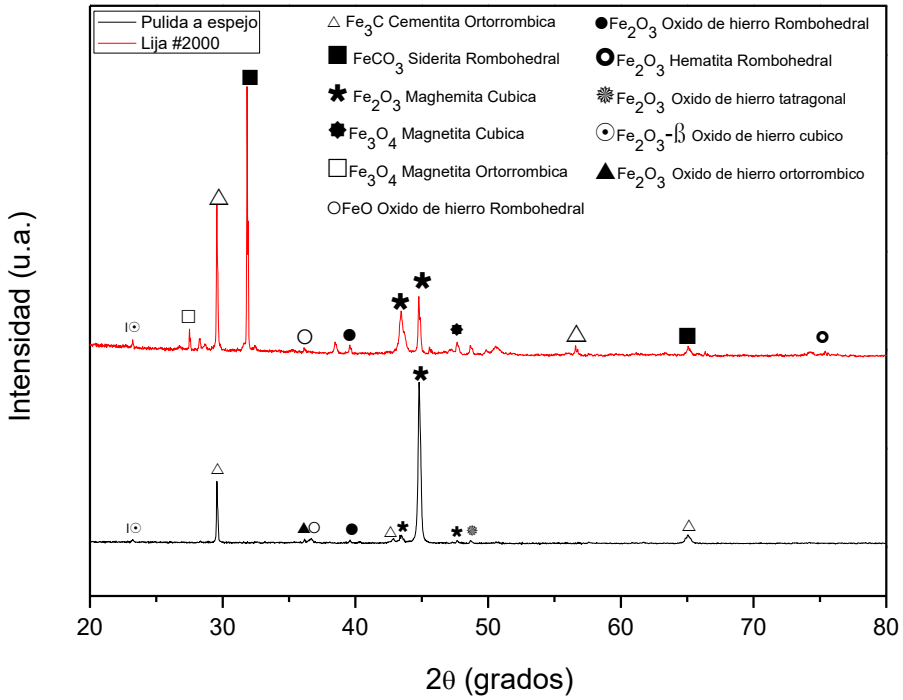


Figura 6. Patrones de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en el material bimetálico para un ángulo de 30° con acabado de lija #2000 y pulido a espejo.

En la Figura 7 se muestran las imágenes usadas en la caracterización superficial del cupón con acabado superficial a lija #2000 con un ángulo de impacto 30°, el cual corresponde a la más baja velocidad de corrosión de los tres ángulos con acabado a lija #2000. La Figura 7a muestra la imagen óptica del cupón después de la prueba experimental, en esta se observa una diferencia de colores entre los componentes del cupón bimetálico, la zona del inconel muestra una coloración gris con zonas rojizas mientras que en el acero API se aprecian los colores rojo y café los cuales probablemente corresponden a óxidos (FeO) y a la siderita respectivamente, además el color negro se atribuye a la cementita (Fe_3C.

En la Figura 7b (imagen topográfica) se observa una capa de productos de corrosión depositados en ambas zonas y además no es visible la interface. Adicionalmente en la imagen 3D se puede apreciar por diferencia de alturas los productos de mayor tamaño. El anclaje de los productos de la corrosión se vio favorecida por los surcos generados por el lijado lo cual genera la pasivación de la superficie del material.

La Figura 7c muestra la imagen 2D donde se observa un color azul las cuales se puede atribuir a que no se depositaron productos en dichas zonas y se vuelve porosa la capa de los depósitos, las zonas rojas (picos) están localizadas de manera no uniforme.

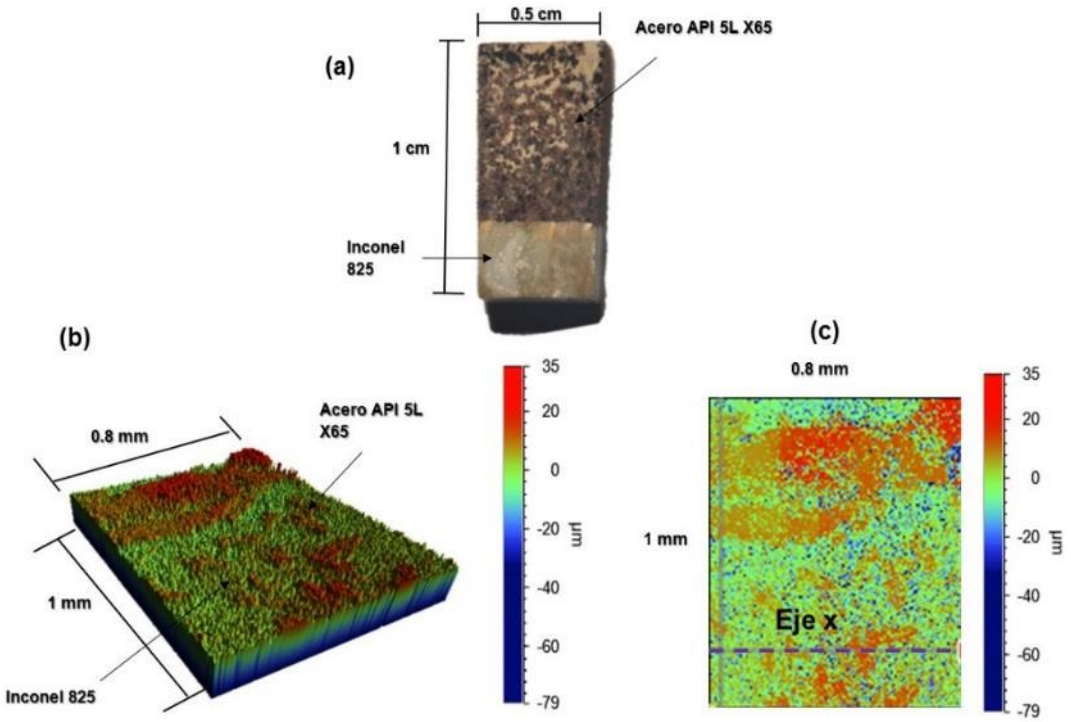


Figura 7. Caracterización por perfilometria óptica del material bimetálico desbaste a lija #2000 con corrosión ángulo de 30°(a) imagen óptica del cupón completo tomada en estereoscopio (b) Topografía 3D de superficie en un área de 0.8 x 1 mm tomada en la interface del material (c) Imagen 2D en un área de 0.8 x 1 mm.

CONCLUSIONES

Se observa que los productos de corrosión más adherentes y protectores resultaron ser la cementita (Fe_3C) y la siderita ($FeCO_3$) debido a que la velocidad de corrosión disminuye de manera considerable en presencia de ambos.

La velocidad de corrosión disminuye a medida que se incrementa la rugosidad de la superficie del material bimetálico (lija #2000), especialmente para los ángulos de 30° y 60° debido a que la película de los productos de corrosión resultaron ser más densos y uniformes.

De los resultados obtenidos mediante perfilometria óptica se corrobora que a mayor rugosidad del material bimetálico la velocidad de corrosión disminuye especialmente para los ángulos de 30° y 60°debido a la formación de valles y crestas que se forman sobre la superficie.

REFERENCIAS

[1] T. Banweg, “Flow accelerated corrosion in industrial boiler feed water systems: A technological survery,” Canada: pulp and paper, 2000.

[2] N. Srdjan, “Using computational fluid dynamics in combating erosion-corrosion,” Chem Eng, 2006.

[3] V. Kain, «Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies, Procedia Engineering, vol. 86.

[4] L. Morfeo, E. Maria da Costa, J. J. d. O. Andrade, R. Hubler and B. Huet, "Effect of calcium carbonate on low carbon steel corrosion behavior in saline CO_2 high pressure environments," *Applied Surface Science,* vol. 359.

[5] L. R. Moretto Ferreira, H. Araujo Ponte and L. Schmidlin Sanches, "CO_2 Corrosion in the Region Between the Static and Turbulent Flow Regimes," *Materials Research,* vol. 18, no. 2.

ESTUDIO DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DEL RÍO CATA, GUANAJUATO: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Berenice Noriega Luna, Ma. Guadalupe Medina Mejía, Alma Hortensia Serafín Muñoz, María Fernanda Mares Lira, Paola Granados López, Karen Aurora Palacios Alvarado y Fernando Huerta Martínez

Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@ugto.mx

RESUMEN

La acumulación de metales pesados en ecosistemas acuáticos provoca graves impactos en el medio ambiente. Particularmente, la actividad minera afecta la superficie terrestre, los suelos, el agua superficial y los acuíferos subterráneos, además de contaminar el aire. Esta situación genera alteraciones significativas en el microclima, la flora, la fauna y la salud de las personas. En este estudio se analizó el Río Cata, ubicado en el municipio de Guanajuato, fuertemente afectado por la actividad minera, alfarera y descargas de aguas residuales urbanas. El objetivo fue determinar la presencia de metales como hierro (Fe), cromo (Cr), plomo (Pb) y cobre (Cu) en muestras de sedimentos del río. Se realizó la caracterización de los principales componentes de los sedimentos (carbonatos, silicatos, materia orgánica, pH y conductividad), y la determinación de metales se llevó a cabo mediante espectrofotometría de absorción atómica. Se detectó la presencia de cobre, cromo y hierro, lo que sugiere la influencia de la actividad minera, actividades antropogénicas y factores geológicos naturales en el área. Destaca un alto porcentaje de materia orgánica y silicatos, un pH alcalino y un bajo contenido de carbonatos entre los componentes mayoritarios encontrados.

INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados en los sedimentos de los ríos representa una preocupación ambiental creciente, con implicaciones significativas para la salud pública y la biodiversidad acuática. Estos elementos tóxicos, provenientes tanto de fuentes naturales como antropogénicas, plantean desafíos ambientales que requieren atención urgente y acciones correctivas para proteger nuestros ecosistemas acuáticos y la salud de las comunidades cercanas. Los sedimentos de los ríos actúan como reservorios de metales pesados, como el cromo, plomo, cobre y hierro, que se acumulan a lo largo del tiempo debido a la deposición y la adsorción en las partículas sedimentosas. La liberación de estos metales en las aguas superficiales puede ocurrir por diversos factores, como cambios en las condiciones ambientales o actividades humanas como la minería, la industria y la agricultura.

TEORÍA

La mayoría de los metales pesados tienden a acumularse y adherirse a las partículas de los sedimentos, siempre y cuando los parámetros físico-químicos del agua y los sedimentos se mantengan estables. Aunque los metales pesados tienen baja solubilidad, una vez que ingresan a los ríos, se diluyen rápidamente y son transportados a lo largo de cientos de kilómetros por los flujos de agua, depositándose finalmente en los sedimentos del fondo. Sin embargo, bajo ciertas condiciones favorables, los metales pesados presentes en los sedimentos pueden liberarse en el agua superficial y entrar en la cadena alimentaria, representando un riesgo para la salud humana a través de la ingesta de alimentos contaminados. Por lo tanto, el análisis de los sedimentos puede ser utilizado como una herramienta para detectar niveles de contaminación histórica y reciente en áreas cercanas, y también como indicadores de la contaminación en general [1,2,3,4].

La bioacumulación de metales pesados en los sedimentos representa un riesgo para los organismos acuáticos y, en última instancia, para los seres humanos que dependen de estos ecosistemas para su sustento. La exposición a altos niveles de metales pesados puede tener consecuencias devastadoras para la salud, incluyendo efectos adversos en el sistema nervioso, el sistema cardiovascular y el sistema respiratorio [5].

La adsorción de metales es un proceso competitivo entre los diferentes iones presentes en los centros activos del sedimento, y está influenciado por factores como la naturaleza de la matriz mineral, el tamaño de las partículas sedimentarias, las características físicas y químicas del medio, el pH, los procesos de difusión y mezcla, la actividad de los organismos bentónicos y la resuspensión. En realidad, los sedimentos actúan como reservorios de metales pesados y pueden liberar metales y otros contaminantes a las aguas superiores debido a procesos naturales o antropogénicos, lo que resulta en efectos adversos. Dado el papel importante de los sedimentos en el ciclo ecológico global de los metales pesados en los cuerpos de agua superficiales y su potencial para causar daños ecológicos y biológicos, el objetivo de este estudio es determinar la presencia de metales pesados como cromo, plomo, cobre y hierro en los sedimentos del río Cata, y evaluar la posible amenaza de daño por metales pesados en los sedimentos y sus efectos en las condiciones ambientales [6,7,8].

Es fundamental implementar medidas de monitoreo continuo de la calidad del agua y los sedimentos para identificar áreas de alta concentración de metales pesados y tomar acciones correctivas. La remediación de sitios contaminados, la regulación de las descargas industriales y la promoción de prácticas sostenibles en las actividades humanas son pasos cruciales para mitigar los efectos nocivos de la contaminación por metales pesados en los ecosistemas acuáticos. La presencia de metales pesados en los sedimentos de los ríos representa un desafío ambiental que requiere una respuesta coordinada y proactiva. Proteger los recursos hídricos y preservar la salud de las comunidades que dependen de ellos es una responsabilidad compartida que se debe abordar con seriedad y compromiso. Este trabajo corresponde al primer estudio desarrollado en el río Cata con el objetivo de determinar la presencia de sedimentos y la capacidad de éstos como reservorios de metales pesados [9.10].

PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudio. El río Cata se encuentra ubicado entre las calles de San Clemente y Dos Ríos. Recorre una distancia considerable antes de desembocar en el Río de Guanajuato, y finalmente en el Río Lerma. Este río es subterráneo y se caracteriza por tener un clima semiárido, con una temperatura promedio anual de 18 a 20°C. Los veranos son cálidos y secos, mientras que los inviernos son moderados. La precipitación anual en esta zona es relativamente baja, oscilando entre 400 y 650 mm/año.

En las cercanías del río Cata se encuentran diversos comercios, así como actividades industriales, mineras y de alfarería. Estas actividades, junto con las descargas de aguas residuales sin tratar o tratadas de manera inadecuada, contribuyen a la contaminación del río. El municipio de Guanajuato se destaca en la región por ser un centro minero de alta actividad, debido a su ubicación geográfica y a la presencia de cerros y montañas. En la zona donde se encuentra el río Cata, se localiza la empresa minera canadiense Great Panther Silver, la cual se encarga del procesamiento de minerales. En el año 2015, se produjo un derrame de 1,200 galones de lodos residuales provenientes del depósito de material de desecho de la mina, que afectó al río Cata.

Además de estos factores, es importante mencionar que existe un tramo de aproximadamente un kilómetro y medio del río que es visible y accesible para cualquier persona. Desafortunadamente, este tramo está contaminado debido a la acumulación de basura, tanto de forma directa como indirecta. Durante las lluvias, la basura se arrastra hacia el río, agravando el problema. Aunque el tránsito vehicular en esta área no es elevado, la presencia de vehículos contribuye a la contaminación del río (Figura 1).

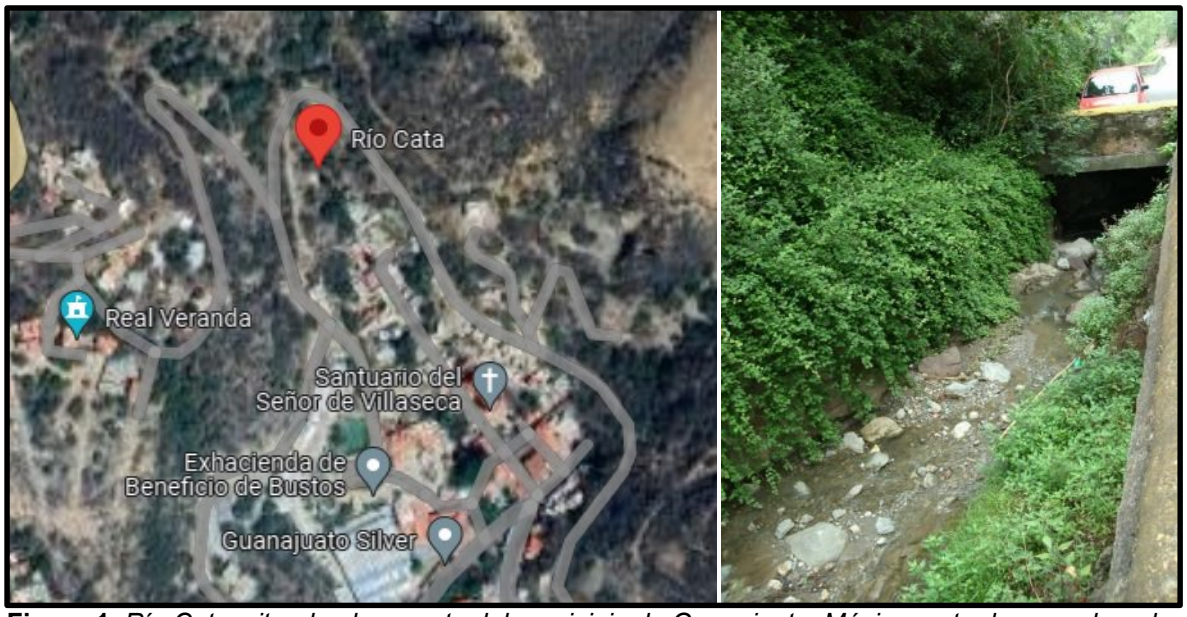


Figura 1. *Río Cata, situado al suroeste del municipio de Guanajuato, México, entre las coordenadas 21.035033726536426, -101.25280306330698.* Fuente: Google maps.

Toma de muestras. Se recolectaron muestras manualmente en 9 puntos a lo largo del curso del río Cata, las cuales fueron homogeneizadas inmediatamente después de la recolección. Estas muestras se almacenaron en posición vertical en bolsas de polietileno con cierre hermético y se cubrieron con bolsas plásticas negras para su transporte a una temperatura de 4°C. Una vez en el laboratorio, las muestras se secaron a 40°C durante 24 horas. Posteriormente, se trituraron en un mortero y se tamizaron utilizando un colador de Nylon con tamaños de poro de 60 y 70 µm, para luego ser almacenadas en bolsas con cierre hermético.

Caracterización de Sedimentos:

a) ***Carbonatos:*** Se tomaron 0.5 gramos de sedimento y se agregaron 25 ml de HCl 0.5N y 20 ml de agua desionizada. Las muestras se calentaron durante 3 minutos, se enfriaron y se tituló el exceso de ácido con NaOH 0.25N para estimar el porcentaje de carbonatos.

b) ***Silicatos:*** Se pesó 1 gramo de sedimento y se añadieron 20 ml de la mezcla HCl : H_2O 1:1. Las muestras se colocaron en un baño de arena a 110°C durante 24 horas. Luego, se agregaron 20 ml más de HCl : H_2O 1:1 y se mantuvieron durante 10 minutos adicionales en el baño de arena. Posteriormente, se añadieron 20 ml de agua desionizada, se filtró y se calcinó el papel filtro a 1050°C para estimar el porcentaje de silicatos.

c) ***Materia Orgánica:*** Se pesó 1 gramo de sedimento que se calcinó a 550°C. Después de enfriar, se estimó el porcentaje de materia orgánica.

d) ***pH y Conductividad:*** Se utilizaron 0.5 gramos de sedimento y se agregaron 20 ml de agua desionizada. Tras agitar durante 10 minutos y reposar otros 10 minutos, se midió el pH y la conductividad con un potenciómetro Ohaus modelo Starter 3100 y un conductímetro YSI modelo 35.

e) ***Concentración de Metales:*** Para el análisis de cromo, cobre, hierro y plomo, se realizó la digestión ácida en un horno de microondas Titan MPS de Perkin Elmer. Se tomaron 0.5 g de muestra, se añadieron 9 ml de HNO_3 al 70% y 3 ml de H_2O_2 al 30%, y la concentración

de metales se determinó en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 400.

RESULTADOS

Caracterización de los Sedimentos del Río Cata. Las muestras de sedimentos recolectadas en el río Cata fueron caracterizadas en función de sus componentes mayoritarios. Los valores de pH se encuentran en un rango de 6.86 a 9.34, siendo la muestra S1 la más ácida y la S4 la más alcalina. En cuanto a la conductividad, los valores varían entre 354.287 y 1157.814 µS/cm, siendo la muestra S8 la de menor valor y la S1 la de mayor valor. El contenido de carbonatos en los sedimentos oscila entre 6.10% y 13.78%, siendo la muestra S8 la de menor valor y la S3 la de mayor valor, lo que sugiere una disponibilidad moderada de metales.

Por otro lado, el porcentaje de silicatos se sitúa entre 28.37% y 73.69%, siendo la muestra S6 la de menor valor y la S1 la de mayor valor. En cuanto al contenido de materia orgánica, este varía entre 57.95% y 93.43%, siendo la muestra S1 la de menor porcentaje y la muestra S8 la de mayor porcentaje. El análisis estadístico reveló una baja variabilidad en los valores de los parámetros analizados en el área de estudio (Tabla 1).

Análisis de Metales y su Relación con los Componentes de los Sedimentos. En el análisis de las muestras de sedimentos, se evaluó la presencia de los metales cobre, plomo, hierro y cromo utilizando la técnica de absorción atómica por flama. Se observó que en la muestra S1 están presentes los tres metales, a diferencia de las demás muestras donde los valores de concentración son más bajos para el cobre (Gráfica 1). En el caso del plomo, no se detectó su presencia bajo esta técnica. Además, los valores de hierro son superiores a 3 ppm (Tabla 2).

Se observó que en las muestras de sedimento con valores de pH superiores a 7, la biodisponibilidad de los metales disminuye debido a la formación de complejos con los minerales presentes. Del mismo modo, se encontró que la presencia de altos porcentajes de materia orgánica está asociada con una disminución significativa en la biodisponibilidad de los metales, gracias al intercambio iónico entre los grupos superficiales presentes en la materia orgánica, como los grupos hidroxilo (OH^-) y carboxilo (COO^-) presentes en los ácidos húmicos y fúlvicos.

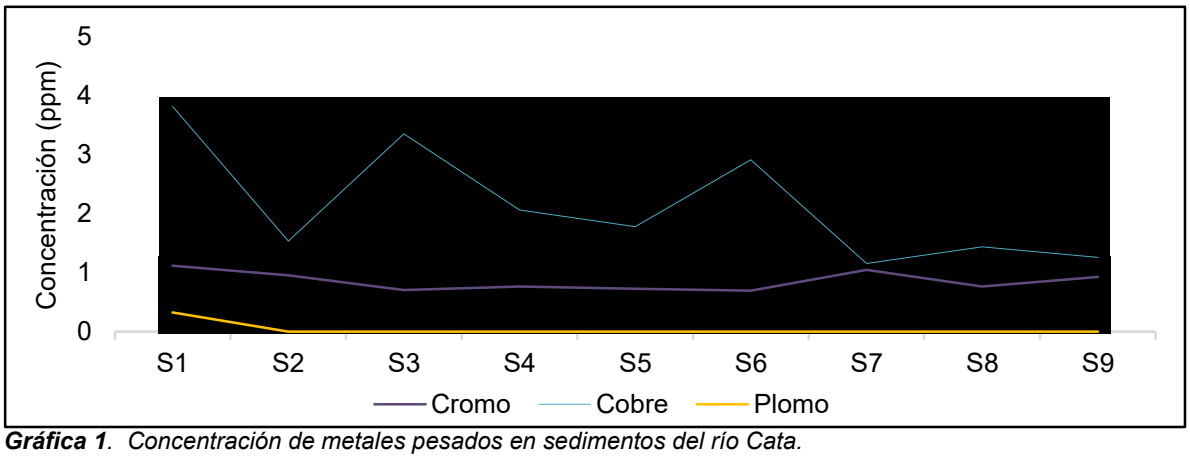
En el análisis de los metales, se observó que el cobre se encuentra en concentraciones superiores a 1 ppm, lo cual puede ser resultado de su presencia tanto natural como antropogénica, especialmente en los drenajes ácidos de las minas. Por último, aunque el plomo no se encuentra de forma natural en los sedimentos, se detectó en una de las muestras, posiblemente debido a la influencia de vehículos que transitan en la zona. Es importante destacar la relevancia de estos hallazgos para comprender la presencia y distribución de metales en los sedimentos del río Cata y sus posibles fuentes de contaminación.

Tabla 1. *Análisis de componentes mayoritarios de los sedimentos muestreados en el río Cata.*

Muestra	pH	Conductividad (µS/cm)	Carbonatos (%)	Silicatos (%)	MO (%)
S1	6.86	1157.814	7.53	73.69	57.93
S2	7.14	371.644	8.97	37.93	90.49
S4	7.03	1147.604	13.78	54.16	73.82
S5	9.34	487.017	8.41	52.07	84.74
S6	7.33	1136.373	6.10	62.14	59.33
S7	7.61	1053.672	13.69	28.37	91.14
S8	7.62	901.543	12.19	32.12	88.15
S9	7.97	354.287	6.45	31.75	93.43
Media	**7.61**	**826.24**	**9.64**	**46.53**	**79.88**
σ	**0.7856**	**360.8054**	**3.1434**	**16.4755**	**14.4212**

Tabla 2. *Concentración de metales en ppm de los sedimentos muestreados en el río Cata.*

Muestra	Cromo (ppm)	Cobre (ppm)	Plomo (ppm)	Hierro (ppm)
S1	1.114	3.8136	0.3231	>3
S2	0.952	1.5337	ND	>3
S3	0.705	3.3490	ND	>3
S4	0.762	2.0578	ND	>3
S5	0.724	1.7773	ND	>3
S6	0.690	2.9076	ND	>3
S7	1.043	1.1507	ND	>3
S8	0.762	1.4351	ND	>3
S9	0.924	1.2550	ND	>3
Media	**7.61**	**826.24**	**---**	**---**
σ	**0.7856**	**360.81**	**---**	**---**



Gráfica 1*. Concentración de metales pesados en sedimentos del río Cata.*

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis realizados revelan que los sedimentos de la zona están impactados por la presencia de metales pesados, los cuales son resultado de actividades antropogénicas como la minería, actividades de alfarería y descargas de aguas residuales urbanas. Se observó que los metales analizados se encuentran en concentraciones moderadas y elevadas, destacando una mayor presencia de cobre en comparación con cromo y plomo. Es importante señalar que tanto el cobre como el plomo son elementos presentes de forma natural en las plantas. La detección de plomo en una muestra específica sugiere su origen antropogénico en el área de estudio. Por otro lado, los valores de pH de las muestras de sedimento son superiores a 7, lo que indica una reducción en la biodisponibilidad de los metales debido a la formación de complejos con los minerales presentes. Además, la alta concentración de materia orgánica contribuye significativamente a disminuir la biodisponibilidad de los metales mediante el intercambio iónico entre los grupos superficiales presentes en la materia orgánica, principalmente los grupos hidroxilo (OH-) y carboxilo (COOH). Esta caracterización detallada de la presencia de metales pesados y su interacción con los componentes de los sedimentos en el río Cata resalta la importancia de monitorear y gestionar adecuadamente las fuentes de contaminación para preservar la calidad del ecosistema acuático y la salud pública en la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bing, H., Zhou, J., Wu, Y., Wang, X., Sun, H., & Li, R. (2016). Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution*, *214*, 485-496.
2. Bryan, G. W., & Langston, W. J. (1992). Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental pollution*, *76*(2), 89-131.
3. Davidson, C. M., Thomas, R. P., McVey, S. E., Perala, R., Littlejohn, D., & Ure, A. M. (1994). Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments. *Analytica Chimica Acta*, *291*(3), 277-286.
4. De Groot, A. J., Zschuppel, K. H., & Salomons, W. (1982). Standardization of methods of analysis for heavy metals in sediments. *Hydrobiologia*, *91*, 689-695.
5. Facetti, J., Dekov, V. M., & Van Grieken, R. (1998). Heavy metals in sediments from the Paraguay River: a preliminary study. *Science of the total environment*, *209*(1), 79-86.
6. Hseu, Z. Y., Chen, Z. S., Tsai, C. C., Tsui, C. C., Cheng, S. F., Liu, C. L., & Lin, H. T. (2002). Digestion methods for total heavy metals in sediments and soils. *Water, air, and soil pollution*, *141*, 189-205.
7. Liu, J., Li, Y., Zhang, B., Cao, J., Cao, Z., & Domagalski, J. (2009). Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water. *Ecotoxicology*, *18*, 748-758.
8. Peng, J. F., Song, Y. H., Yuan, P., Cui, X. Y., & Qiu, G. L. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of hazardous materials*, *161*(2-3), 633-640.
9. Soliman, N. F., Nasr, S. M., & Okbah, M. A. (2015). Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *13*, 1-12.
10. Wakida, F. T., Lara-Ruiz, D., Temores-Pena, J., Rodriguez-Ventura, J. G., Diaz, C., & Garcia-Flores, E. (2008). Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico. *Environmental Geology*, *54*, 637-642.

DESARROLLO DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE CONTAMINANTES ORIENTADO A MICROPLASTICOS

M. de la Luz Medina-Huerta, J. Ascención Guerrero-Viramontes, Edgar Josué Camargo-Pedraza, Ma. Rosario González-Mota.

TecNM / Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
luzmedinah@outlook.es

RESUMEN

Los microplásticos (MPs), diminutas partículas de menos de 5 mm, representan un desafío global que demanda una acción inmediata. Estos contaminantes se distribuyen en diversos medios como el aire, agua, suelo y biota, teniendo un impacto negativo en los organismos expuestos. Su presencia se detecta en productos de consumo cotidiano como alimentos, artículos de cuidado personal y suministros de agua potable. A pesar de que el análisis visual es una técnica accesible, el proceso de preparación de muestras es extenso y propenso a errores humanos. En respuesta a esta problemática, el proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema óptico de detección para la adquisición de imágenes de alta calidad, con el fin de facilitar su análisis y procesamiento subsiguiente. Esta iniciativa asegura que las imágenes obtenidas sean óptimas para su posterior evaluación mediante técnicas de procesamiento de imágenes. La investigación se centra en la caracterización de cámaras y fuentes de iluminación específicamente para este propósito. Se realizaron mediciones del ruido asociado con la captura de imágenes utilizando diversos tipos de cámaras: Web, Industrial, Celular y Profesional, junto con diferentes fuentes de iluminación: LED RGB, LED azul, Laser azul e incandescente. Se estableció que el empleo de una cámara RaspberryPi High Quality en combinación con una fuente de iluminación LED azul produce un menor nivel de ruido en las imágenes. Además, mediante la comparación de los espectros de emisión de las fuentes de iluminación utilizadas con el espectro de emisión del colorante rojo de Nilo, empleado en métodos de tinción para la detección de microplásticos, se confirmó que el LED azul es la fuente de iluminación más adecuada para el sistema propuesto.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción masiva y el mal manejo de residuos plásticos ha magnificado la acumulación de plásticos en diferentes ecosistemas, que al degradarse se convierten en MPs, que en ocasiones son difícil de visualizar por el ojo humano, pero fácilmente transportables por el viento y el agua, causando daños graves tanto al medio ambiente como a los seres vivos que están expuestos a ellos. Omnipresencia de microplásticos (MPs) ha hecho que se consideren un contaminante emergente y con ello ha surgido la necesidad de su detección en distintos medios como el agua, ya que fungen como reservorio para estos. A fin de poder estudiar este fenómeno, se necesita desarrollar sistemas de detección óptica, como lo es la captura de imágenes de los MPs en muestras acuosas a fin de poder realizar un análisis de la presencia y cantidad de estos. Estos métodos ópticos son una alternativa viable para poder visualizarlos y adquirir imágenes para su posterior estudio [1-3]. Es fundamental, entonces, realizar un análisis del ruido presente en las imágenes capturadas por diferentes cámaras digitales, así como en las diversas fuentes de iluminación a fin de comparar y así elegir la mejor alternativa tomando en cuenta las condiciones de las muestras. Los MPs utilizados son de polietileno tereftalato. Una de sus características es la transparencia por lo que para el análisis de muestras a fin de facilitar su procesamiento y detección se ha utilizado el tintado con rojo de Nilo ya que, al añadirse a la superficie de las moléculas orgánicas, se hace fluorescente al irradiarle luz azul.[4-6]

TEORIA

Microplásticos

A mediados del siglo XX la producción de plásticos comenzó a tener un gran auge y desde entonces ha crecido exponencialmente, ya que los plástico son un material de bajo costo, capaz de ser moldeado para remplazar productos de muchos materiales como la madera, el papel, la piel, el metal, entre otros, su uso sigue siendo esencial para la vida cotidiana por su gran aplicación; sin embargo, debido a esto y otros factores, como su gran persistencia en el medio ambiente y el mal manejo de los residuos, se han acumulado en ecosistemas terrestres y acuáticos donde se degradan y poco a poco se convertirse en MPs. Por otro lado, existen una gran variedad de plásticos comúnmente usados y se caracterizan principalmente por sus grandes cadenas de carbono, los tipos de plástico más comúnmente usados son: Polietileno de baja densidad (LDPE), Polietileno (PE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Poliestireno (PS), Poliestireno de alto impacto (HIPS), Cloruro de Polivinilo (PVC), Polipropileno (PP), Poliamidas (PA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Policarbonato (PES), Tereftalato de polietileno (PET); algunos de estos por sus características físicas son transparentes o altamente cristalinos y al presentarse en pequeñas partículas son difícilmente detectables.

Como se ha venido comentando, los MPs se definen como partículas de menos de 5mm provenientes de distintos materiales plásticos que son materiales poliméricos que pueden contener otras sustancias como aditivos para mejorar su rendimiento y reducir costos de producción [4-5].

Clasificación de MPs

La clasificación de los Mps proviene principalmente de su fuente de obtención, ya sea que provengan de la degradación de plásticos de mayor tamaño o sean fabricados específicamente con tamaños pequeños [4-5].

MPs primarios: Los MPs primarios han sido fabricados originalmente de un tamaño menor a 5mm, para incorporarlos usualmente a productos comerciales farmacéuticos, del cuidado de la piel, retardantes de fuego, pinturas, etc.; además, se han encontrado en altos niveles de concentración en ríos y lagos en la mayoría de los continentes [6].

MPs secundarios: Provienen de la degradación y ruptura de plástico de mayor tamaño cuando son expuestas a procesos degradativos que ocasionan la reducción de tamaño y ocasionan cambios físicos y químicos [5].

MPs en el ambiente

La acumulación de los MPs en los ecosistemas es generada por las grandes cantidades de desechos plásticos derivados de fuentes antropogénicas, debido a que existe una dependencia a la utilización de productos desechables, su acumulación en el medio ambiente se ha ido incrementando; además, su vida media es muy larga por la estabilidad de las largas cadenas poliméricas que los componen. En todos los ecosistemas se han encontrado MPs, entre más pequeño es el tamaño de partícula es más difícil su detección y más riesgoso para los organismos y para el equilibrio ecológico ya que se vuelven biodisponibles para pequeños y grandes organismos que llegan a tener afectaciones como bioacumulación e incluso toxicidad por los aditivos o sustancias añadidas. En los últimos años, el transporte de los MPs se ha analizado para tratar de entender el comportamiento de las partículas y su relación con la contaminación, se ha determinado que el viento, las corrientes de agua e incluso los organismos pueden transportar los MPs y depositarlos en distintos medios [7].

Técnicas ópticas

La óptica es la rama de la física que estudia la luz y su naturaleza, su comportamiento, propiedades e interacciones con la materia, la luz se define como radiación electromagnética visible, infrarroja y ultravioleta. Los sistemas ópticos al cumplir ciertas limitaciones de los haces de luz que inciden en ellos revelan una imagen en un plano; el ojo según su estructura es una analogía a los aparatos fotográficos, por lo que el mecanismo del ojo humano es la base de los instrumentos ópticos [3,8,9].

Fuentes de iluminación

Las fuentes de iluminación son muy diversas y con distintas características que pueden incluir el color, eficiencia luminosa y su manera de producir luz, estas fuentes son necesarias para obtener una imagen adecuada de un objeto, ya que la intensidad y la luz emitida son clave en los sistemas de visión [8,10].

Cámaras Fotográficas

Las cámaras fotográficas son una herramienta óptica utilizadas para capturar imágenes, se trata de una caja cerrada a la luz que contiene un lente convergente que produce una imagen real y la transmite a una película o tarjeta de almacenamiento. El instrumento más común para la visión artificial es la cámara digital, esta es una cámara fotográfica que instantáneamente captura y resguarda fotos, sus sensores limitan la resolución; las características esenciales de la cámara fotográfica son el obturador, lente, abertura de lente y medio de almacenamiento. La resolución de una imagen generalmente se conoce como la cantidad de píxeles de alto por la cantidad de pixeles de ancho en una fotografía digital, un pixel representa un bloque básico de construcción de todas las imágenes, el tipo de resolución está dada por la respuesta de millones de pixeles de un sensor a la luz a la que se expone; la calidad de imagen más que la cantidad de pixeles es establecida por el tamaño, calidad y fabricación del sensor; los pixeles solo responden a una limitada longitud de onda y un color de filtro rojo, verde o azul. [3,11,12].

METODOLOGÍA

Sistema óptico de detección

Se determinó que el sistema óptico debe contar con una cámara de alta resolución para tomar imágenes con precisión, una fuente de iluminación avanzada para capturar los detalles con claridad, una porta celdas diseñada para sostener las muestras de manera estable, y una base sólida con soportes ajustados para asegurar que todos los dispositivos funcionen bien juntos.

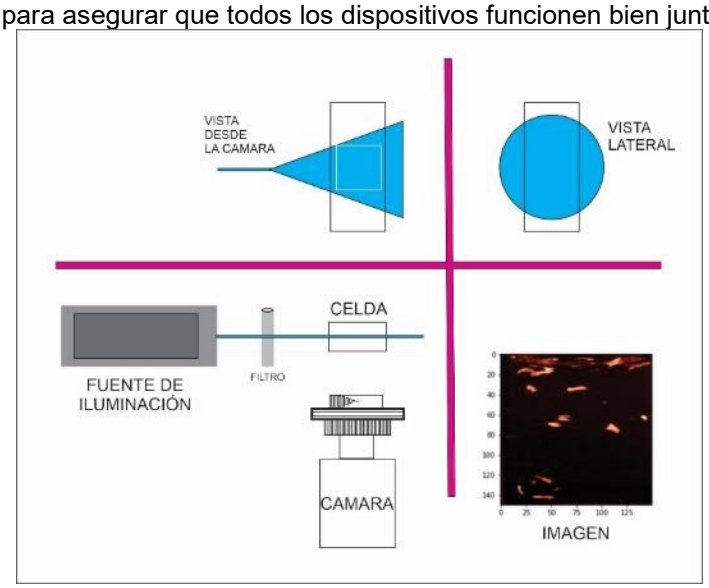


Figura 1. Arreglo óptico básico

Caracterización de sensores y determinación de fuente de iluminación

Se relacionaron las cámaras digitales y la fuente de iluminación mediante un diseño de experimentos para determinar el ruido en imágenes.

Figura 2. Cámaras utilizadas para la caracterización, Canon EOS Rebel T8i, Iphone 13 mini, Microsoft Lifecam Cinema, Raspberry Pi High Quality Camera (de izquierda a derecha).

Caracterización de sensores de imagen de cámaras digitales: Al utilizar diversos dispositivos de adquisición de imagen, se buscó encontrar el que obtuviera los mejores resultados considerando la homogeneidad de los pixeles al captar la luz. Se midió el ruido de una imagen para caracterizar los sensores.

Determinación de fuente de iluminación del sistema: La fuente de iluminación afecta directamente a la escena capturada con la cámara digital y es por lo que se relacionó con el ruido de la imagen de la caracterización de los sensores de las cámaras digitales ya que la luz que incide en el objeto es determinante para obtener una imagen de buena calidad.

Diseño de experimento

La metodología empleada en este proyecto implicó la caracterización de los sensores de las cámaras y las fuentes de iluminación, así como el análisis de sus interacciones. Para ello, se diseñó un experimento de dos factores: la cámara digital y la fuente de iluminación, cada uno con cuatro niveles, la respuesta fue el ruido, y cada una de las combinaciones contó con tres réplicas, lo que resultó en un total de 48 experimentos. Este diseño permitió explorar exhaustivamente las distintas combinaciones de cámaras y fuentes de luz, proporcionando una comprensión detallada de su desempeño y sus efectos mutuos.

Tabla 1. Diseño de experimentos de dos factores y cuatro niveles

Factores	Cámaras digitales			
Fuentes de iluminación	Web cam	Industrial	Celular	Profesional
LASER azul	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
LED azul	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
LED	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
Incandescente	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3

Tabla 2. características de cámaras digitales

Característica de las cámaras [[13], [14], [15], [16]]				
Tipo	Celular	Web	Profesional	Industrial
Marca	Apple	Microsoft	Canon	Raspberry Pi
Modelo	Iphone 13 mini	Microsoft LifeCam Cinema	CANON EOS REBEL T8i	Raspberry Pi High Quality Camera
Resolución	12 MP	5	24.1 MP	12.3 MP
Precio	13999MXN	1739.00 MXN	15999MXN	1739.00MXN

Tabla 3. características de Fuentes de iluminación

Características de fuentes de iluminación				
Tipo	Laser azul	LED azul	LED RGB	Incandescente
Modelo	SN 017	S/D	S/D	S/D
material	S/D	S/D	S/D	Halogeno
Longitud de onda	445 nm	S/D	S/D	S/D
Potencia	2.5W	12W	12W	350 W
Flujo luminoso	S/D	S/D	S/D	380 lm

S/D* Sin datos, no se obtuvieron datos del proveedor.

Escenario

La imagen patrón, empleada como escenario para la caracterización detallada de las cámaras digitales y las fuentes de iluminación, fue obtenida de un blog perteneciente a estudiantes de la Universidad de San Luis Potosí. Las cámaras fueron cuidadosamente dispuestas sobre un mismo eje, perpendicular a la imagen, para garantizar una captura uniforme y precisa. Se capturaron imágenes en el espacio de color RGB utilizando cada una de las cámaras, las cuales fueron posteriormente procesadas mediante el software ImageJ. [17].

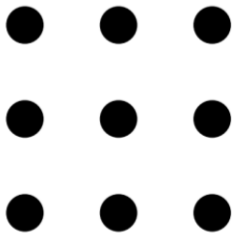


Figura 3. Imagen patrón para la determinación de ruido[17].

Respuesta (Ruido)

La obtención de ruido de imagen fue mediante cálculo de desviación estándar de valor de pixel de la imagen patrón capturada con cada una de las cámaras y las distintas fuentes de iluminación, el valor de cada pixel se obtuvo mediante el software libre imageJ pasando la fotografía a escala de grises y después seleccionando aleatoriamente pixeles con el cursor.

$$1) \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i}{N} \qquad 2) \quad \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Ecuaciones 1, 2. Para la determinación de la media (1) y la desviación estándar (2).

Análisis de resultados

El ruido fue alimentado al software Desing Expert y se analizaron los factores de fuente de Iluminación, cámara y sus interacciones Una vez completado el análisis, se obtuvo una ANOVA con los efectos principales y las interacciones de los factores, se interpretaron los resultados obtenidos y se realizaron inferencias, se concluyó si alguno de los factores o su combinación influía en el ruido de las imágenes. Se analizaron los criterios de normalidad, homocedasticidad e independencia para validar que los resultados fueran confiables.

Caracterización de los espectros
De las fuentes de iluminación: Las fuentes de iluminación fueron analizadas mediante espectroscopia para determinar su espectro de emisión y relacionarlo con el espectro de absorción del rojo de Nilo debido a que es un colorante que se adhiere en moléculas orgánicas y se han reportado resultados satisfactorios con la determinación y cuantificación de Mps en muestras. Para el uso del espectro radiómetro, se hizo una colaboración con el Centro de Investigaciones en Óptica del estado de Aguascalientes, se hizo incidir cada una de las fuentes de iluminación en el espectro radiómetro el cual nos dio a conocer las longitudes de onda que las constituyen y el espectro de cada una de ellas [18].

Del colorante rojo de Nilo: Se preparó una solución madre de 10 ppm en metanol para después hacer diluciones en agua HPLC de 0.5, 1, 1.5 y 2 ppm, estas se colocaron en celdas de cuarzo y se introdujeron en un espectrofotómetro Hach DR 5000 para obtener el espectro de emisión de cada una de las muestras. Dicho espectro se graficó con el software Excel con los datos obtenidos del espectrofotómetro.

Experimentación con el sistema óptico
Preparación de las muestras
Para determinar el par de cámara digital y fuente de iluminación para Mps tintados y no tintados se llevó a cabo experimentación en la cual se utilizaron las cámaras y las fuentes de iluminación que el diseño de experimentos y el análisis de espectros nos indicó tener los mejores resultados. En este sentido, se utilizó la Raspberry Pi High Quality Camera y el led azul. El tipo de MPs utilizados fue el tereftalato de polietileno con un tamaño de 500 micrometros. La celda que se utilizó para la preparación de muestras es de vidrio con un volumen total de 4 mL, con medidad de 1x1x4 cm.

Preparación de muestras de Mps tintados: Se tintaron los Mps con una solución de rojo de Nilo en 1ppm en agua HPLC y se dejaron repopsar por 24 hrs, a la celda se añadieron 3.5 ml de agua HPLC y 10 MPs tintados, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.
Preparación de muestras de Mps no tintados: A la celda se añadieron 3.5 ml de agua HPLC y 10 MPs, se selló la celda con Parafilm y se protegió de la luz ambiental.

Captura de imágenes
Cada celda se posicionó en una porta celdas con la cámara al frente con una distancia de 20 cm y la fuente de iluminación a un cotado de esta con una distancia de 2 cm, formado un ángulo de 90º entre la cámara y la fuente de iluminación, para las muestras tintadas se adicionó un filtro naranja después del lente de la cámara, la captura de la imagen se dio después de agitar la celda con la muestra y colocarla en la porta celdas.

RESULTADOS

La ANOVA resultante (Ver tabla 4) nos indica que existe una diferencia significativa entre las medias y por lo tanto que el efecto de cada uno de los factores y sus combinaciones afectan al ruido obtenido en la imagen.

Tabla 4 ANOVA de cámaras, Fuentes de iluminación y sus combinaciones (recuperado de Desing Expert).

ANOVA for selected factorial model Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	p-value Prob> F	
Model	16083.75	15	1072.25	69.91	<0.0001	significant
A-CAMARA	5435.43	3	1811.81	118.13	<0.0001	
B-ILUMINACION	7632.21	3	2544.07	165.87	<0.0001	
AB - NTERACCION	3016.11	9	335.12	21.85	<0.0001	
Pure Error	490.8	32	15.34			
Cor Total	16574.55	47				

Se analizaron los criterios de normalidad, homocedasticidad e independencia (ver figura 4) para validar el análisis de los datos, se puede observar que cumple con los criterios por lo tanto podemos determinar con certeza que nuestros resultados son válidos.

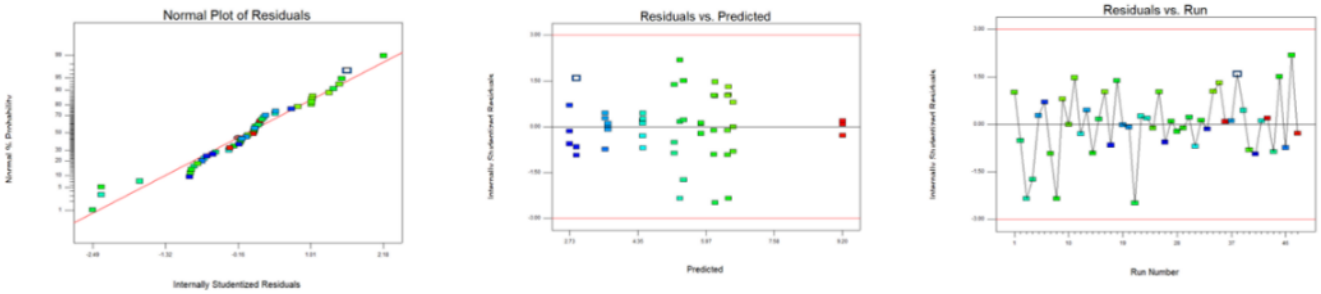


Figura 4 Criterios de: Normalidad (Izquierda), Homocedasticidad (Centro), Independencia (Derecha)

Al observar el grafico de ruido (ver figura 5) podemos darnos cuenta de que los valores más bajos de ruido fueron obtenidos por la cámara industrial y el led azul, mediante el diseño se buscaba encontrar la interacción con la que se obtuvieran las imágenes de mejor calidad, esto nos indica que al utilizar la combinación entre cámara industrial (RaspberryPi High Quality Camera) y led azul podemos obtener imágenes con el menor ruido en comparación con las otras combinaciones.

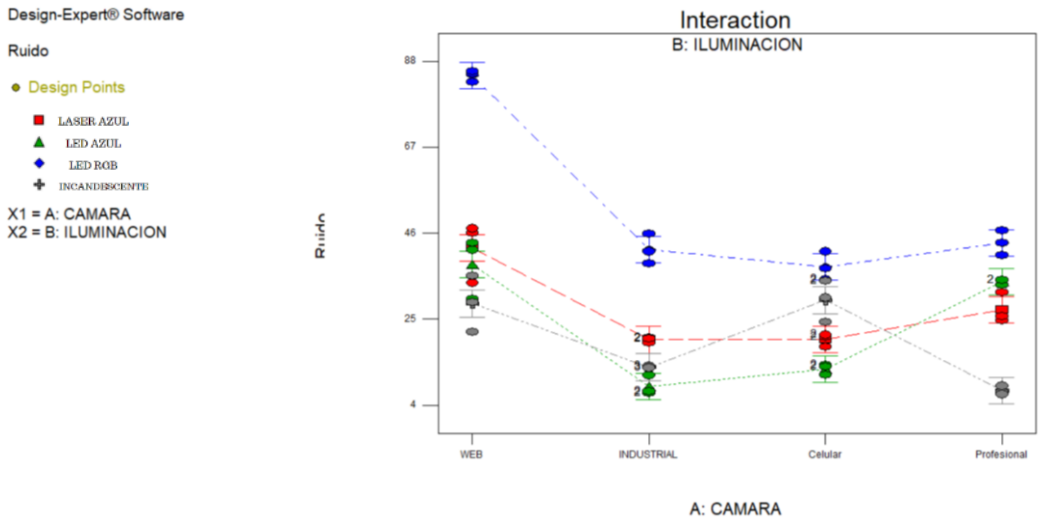


Figura 5. Gráfico de ruido de los factores y sus combinaciones (Recuperado de Desing Expert)

Al comparar los espectros de emisión de las fuentes de iluminación (figura 6) con el espectro de absorción del Rojo de Nilo (figura 7) podemos notar que el led azul tiene una banda con un pico máximo que se ajusta más al espectro de emisión del Rojo de Nilo.

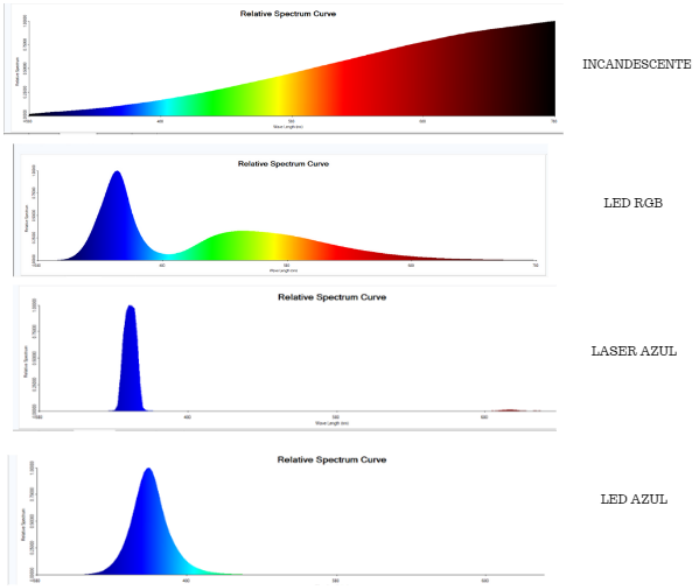


Figura 6. Espectros de emisión de fuentes de iluminación

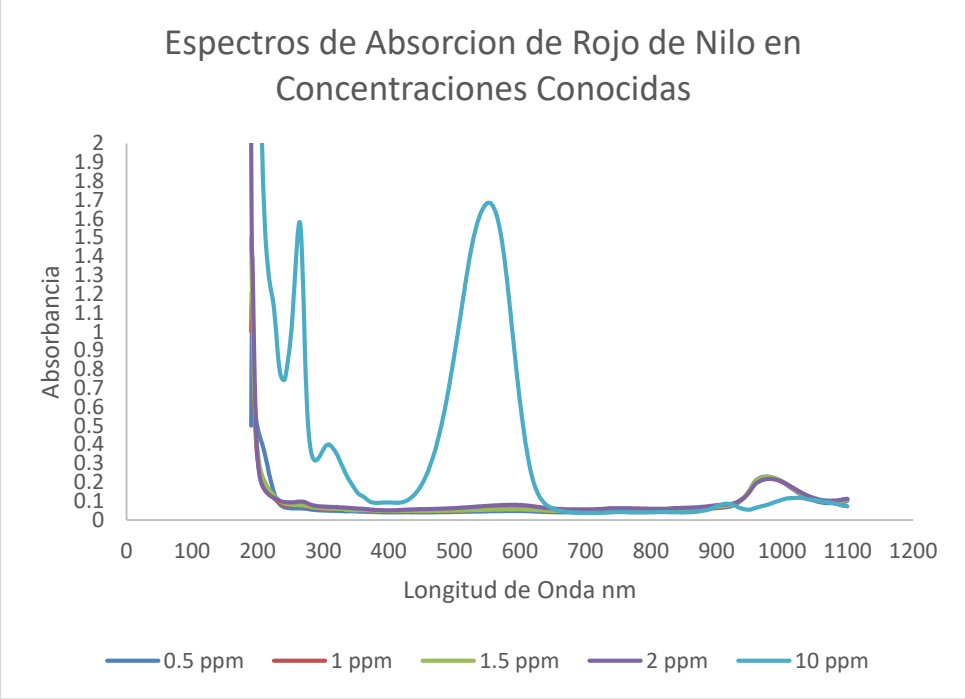


Figura 7. Espectros de absorción de rojo de nilo en concentraciones conocidas

Se puede observar en la figura 8 las imágenes obtenidas con el sistema óptimo (ver figura 9) para obtener imágenes de buena calidad, se hicieron varias pruebas preliminares y mediante un análisis visual se determinaron los ajustes que debían hacerse al sistema, se utilizó un lente variofocal de 6 a 60 mm, la distancia entre la celda y el sensor de la Cámara son 20 cm y el led está posicionado perpendicularmente a la cámara a 2cm de distancia de la celda, este arreglo nos permite obtener imágenes claras en las que se pueden apreciar fácilmente los microplásticos e incluso se distingue su forma.

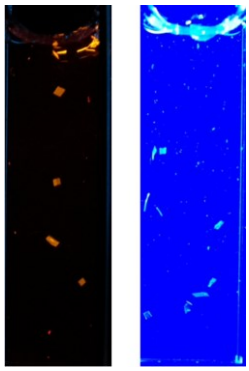


Figura 8. Imágenes obtenidas con el sistema óptico de MPs tintados (izquierda). MPs no tintados (derecha)

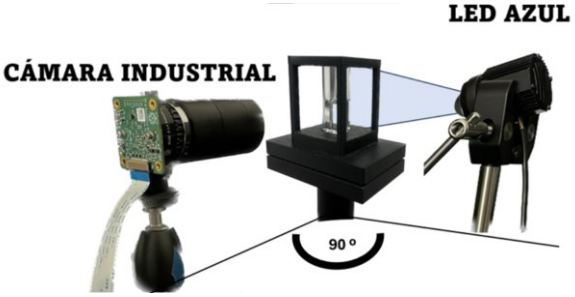


Figura 9. Arreglo óptimo

CONCLUSIONES

Al utilizar la cámara Raspberry Pi en combinación con un led azul como fuente de iluminación, se obtienen imágenes adecuadas para su posterior procesamiento. Este proceso de selección garantiza que los componentes del sistema proporcionen imágenes de alta calidad, listas para ser procesadas posteriormente por medio de algoritmos de inteligencia artificial. Además, este enfoque nos permite optimizar los costos sin comprometer la calidad visual de las imágenes.

REFERENCIAS

[1] A. L. Andrady, "The plastic in microplastics: A review," *Mar Pollut Bull*, vol. 119, no. 1, pp. 12–22, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2017.01.082.
[2] W. J. Shim, S. H. Hong, and S. E. Eo, "Identification methods in microplastic analysis: A review," *Analytical Methods*, vol. 9, no. 9, pp. 1384–1391, Mar. 2017, doi: 10.1039/C6AY02558G.
[3] R. G. González-Acuña, H. A. Chaparro-Romo, and I. Melendez-Montoya, *Optics and Artificial Vision*. IOP Publishing, 2021. doi: 10.1088/978-0-7503-3707-6.
[4] D. E. Newton, "Plastics and microplastics : a reference handbook," p. 311.
[5] "Characterization and Analysis of Microplastics," p. i, 2017, doi: 10.1016/S0166-526X(17)30014-4.
[6] "Handbook of Microplastics in the Environment," *Handbook of Microplastics in the Environment*, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-39041-9.
[7] M. S. Bank, Ed., *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*. in Environmental Contamination Remediation and Management. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-78627-4.
[8] Malacara Daniel, *Óptica básica* , 3a edición. Fondo de Cultura Económica , 2015.
[9] G. S. Landsberg, *Óptica*. Mir, 1983.
[10] S. J. Russell and P. Norvig, *Inteligencia artificial: un enfoque moderno* , 2a. ed. ALHAMBRA, 2004.
[11] R. A. Serway, *Física* , Cuarta edición., vol. tomo 2. McGraw-Hill, 1982.
[12] Kike Arnaiz, *Fotografía desde cero* . Independiente, 2020.
[13] "Comprar iPhone 13 rosa 128gb | MacStore Online." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.macstoreonline.com.mx/apple/iphone-13/iphone478-iphone-13-rosa-128gb?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auyBhDzARIsALIo6v-PwDGBA2uIPQj1Ro_8ALat__0i04Nwzb8kd5nPj7ZLjNvI0GqifXAaAjQsEALw_wcB
[14] "Compra Microsoft LifeCam Cinema con Micrófono, USB 2.0, Negro H5D-00013 | Cyberpuerta.mx." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.cyberpuerta.mx/Computadoras/Webcam-Audio/Webcams/Microsoft-LifeCam-Cinema-con-Microfono-1280-x-720-Pixeles-USB-2-0-Negro.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auyBhDzARIsALIo6v9f8_mrn4qb07Cv09JDVGRMhda0OxWzaqjUbkSbmRwi-fzA4BkelQcaAlwPEALw_wcB
[15] "Cámara Canon Rebel T8i EF-S 18-55mm IS STM | Canon Tienda Online." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.tiendacanon.com.mx/es/catalogo/rebel-t8i-ef18-55mm?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6auyBhDzARIsALIo6v9xPl7DltIry8vB2ijpRIsZGPEHKnLGH8rGkIkGGPaju9XUmY6YTz0aAsA8EALw_wcB

[16] "Cámara oficial Raspberry Pi (solo cuerpo de cámara, sin lente) : Amazon.com.mx: Electrónicos." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.amazon.com.mx/C%C3%A1mara-oficial-Raspberry-Pi-cuerpo/dp/B08CVPYR3C
[17] E. Coronado, "Patrones de calibración para OpenCV – Mecatrónica UASLP." Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://mecatronicauaslp.wordpress.com/2014/03/08/patrones-de-calibracion-para-opencv/
[18] N. C. Xuan, "¿Qué es un espectrómetro? Explicación del espectrómetro UV, VIS e IR." Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://wavelength-oe.com/es/blog/what-is-a-spectrometer/

SEPARACIÓN DE PLÁSTICO Y ALUMINIO EN ENVASES DE DESHECHO TETRA BRIK EMPLEANDO UN PROCEDIMIENTO ECOLÓGICO

Nahomi Jaqueline Parra Flores[1,2], Esther Torres Santillán[1], Marco Antonio Domínguez Aguilar[2], Mayahuel Ortega Avilés[3], Selene Capula Colindres[1], Gerardo Terán Mendez[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional, [2]Instituto Mexicano del Petróleo,
[3]Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnología
estorress@ipn.mx

.

RESUMEN

Los envases Tetra brik son usados para almacenar líquidos y suelen estar formados por capas de aluminio, plástico y cartón. Debido a su estructura multi-material es difícil su separación y los envases desechados suelen depositarse en vertederos, ocasionando una contaminación de los suelos y aguas, a pesar de que se podría reciclar tanto la parte metálica como la polimérica [1]. En el presente trabajo, se realizó la separación de las capas de aluminio y capas poliméricas de los envases Tetra brik lácteos de desecho, mediante el uso de ácido láctico y ácido cítrico, los cuales son disolventes eutécticos profundos (DEP) considerados ecológicos. La separación de aluminio y plástico se realizó a diferentes temperaturas y concentraciones de disolventes, cambiando también proporciones sólido-líquido a diferentes velocidades de agitación con la adición de un dispersante base azufre. Los resultados muestran una separación de plástico y aluminio completa desde baja temperatura y con la menor concentración de disolventes eutécticos, observando la importancia de la adición del dispersante sulfurado durante el proceso.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por basura no podemos eliminarla completamente, pero podemos disminuirla ayudando a reciclar varios empaques o envolventes de productos alimenticios, como los llamados empaques tetra brik, que después del consumo del producto dentro de estos envases, se van a vertederos contaminando no solamente suelos sino aguas.

Para la fabricación de tetra brik se utiliza lo menos posible de material, pero manteniendo un empaque funcional, por otro lado, tetra pak maximiza el porcentaje de material renovable. En realidad, los dos tipos de empaque son similares ya que para el sellado de sus capas (6 capas) se utiliza alta presión sin ningún tipo de pegamento. Se ha utilizado solventes como la mezcla de benceno-etanol-agua, dimetilciclohexilamina o gran cantidad de energía, para poder reciclar estos empaques, pero todo lo mencionado anteriormente no es respetuoso con el medio ambiente por su alta contaminación. Los disolventes eutécticos o también llamados verdes pueden ser una alternativa para separar el aluminio del plástico de una forma amable con el medio ambiente, dar una segunda vida al aluminio y tener menos desperdicio de material evitando tirarlos en el vertedero.

Por todo lo mencionado anteriormente, el objetivo general de este proyecto es emplear disolventes eutécticos profundos a diferentes concentraciones y temperaturas con un aditivo base azufre para separar el plástico del aluminio de envases tetra brik, determinando la estrategia más sencilla y efectiva, al evaluar las condiciones óptimas en que el envase debe de ser sometido para poder separar sus capas empleando la menor energía posible.

TEORÍA

Disolventes eutécticos profundos

Disolventes que contienen oxígeno

Los disolventes que eutécticos que contienen oxígeno son la clase más común de DEP. Esto se debe a dos motivos. Se han estudiado primeramente una gran cantidad de compuestos que contienen oxígeno, relativamente seguros, accesibles y económicos disponibles en el laboratorio. En

el segundo caso, se han estudiado la presencia de grupos hidroxi, carbonilo o carboxilo, que permiten la formación de enlaces de hidrógeno estables y termodinámicamente favorables en los disolventes eutécticos profundos. Los alcoholes y los ácidos carboxílicos están representados casi por igual en este grupo [2]

Disolventes que contienen nitrógeno
Además de las sustancias que contienen oxígeno, los compuestos que contienen nitrógeno también se utilizan ampliamente en la preparación de diversos disolventes eutécticos profundos. Los DES basados en nitrógeno son un tipo de DEP que contienen un grupo que contiene nitrógeno que, a diferencia del oxígeno, a menudo puede actuar como donante y aceptor de enlaces de hidrógeno. Entre ellos se encuentran la urea, el imidazol, la colina o los derivados de amida, entre otros. Estos disolventes han ganado atención en el análisis químico debido a sus propiedades únicas y su versatilidad en diversas técnicas analíticas. La polaridad, la viscosidad y la capacidad de enlace de hidrógeno de los DEP a base de nitrógeno se pueden adaptar seleccionando compuestos de aminas adecuados y modificando la composición de los DEP. Esto permite la optimización de estos disolventes para diversas aplicaciones analíticas.

Disolventes que contienen fósforo
Al igual que los compuestos que contienen nitrógeno, los compuestos que contienen fósforo también se utilizan en la preparación de disolventes eutécticos profundos. Sin embargo, su contribución a este campo es actualmente aún menor. Entre todos los compuestos que contienen fósforo, los compuestos de fosfonio cuaternario como el bromuro de aliltrifenilfosfonio [3], el bromuro de benciltrifenilfosfonio [4], etc., son los más utilizados. La presencia de grupos aromáticos o alifáticos ramificados permite que estos compuestos se utilicen para la preparación de disolventes eutécticos profundos hidrófobos insolubles en agua para la extracción de analitos de un medio acuoso. Además, a diferencia de la mayoría de los otros compuestos utilizados en la síntesis de DEP, los compuestos de fósforo utilizados para este propósito exhiben una selectividad relativamente alta y a menudo se usan como quelatos individuales para la extracción de metales

Disolventes que contienen azufre
Recientemente, las sustancias que contienen azufre también se han utilizado en la preparación de disolventes eutécticos profundos. Uno de los más comunes en la actualidad es la tiourea, pero ya se han propuesto otros componentes que contienen azufre que también pueden utilizarse eficazmente en esta dirección. Por ejemplo, ya se han propuesto varios trabajos sobre el uso del ácido 10-alcanforsulfónico [5] y el ácido p-toluenosulfónico [6]. Curiosamente, los compuestos de mercaptanos [7] o tioles [8, 9] también pueden formar compuestos muy estables con diversos metales como mercurio, plomo y cadmio para extraerlos. Por lo tanto, podemos concluir que los disolventes eutécticos profundos a base de azufre tienen un gran potencial desde el punto de vista de la implementación del análisis elemental. Sin embargo, estos disolventes también pueden utilizarse eficazmente para extraer moléculas orgánicas que contienen metales.

Otros Disolventes eutécticos profundos
Además de los compuestos descritos anteriormente, existen disolventes eutécticos profundos en la literatura basados en otros compuestos que son difíciles de clasificar como un grupo separado. Por ejemplo, el paeonol [10], que contiene varios grupos diferentes que contienen oxígeno, o la isosorbida [11]. Algunos de estos se derivan de sustancias biológicamente activas o medicinales para una administración transdérmica más conveniente. Sin embargo, estos compuestos rara vez se consideran desde el punto de vista de la resolución de problemas de química analítica debido al alto costo o la inestabilidad de los compuestos de partida.

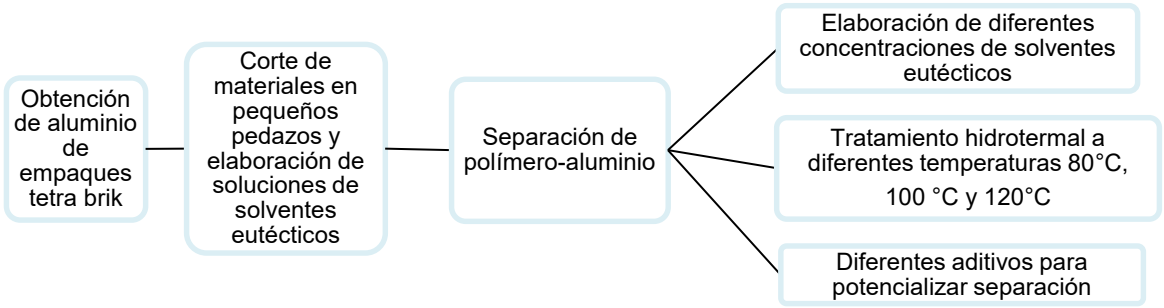
PARTE EXPERIMENTAL

Recolección de residuos de Tetra Brik
Se han utilizado envases de Tetra Brik procedentes de botellas de leche de diferentes marcas para analizar ambos protocolos de reciclaje. Los recipientes se cortaron en fragmentos de 1x1 cm, se

lavaron con agua y se secaron a 30°C durante 24 horas (Figura 1). La etapa de lavado proporciona un material de partida libre de las sustancias relacionadas con el producto almacenadas, como grasas y proteínas, que podrían alterar los resultados del reciclaje.

Figura 1. Recolección, corte y peso de envases Tetra Brik usados

En la Figura 2 muestra los diferentes pasos realizados para los residuos de Tetra Brik y la terminología utilizada en este trabajo**.**



Tratamiento hidrotérmico de los residuos de Tetra Brik

El residuo de Tetra Brik se trató hidrotermalmente utilizando un reactor hidrotermal de 500 ml para trabajar a 100 °C y presión atmosférica. Los experimentos se realizaron utilizando 30 g de muestra sólida (fragmentos de 1x1 cm) y diferentes soluciones de solventes eutécticos (ácido láctico + ácido cítrico 0:100, 100:0, 50:50, 30:70, 70:30 % peso) y como aditivo un solvente con azufre. La muestra se introducía en el reactor y se programaba la temperatura y el tiempo de funcionamiento a la que se mantenía la muestra una vez alcanzada la temperatura de consigna para cada ensayo. Se probaron tres niveles de temperatura (80, 100 y 120 °C) y tres tiempos de residencia (40, 80 y 120 min) con dos diferentes niveles de agitación desde 900 rpm y 1800rpm. Una vez finalizados los ensayos de tratamiento hidrotermal, se separaron los dos productos.

Separación de polímero-Aluminio

La fase sólida (polímero y aluminio) se separaron de la fase líquida mediante filtración a presión atmosférica y se dejó secar durante 24 h en una estufa a 30 °C. Una vez seco, el polímero y el aluminio se separaron manualmente. La fracción de aluminio se lavó varias veces para eliminar los rastros de plástico aglomerado. Por otro lado, la fase líquida se filtró al vacío para recuperar el plástico suspendido en la fracción líquida para optimizar la separación y obtener la máxima cantidad de producto. Esta pequeña cantidad de polímero recuperado se mezcló con la mayor cantidad obtenida por filtración y se secó para producir pesar el subproducto final.

Almacenamiento

Finalmente, los dos sólidos se almacenaron en una bolsa sellada por separado para evitar la contaminación antes de los posteriores análisis de caracterización.

Figura 2. Tratamiento, lavado, secado y separación de sólidos

Caracterización estructural y morfológico

Ambos sólidos, el plástico y el aluminio separado se caracterizaron estructuralmente con un equipo de difracción de rayos-X (Siemens D5000 con una radiación monocromática Cu-K α1 por microscopía electrónica de barrido (MEB) con un microscopio electrónico de barrido (Quanta 250 marca FEI) con un detector EDS para hacer el análisis químico elemental que contienen las muestras.

RESULTADOS

Análisis Estructural y morfológico con DRX y MEB con EDS

En la Figura 1 se observa el difractograma de una muestra donde se empleó (ácido láctico-ácido cítrico con 5% DMSO), donde se puede observar la presencia de las siguientes fases: aluminio metálico (Al), así mismo en el mismo difractograma se puede observar una contaminación por la de la estructura del polímero entre el ángulo 2 theta de 10 a 35 grados.

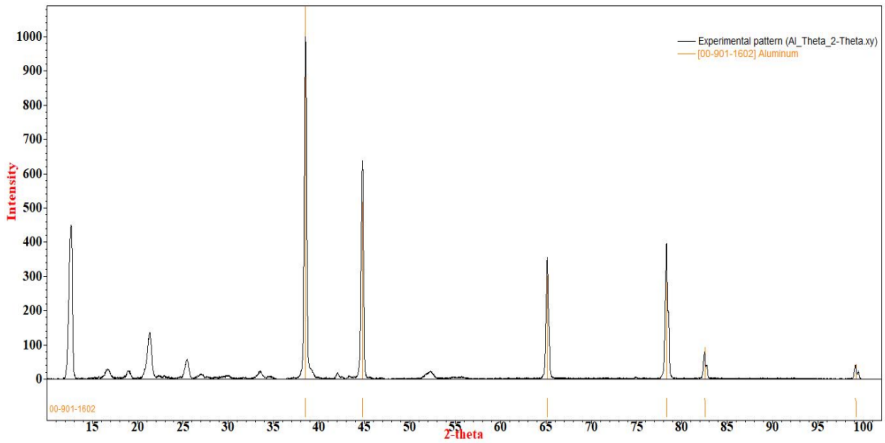


Figura1. Difractograma de la muestra sólida de aluminio separado en el proceso.

En la Figura 2, se observa la superficie del sólido separado, en donde se observa que aún se presenta contaminación del material y el análisis químico con la técnica de EDP donde se encuentran los elementos de Aluminio, Oxígeno y Carbono.

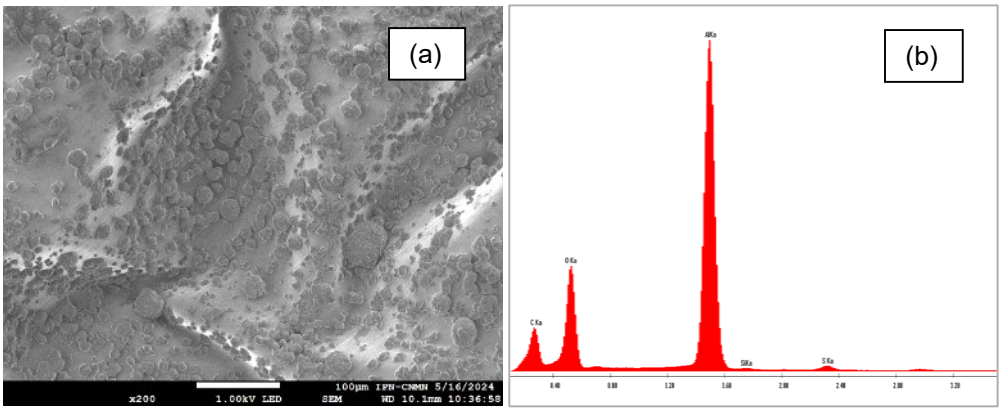


Figura 2. (a) Micrografía de la muestra tratada con (ácido láctico 50% -ácido cítrico 50% con DMSO 5%), (b) imagen EDS

CONCLUSIONES

En este trabajo se separó el plástico del aluminio de recipientes de deshecho Tetra Brik, del cual se determinó que el aluminio se encontraba presente en un 29% en la muestra sin purificar. La muestra que presenta una mayor facilidad de separación de plástico del aluminio fue que se trató con solventes eutécticos ácido láctico-ácido cítrico en una concentración de 50%-50% peso + 5% de aditivo de azufre. Se identifica el aluminio metálico y oxidado a través de la difracción de rayos X (DRX). Mediante la microscopía electrónica de barrido se puede observar la superficie del aluminio y parte de polímero aún adherido a la superficie, y mediante el análisis EDS se confirma la presencia de aluminio, carbono y oxígeno en la muestra, éstos dos últimos posiblemente por la presencia del plástico. Se sugiere utilizar pirólisis o bien electrólisis para purificar al 100% el aluminio contenido.

BIBLIOGRAFÍA

1. B. Lokahita, M. Aziz, K. Yoshikawa, F. Takahashi, “Energy and resource recovery from Tetra Pak waste using hydrothermal treatment”, App. Energy, Vol. 207, 2017, pp. 107-113.

2. L.-L. Sun, Z. Yue, S.-C. Sun, Y. Li, X.-F. Cao, S.-N. Sun, “Microwave-assisted choline chloride/1,2-propanediol/methyl isobutyl ketone biphasic system for one-pot fractionation and valorization of Eucalyptus biomass”, Bioresour. Technol. Vol. 369, 2023, p.p. 128392.

3. H. Ghaedi, M. Ayoub, S. Sufian, G. Murshid, S. Farrukh, A.M. Shariff, “Investigation of various process parameters on the solubility of carbon dioxide in phosphonium-based deep eutectic solvents and their aqueous mixtures: experimental and modeling”, Int. J. Greenh. Gas Control Vol. 66, 2017, p.p. 147–158.

4. M. Shahbodaghi, H. Faraji, H. Shahbaazi, M. Shabani, “Magnetic deep eutectic solvent-based microextraction for determination of organophosphorus flame retardants in aqueous samples: one step closer to green chemistry”, Microchem. J. Vol. 183, 2022, p.p. 108120.

5. F. Cardellini, R. Germani, G. Cardinali, L. Corte, L. Roscini, N. Spreti, M. Tiecco, Room temperature deep eutectic solvents of (1S)-(+)-10-camphorsulfonic acid and sulfobetaines: hydrogen bond-based mixtures with low ionicity and structure dependent toxicity, RSC Adv. 5 (2015) 31772–31786, https://doi.org/10.1039/ C5RA03932K.

6. N. Rodriguez Rodriguez, L. Machiels, K. Binnemans, p-Toluene sulfonic acid-based deep-eutectic solvents for Solubilizing metal oxides, ACS Sustainable Chem. Eng. 7 (2019) 3940–3948.

7. J. Chen, Y. Wang, X. Wei, P. Xu, W. Xu, R. Ni, J. Meng, Magnetic solid-phase extraction for the removal of mercury from water with ternary hydrosulphonyl based deep eutectic solvent modified magnetic graphene oxide, Talanta Vol. 188 , 2018, p.p. 454–462.

8. J. Werner, Ligandless, deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction with solidification of the aqueous phase for preconcentration of lead, cadmium, cobalt and nickel in water samples, J. Separ. Sci. Vol. 43, 2020, 1297–1305.

9. B. Liu, F. Wei, J. Zhao, Y. Wang, “Characterization of amide–thiocyanates eutectic ionic liquids and their application in SO2 absorption”, RSC Adv. Vol. 3, 2013, p.p. 2470–2476.

10. J. Wu, T. Yin, Novel paeonol-matrine deep eutectic solvent: physicochemical properties and cytotoxicity, J. Mol. Liq. Vol. 348, Vol. 2022, p.p. 118068.

11. Z. Maugeri, P.D. de María, Novel choline-chloride-based deep-eutectic-solvents with renewable hydrogen bond donors: levulinic acid and sugar-based polyols, RSC Adv. 2, 2011, p.p. 421–425.

PRUEBA DE CONCEPTO DE LA APLICACIÓN DE REDES GENERATIVAS ADVERSARIAS CÍCLICAS (CYCLEGANS) EN EL AUMENTO DE BASE DE DATOS DE IMÁGENES LAPAROSCÓPICAS

Diana Jazmín Torres-López[1], Sebastián Salazar-Colores[1], Daniel A. Gutiérrez-Jiménez[1], Alfonso Ramírez-Pedraza[1], J. Manuel Morales-Babines[1], Alejandra Aguilera-Barrientos[2].

[1] Centro de Investigaciones en Óptica A.C., México, [2]Instituto Tecnológico de León, México.
dianatl@cio.mx

RESUMEN

La laparoscopía es un procedimiento quirúrgico mínimamente invasivo en el que se emplea una cámara para visualizar el espacio en operación, por lo que la intervención es visualizada por el personal médico mediante imágenes 2D. Sin embargo, la calidad de las imágenes laparoscópicas puede verse comprometida por factores como la presencia de humo. Esto afecta tanto la precisión diagnóstica como el tiempo de operación. Para superar estos desafíos, el uso de modelos de inteligencia artificial (IA) presenta una solución prometedora. Estos modelos pueden eliminar el humo de las imágenes, mejorando la claridad y precisión. Sin embargo, el desarrollo eficaz de estos modelos de IA depende críticamente del tamaño y la calidad de las bases de datos de imágenes usadas en su entrenamiento. En este trabajo, se aborda la escasez de imágenes laparoscópicas adecuadas mediante la evaluación y aplicación de CycleGANs, la cual es una red neuronal artificial de tipo generativa antagónica cíclica que ha dado excelentes resultados en tareas de naturaleza similar. Esto permite ampliar las bases de datos disponibles y mejorar el entrenamiento de modelos de IA dedicados a la eliminación de humo en imágenes laparoscópicas. La investigación se centró en la capacidad de las CycleGANs para convertir imágenes laparoscópicas artificiales, con poca definición de detalles, en imágenes realistas del procedimiento quirúrgico sin perder detalles críticos. Utilizamos un conjunto de datos inicial compuesto por imágenes laparoscópicas modeladas en 3D, junto con imágenes reales de dos dominios distintos: imágenes sin humo y con humo. El modelo de CycleGAN logró obtener la distribución de características de ambas condiciones, asegurando que las imágenes generadas mantuvieran la fidelidad estructural y visual necesaria. Esto representa un paso significativo hacia el dominio realista a partir de imágenes renderizadas.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales limitaciones en el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial es la falta de bases de datos de calidad. Aunque la operación laparoscópica es muy común actualmente, es difícil obtener grandes bases de datos específicas**[1]**, como las de imágenes laparoscópicas con humo. Estas imágenes son críticas, ya que suelen capturar los momentos en que se realizan los cortes de tejido, pero representan episodios breves durante la operación**[2]**.

Dado que las imágenes laparoscópicas son de origen médico, a menudo se requiere la colaboración directa de instituciones médicas y la consideración de aspectos éticos relacionados con la privacidad y el uso de las imágenes. Por lo tanto, obtener una base de datos amplia y específica de imágenes laparoscópicas puede ser costoso y su disponibilidad es limitada. Además, la diversidad de casos clínicos también es un factor que restringe su amplio uso**[3], [4]**.

Es por esto que una base de datos sintética sería de importancia para el entrenamiento de redes que buscan eliminar el humo en imágenes laparoscópicas. Para la generación de imágenes sintéticas, se propone el empleo de Redes Generativas Adversarias Cíclicas (CycleGANs)

Las redes generativas adversarias cíclicas (CycleGANs) son un tipo de red neuronal artificial que consiste en dos partes principales, un generador y un discriminador, esto le da las herramientas para generar nuevas imágenes a partir de un dominio original o imagen sin etiquetar.

El generador se encargara como dice su nombre de generar nuevas imágenes que enviara al discriminador, el cual deberá de decidir si la imagen pasa como real o no, el generador tiene el trabajo principal de “engañar” al discriminador, de manera que la imagen generada pase al dominio real de entrenamiento**[5], [6].**

Las Cycle GANs pueden ayudar a aumentar bases de datos de imágenes al generar nuevas imágenes a partir de las existentes, previamente se han utilizado para mejorar la generalización en tareas de segmentación**[6]**. También se han empleado para la generación de imágenes sintéticas NDT (Non-Destructive Testing) que se utilizan en la industria para asegurar seguridad y calidad de productos y estructuras**[7]**. Además, han sido aplicadas en el ámbito médico para generar imágenes sintéticas de tumores a partir de imágenes normales**[8]** y en aplicaciones recientes de gran relevancia médica, como el aumento de radiografías de tórax para la detección semisupervisada de neumonía y COVID-19**[9]**.

Mediante este trabajo se busca completar una prueba de concepto de CycleGANs en la generación de imágenes sintéticas realistas a partir de un dominio de imagen 3D. Se espera lograr la obtención de imágenes con texturas y formas realistas y definidas, con el objetivo de crear una base de datos más amplia para el entrenamiento de modelos destinados a eliminar el humo en imágenes laparoscópicas en tiempo real.

El aumento en las bases de datos de imágenes laparoscópicas supone una gran ventaja, ya que proporcionaría una herramienta adicional para el entrenamiento de redes neuronales enfocadas en la eliminación del humo en imágenes laparoscópicas. El humo es un problema muy común en las operaciones laparoscópicas, ya que limita la visión del médico. Esta limitación puede provocar tiempos prolongados de operación y contribuir al estrés del personal médico.

TEORÍA

Redes Generativas Adversarias (GANs)

Las GANs son un modelo de aprendizaje profundo que tuvo sus inicios de investigación desde el año 2014**[10],** y como se había mencionado tiene dos componentes o redes neuronales que van a competir entre si para generar datos indistinguibles de los datos reales, el generador y el discriminador (Figura 1).

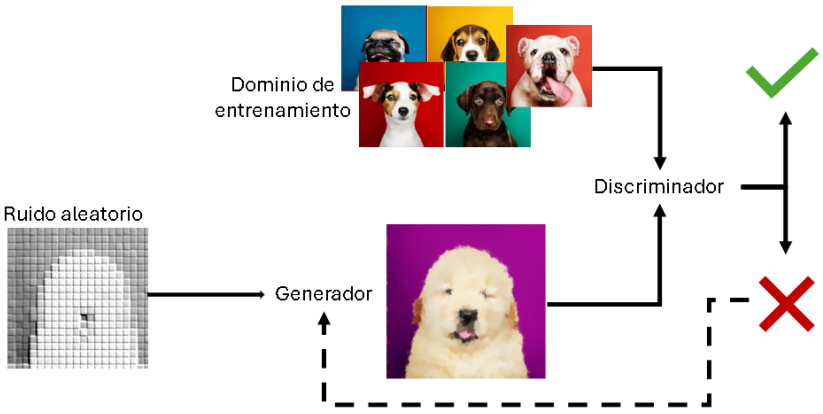


Figura 1. Principio de funcionamiento de GANs.

Recordemos que, por una parte, el generador crea datos o imágenes que buscan ser indistinguibles del dominio de aprendizaje o datos reales, su propósito principal es que el discriminador no lo logre distinguir que se trata de datos generados, en términos más coloquiales, busca “engañarlo”.

El discriminador por su parte va separando entre las imágenes reales y las generadas de tal manera que la competencia continua entre dos componentes resulta en un modelo que mejora progresivamente**[10], [11]**.

Redes Generativas Adversarias Cíclicas (CycleGANs)

Por su parte las (Cycle GANs) son un tipo de GAN que tiene la particularidad de generar imágenes nuevas, pero a partir de dos dominios sin que sean necesariamente similares, logran aprender de ambos y pasar de un dominio a otro usando los conjuntos o dominios independientes (X e Y) de imágenes.

En principio una cycleGAN posee dos generadores (Gx-y y Gy-x), el generador Gx-y pasa de la imagen de domino X en la imagen de dominio Y. Caso contrario pasa con Gy-x que pasa desde el dominio Y al dominio X. En cuanto al discriminador X (Dx) le corresponde distinguir de la imagen X real y la imagen generada y a su vez el discriminador Y diferencia entre la imagen Y real y la generada**[12]** (Figura 2).

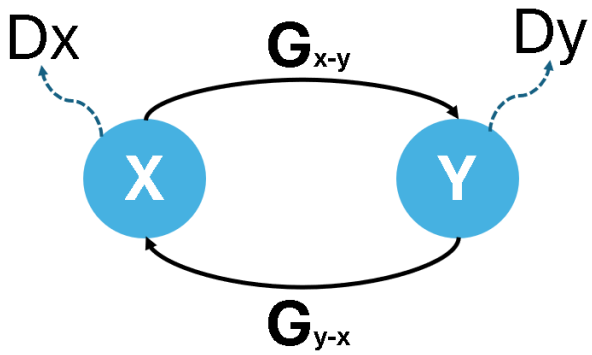


Figura 2. Principio de funcionamiento de CycleGANs.

Con este tipo de modelos se ha logrado traducir de un dominio a otro desde estilos artísticos hasta especies de animales (Figura 3).

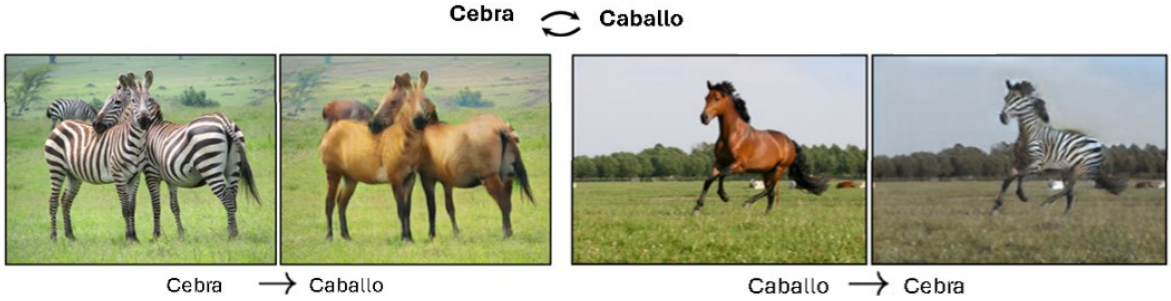


*Figura 3. Ejemplo de aplicación de uso de CycleGANs. Imagen obtenida de **[12]**.*

Aumento de Bases de Datos con Técnicas de Aprendizaje Profundo

El aumento de base de datos o 'data augmentation' por sus siglas en inglés, es una técnica empleada en aprendizaje automático y visión por computadora en el incremento para incrementar la cantidad y diversidad de datos disponibles para el entrenamiento de modelos, especialmente cuando la base de datos es limitada, ya que los modelos logran generalizar mejor.

El aumento de bases de datos puede abordarse mediante diversas técnicas que van desde métodos básicos de manipulación de imágenes hasta enfoques avanzados de aprendizaje profundo. Entre las técnicas básicas se incluyen la aplicación de kernels (suavizado, realce de bordes, desenfoque,

etc.), transformaciones geométricas (rotación, escalado, recorte) y de color (brillo, contraste, saturación), borrado aleatorio, entre otras.

En el ámbito de las técnicas avanzadas, el aprendizaje profundo ha impulsado el campo del aumento de datos. Las GANs entran en este rubro y como se mencionó permiten la generación de imágenes sintéticas realistas que pueden complementar los conjuntos de datos existentes junto con la transferencia de estilo neuronal que es otra técnica que permite aplicar el estilo de una imagen (por ejemplo, el estilo de una pintura famosa) a otra imagen, preservando su contenido original **[13]**.

Aplicaciones de CycleGANs en Imágenes Médicas

Las CycleGANs han sido ya utilizadas en el ámbito medico en tareas como la conversión de imágenes de resonancia magnética a tomografía computarizada y viscecersa**[14]**, en la mejora de calidad, reducción de ruido y reconstrucción de imágenes **[15], [16]**, en el aumento de datos para diagnósticos como la detección de cáncer en la piel**[17]**, entre otros que la hacen ver como un modelo potencialmente adecuado para el aumento de datos de imágenes laparoscópicas realistas.

PARTE EXPERIMENTAL

La parte experimental de este trabajo se dividió en 4 etapas principales.

I. Preparación de base de datos: Se tomaron como bases de datos dominio dos fuentes, una base de datos sintética 3D laparoscópica**[1]** y se generó otra base de datos de imágenes laparoscopias a partir de la base de datos libre CHOLEC 80**[18]** publicada por el grupo CAMMA.

II. Clasificación de imágenes: A partir de la base de datos CHOLEC 80 se separaron las imágenes laparoscópicas en dos carpetas, imágenes con presencia de humo y sin presencia de humo.

III. Entrenamiento con imágenes sin humo: Se llevo a cabo el entrenamiento con cycleGANs teniendo como dominios X e Y las imágenes sintéticas 3D laparoscópicas y las imágenes extraídas de CHOLEC 80 sin humo respectivamente, para la generación de imágenes sintéticas realistas sin humo.

IV. Entrenamiento con imágenes con humo: Similarmente en esta etapa se llevo a cabo el entrenamiento con cycleGANs teniendo como dominios X las imágenes sintéticas 3D laparoscópicas y en este caso como dominio Y se tuvieron las imágenes extraídas de CHOLEC 80 con humo, para la generación de imágenes sintéticas realistas con humo (Figura 4).

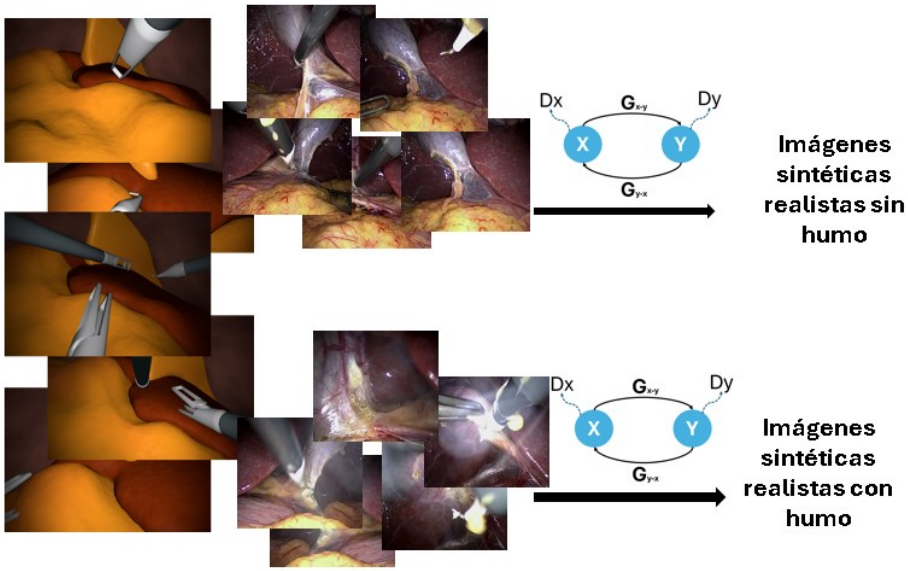


Figura 4. Aplicación como prueba de concepto de CycleGANs en aumento de datos para imágenes laparoscópicas.

RESULTADOS

Generación de imágenes sin humo

La generación de imágenes sin humo cualitativamente tuvo un resultado parecido a la realidad en cuanto a texturas y delimitación de zonas anatómicas, se puede observar que la generación de herramientas quirúrgicas aun es un problema ya que no tiene una apariencia realista (*Figura 5*).

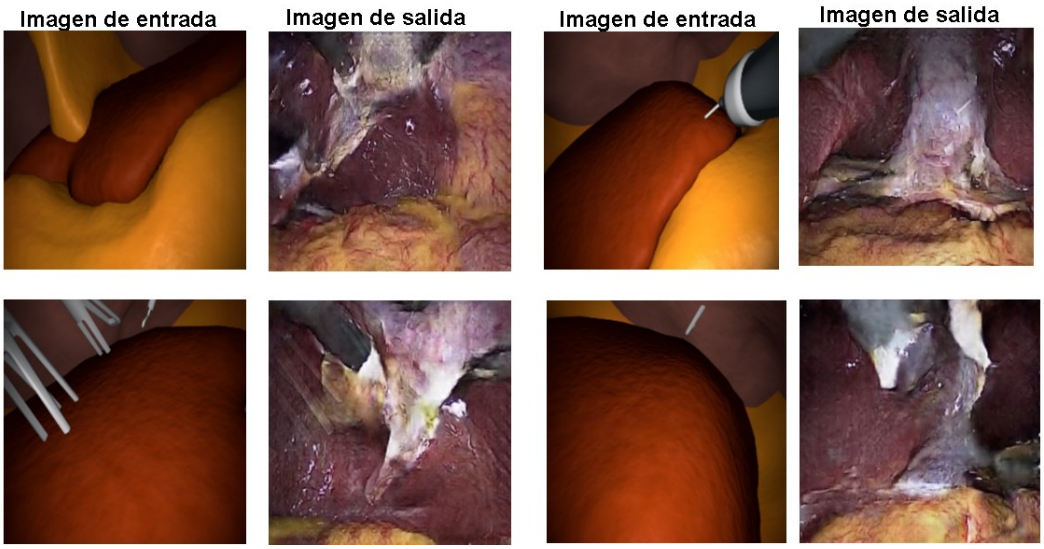


Figura 5. Generación de imágenes sintéticas laparoscópicas sin humo.

Generación de imágenes con humo

En cuanto a los resultados de imágenes con humo se observa una clara perdida de l delimitación de las zonas anatómicas, predominando la presencia de ruido, probablemente debido a que uno de los

dominios de entrada con la que fue alimentada la red eran imágenes con presencia de humo, lo cual dificulto mayormente la generación de imágenes más realistas (*Figura 6*).

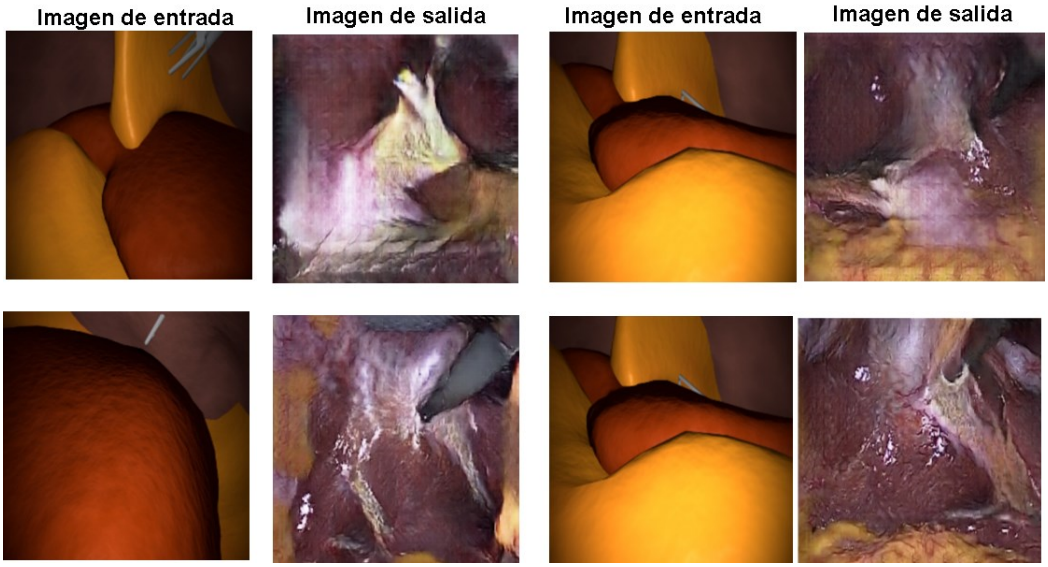


Figura 6. Generación de imágenes sintéticas laparoscópicas con humo.

CONCLUSIONES

Mediante este trabajo, se implementó una CycleGAN como prueba de concepto para la creación de una base de datos sintética. Los resultados fueron visualmente mejores para las imágenes sin humo, posiblemente debido a la mayor claridad de la zona anatómica y la herramienta en uso. A futuro, se busca explorar parámetros que enriquezcan el modelo para optimizar los resultados en ambos casos como la aplicación de técnicas de segmentación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. Pfeiffer *et al.*, «Generating Large Labeled Data Sets for Laparoscopic Image Processing Tasks Using Unpaired Image-to-Image Translation», en *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019*, D. Shen, T. Liu, T. M. Peters, L. H. Staib, C. Essert, S. Zhou, P.-T. Yap, y A. Khan, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 119-127. doi: 10.1007/978-3-030-32254-0_14.

[2] «Complications of Laparoscopic Surgery», *Surgical Clinics of North America*, vol. 73, n.º 2, pp. 265-289, abr. 1993, doi: 10.1016/S0039-6109(16)45981-5.

[3] M. W. Ross, M. Y. Iguchi, y S. Panicker, «Ethical aspects of data sharing and research participant protections», *American Psychologist*, vol. 73, n.º 2, pp. 138-145, 2018, doi: 10.1037/amp0000240.

[4] F. McKay, B. J. Williams, G. Prestwich, D. Bansal, D. Treanor, y N. Hallowell, «Artificial intelligence and medical research databases: ethical review by data access committees», *BMC Med Ethics*, vol. 24, n.º 1, p. 49, jul. 2023, doi: 10.1186/s12910-023-00927-8.

[5] «Conducción autónoma con el uso de imágenes sintetizadas con Redes Generativas Adversarias». Accedido: 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/86bf771b-df45-4d01-afcb-759576c609ec/full

[6] V. Sandfort, K. Yan, P. J. Pickhardt, y R. M. Summers, «Data augmentation using generative adversarial networks (CycleGAN) to improve generalizability in CT segmentation tasks», *Sci Rep*, vol. 9, n.º 1, p. 16884, nov. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-52737-x.

[7] «Data augmentation by a CycleGAN-based extra-supervised model for nondestructive testing - IOPscience». Accedido: 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ac3ec3/meta

[8] Z. Xu, C. Qi, y G. Xu, «Semi-Supervised Attention-Guided CycleGAN for Data Augmentation on Medical Images», en *2019 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, nov. 2019, pp. 563-568. doi: 10.1109/BIBM47256.2019.8982932.

[9] «Data augmentation using Generative Adversarial Networks (GANs) for GAN-based detection of Pneumonia and COVID-19 in chest X-ray images», *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 27, p. 100779, ene. 2021, doi: 10.1016/j.imu.2021.100779.

[10] J. Gui, Z. Sun, Y. Wen, D. Tao, y J. Ye, «A Review on Generative Adversarial Networks: Algorithms, Theory, and Applications», *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 35, n.º 4, pp. 3313-3332, abr. 2023, doi: 10.1109/TKDE.2021.3130191.

[11] K. Wang, C. Gou, Y. Duan, Y. Lin, X. Zheng, y F.-Y. Wang, «Generative adversarial networks: introduction and outlook», *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, n.º 4, pp. 588-598, 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510583.

[12] J.-Y. Zhu, T. Park, P. Isola, y A. A. Efros, «Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks». arXiv, 24 de agosto de 2020. doi: 10.48550/arXiv.1703.10593.

[13] C. Shorten y T. M. Khoshgoftaar, «A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning», *J Big Data*, vol. 6, n.º 1, p. 60, jul. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0197-0.

[14] J. M. Wolterink, A. M. Dinkla, M. H. F. Savenije, P. R. Seevinck, C. A. T. van den Berg, y I. Isgum, «Deep MR to CT Synthesis using Unpaired Data». arXiv, 3 de agosto de 2017. doi: 10.48550/arXiv.1708.01155.

[15] «GANs for medical image analysis», *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 109, p. 101938, sep. 2020, doi: 10.1016/j.artmed.2020.101938.

[16] Y. Li, H. Yang, D. Xie, D. Dreizin, F. Zhou, y Z. Wang, «POCS-Augmented CycleGAN for MR Image Reconstruction», *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2022, doi: 10.3390/app12010114.

[17] A. Bissoto, E. Valle, y S. Avila, «GAN-Based Data Augmentation and Anonymization for Skin-Lesion Analysis: A Critical Review». arXiv, 20 de abril de 2021. doi: 10.48550/arXiv.2104.10603.

[18] A. P. Twinanda, S. Shehata, D. Mutter, J. Marescaux, M. de Mathelin, y N. Padoy, «EndoNet: A Deep Architecture for Recognition Tasks on Laparoscopic Videos». arXiv, 23 de mayo de 2016. doi: 10.48550/arXiv.1602.03012.

ANÁLISIS DE SENTIMIENTOS EN LA EVALUACIÓN DE CURSOS: CALIFICACIÓN VS COMENTARIOS

Kathia Elizalde-Beltrán, Mildreth Alcaraz-Mejía, Viviana Duro-Novoa, Gabriela Calvario-Sánchez

ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara
mildreth@iteso.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la relación encontrada entre las calificaciones finales de los estudiantes de una asignatura y los comentarios plasmados en texto plano en la evaluación de dicho curso. El estudio se realizó con un conjunto de datos inicial anonimizado que tiene 850 registros que incluyen los comentarios en texto y la calificación final que obtuvo el estudiante en el curso. La hipótesis inicial es que los estudiantes que obtienen calificaciones bajas suelen incluir comentarios negativos en las evaluaciones del curso y los estudiantes que obtienen calificaciones altas suelen incluir comentarios positivos. Para poder validar dicha hipótesis, se utilizaron varios servicios de AWS, tal como S3, AWS Glue, Amazon Athena, Amazon QuickSight, para el desarrollo de las distintas etapas del proyecto, tal como almacenamiento, transformación, consumo de datos, así como del propio análisis de sentimientos, para el cual se realizó una clasificación de los comentarios, de acuerdo con los sentimientos detectados en él, como positivos, negativos, neutros y mixtos. Los resultados obtenidos permitieron invalidar la hipótesis inicial, ya que los estudiantes con mejores calificaciones hicieron comentarios mayormente neutrales, y los de calificaciones menores muestran una tendencia a combinar negativos con positivos, es decir, comentarios clasificados como mixtos, y no solamente negativos. Sin embargo, sí se observó que los estudiantes con comentarios positivos tienen, en promedio, mayor calificación, en comparación con aquellos en los cuales el sentimiento de sus respuestas fue catalogado como negativo.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la retroalimentación de los usuarios se ha convertido en un recurso esencial para la mejora de productos y servicios. En el campo educativo, la evaluación de cursos que incluye comentarios abiertos brinda una oportunidad única para comprender más profundamente las experiencias y expectativas de los estudiantes [1]. Históricamente, las calificaciones numéricas han sido el indicador principal del éxito o fracaso de un curso. No obstante, los comentarios textuales ofrecen un contexto más rico y detallado, revelando aspectos específicos de la experiencia del estudiante que no se capturan en una calificación numérica [2].

El análisis de sentimientos es una técnica poderosa que permite extraer información valiosa de los comentarios textuales al clasificar las opiniones en categorías como positivas, negativas, neutras y mixtas. Este enfoque puede complementar las calificaciones tradicionales y ofrecer una visión más completa y matizada de la calidad de los cursos [3].

Cambria y Hussain, dicen que el análisis de sentimientos es un “Conjunto de técnicas computacionales para la extracción, clasificación, comprensión y evaluación de opiniones expresadas en fuentes publicadas en Internet, comentarios en portales web y en otros contenidos generados por usuarios” [4]. En este trabajo, esta técnica se aplica sobre las opiniones expresadas en la evaluación final de una asignatura, en cuyo instrumento de evaluación, se pregunta a los estudiantes acerca de aquellos aspectos de la docencia sobre los que ellos pueden tener una percepción, es decir, aquellos elementos que guardan una relación directa con la interacción profesor-alumno y con la manera en que los profesores ayudan a los alumnos a aprender.

Para llevar a cabo este análisis de sentimientos en los comentarios de las evaluaciones docentes, se utilizaron diversos servicios de Amazon Web Services (AWS) [5], que proporcionan una

infraestructura robusta y flexible para manejar grandes volúmenes de datos y realizar análisis complejos.

Este trabajo describe en detalle las etapas del proyecto, desde la recolección y preparación de los datos hasta la interpretación de los resultados del análisis de sentimientos [6]. Con la integración de múltiples servicios de AWS, se logró una solución robusta y escalable que puede ser aplicada para mejorar la comprensión de las experiencias estudiantiles y, en última instancia, la calidad de los cursos ofrecidos.

METODOLOGÍA

Para poder validar nuestra hipótesis inicial, se emplearon los siguientes servicios: Amazon S3 para el almacenamiento escalable y seguro de los datos [7], AWS Glue para la preparación y transformación de los datos, Amazon Athena para realizar consultas SQL sobre los datos almacenados en S3 [8], Amazon Comprehend para determinar el sentimiento en los comentarios de los estudiantes almacenados [9] y Amazon QuickSight para la visualización de los resultados del análisis [10]. Estos servicios permitieron el desarrollo de un flujo de trabajo eficiente y eficaz para la clasificación de comentarios según los sentimientos detectados.

La clasificación de los comentarios, de acuerdo con los sentimientos detectados en él, se determinan como positivos, negativos, neutros y mixtos [9]:

- Positivo: el texto expresa un sentimiento positivo general.
- Negativo: el texto expresa un sentimiento general negativo.
- Mixto: el texto expresa sentimientos tanto positivos como negativos.
- Neutral: el texto no expresa sentimientos positivos ni negativos.

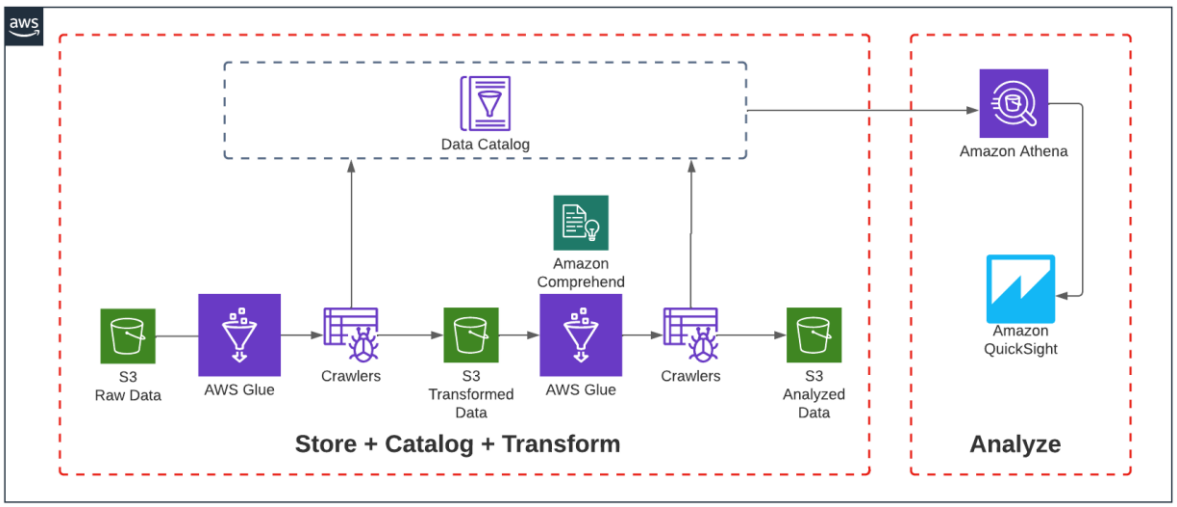


Figura 1. Modelo de Análisis de Sentimientos de Comentarios usando AWS

En la Figura 1 se muestra la arquitectura utilizada en AWS [7]. La imagen proporciona un flujo detallado del proceso de análisis utilizando diversos servicios de AWS. A continuación, se describe el modelo utilizado.

Fase 1: Store + Catalog + Transform

1. *S3 Raw Data*: Almacenamiento de Datos Brutos. Los datos iniciales, como comentarios y calificaciones de los cursos, se almacenan en Amazon S3 en su forma bruta. Este es el primer paso donde se recoge toda la información sin procesar.

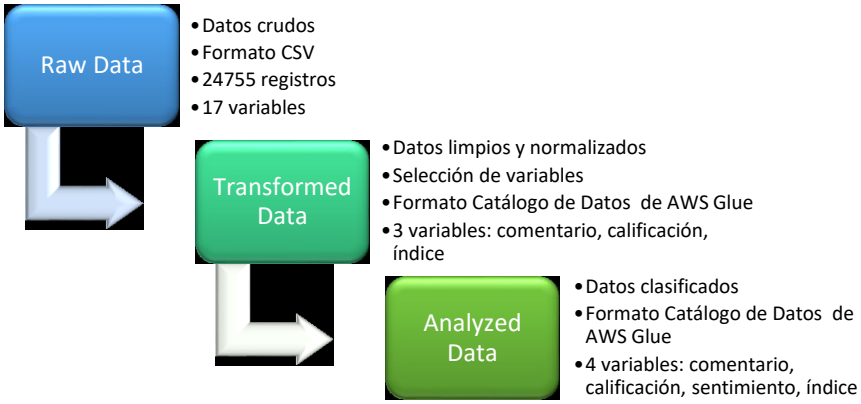


Figura *2*. Transformación de los Datos a través del Modelo de Análisis de Sentimientos con AWS

2. *AWS Glue*: Preparación y Transformación de Datos. AWS Glue se utiliza para preparar y transformar los datos brutos almacenados en S3. Esta herramienta facilita la extracción, transformación y carga (ETL) de los datos.

3. *Crawlers*: Catalogación de Datos. Los crawlers de AWS Glue recorren los datos transformados para crear un catálogo de datos. Este catálogo organiza y registra la estructura y los esquemas de los datos, haciéndolos fácilmente accesibles para futuras consultas y análisis.

4. *Transformed Data*: Almacenamiento de Datos Transformados. Los datos transformados por AWS Glue se vuelven a almacenar en Amazon S3. Estos datos ahora están en un formato estructurado y listo para el análisis.

5. *Amazon Comprehend*: Análisis de Sentimientos. Amazon Comprehend se utiliza para realizar el análisis de sentimientos en los comentarios transformados. Este servicio de procesamiento de lenguaje natural identifica y clasifica los sentimientos en categorías como positivos, negativos, neutros y mixtos.

6. *AWS Glue* (segunda etapa): Integración de Resultados. Los resultados del análisis de sentimientos se integran con los datos transformados. AWS Glue vuelve a procesar los datos para incluir las nuevas etiquetas de sentimientos.

7. *Crawlers* (segunda etapa): Actualización del Catálogo de Datos. Los crawlers de AWS Glue vuelven a recorrer los datos analizados para actualizar el catálogo de datos con la nueva información generada por Amazon Comprehend.

8. S3 Analyzed Data: Almacenamiento de Datos Analizados. Los datos que ahora incluyen las clasificaciones de sentimientos se almacenan en Amazon S3. Estos datos están listos para ser consultados y visualizados.

Fase 2: Analyze

9. *Amazon Athena*: Consultas de Datos. Amazon Athena se utiliza para realizar consultas SQL directamente sobre los datos almacenados en S3. Athena permite explorar y analizar los datos sin necesidad de moverlos a otra base de datos.

10. *Amazon QuickSight*: Visualización de Datos. Amazon QuickSight se emplea para crear visualizaciones interactivas y dashboards basados en los resultados de las consultas de Athena.

QuickSight proporciona una manera intuitiva de interpretar y comunicar los hallazgos del análisis de sentimientos.

El proceso completo comienza con el almacenamiento de los datos brutos en S3, seguido de su preparación y transformación con AWS Glue. Los datos transformados se catalogan y luego se someten al análisis de sentimientos con Amazon Comprehend. Los resultados se integran y se vuelven a almacenar en S3. Finalmente, Amazon Athena permite consultar estos datos, y Amazon QuickSight facilita su visualización, completando así el ciclo de análisis de sentimientos y evaluación de cursos. En la Figura 2, se muestra la transformación de los datos a través de la aplicación del modelo de análisis que se muestra en la Figura 1.

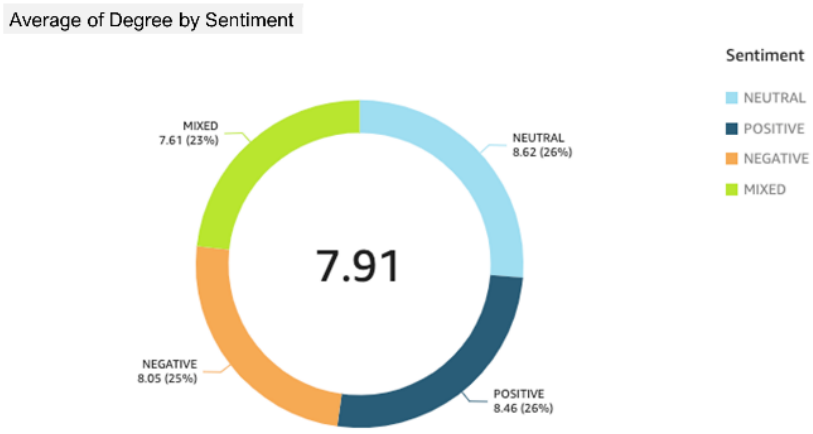


Figura 3. Promedio de Calificación por tipo de Comentario

RESULTADOS

En este proyecto, se propuso como aporte el desarrollo de un estudio de percepción basado en análisis de sentimientos sobre las respuestas de las estudiantes emitidas en la encuesta de evaluación docente al final del curso y su potencial correlación con su calificación obtenida en la asignatura. Para ello, se utilizaron las tecnologías para el análisis de sentimientos de Amazon Web Services, que resultan útiles para el procesamiento y análisis de datos cualitativos. La Figura 4 resume los resultados de este análisis.

Con los resultados obtenidos se pudo rechazar la hipótesis inicial que planteaba que los estudiantes con mejores calificaciones harían comentarios más positivos, mientras que aquellos con calificaciones más bajas harían comentarios predominantemente negativos. En cambio, se observó que los estudiantes con mejores calificaciones realizaron comentarios mayormente neutrales. Por otro lado, los estudiantes con calificaciones menores mostraron una tendencia a emitir comentarios mixtos, es decir, combinando aspectos negativos y positivos, y no exclusivamente negativos como se había planteado inicialmente.

Un análisis más detallado reveló una correlación interesante: los estudiantes que hicieron comentarios positivos tendieron a tener, en promedio, una calificación mayor en comparación con aquellos cuyos comentarios fueron clasificados como negativos. Esto sugiere que, aunque el sentimiento general de los comentarios no siempre se correlaciona de manera directa con la calificación obtenida, existe una relación positiva entre la calificación y los comentarios positivos.

CONCLUSIONES

Los hallazgos encontrados en este trabajo indican que el análisis de sentimientos puede proporcionar una visión más matizada de la percepción estudiantil y su relación con el desempeño académico. La tecnología de Amazon Web Services permitió procesar y analizar de manera efectiva las respuestas cualitativas, proporcionando un enfoque innovador para entender mejor la retroalimentación de los estudiantes en el contexto de la evaluación docente. Estas tecnologías permiten realizar pruebas de prototipado de procesos de una forma relativamente rápida, sin embargo, para integrar estos procesos a los sistemas propios de una institución educativa, se deben hacer otras consideraciones adicionales para verificar su viabilidad, como, por ejemplo, el lenguaje de programación de los sistemas actuales, si se puede integrar este nuevo proceso como una extensión del mismo sistema, como una API, con librerías adicionales, la capacidad de la infraestructura actual, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Kathia Elizalde-Beltrán agradece a la Maestría en Sistemas Computacionales del ITESO y a CONAHCYT por el apoyo otorgado Beca No. 503292.

BIBLIOGRAFÍA

1. Tejedor, Francisco Javier Tejedor. "Evaluación del desempeño docente." Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa 5.1 (2012): 318-327.
2. Reyes Piñuelas, Erika Paola, Emilia Cristina González Machado, and Pedro Antonio Be Ramírez. "Evaluar la práctica docente a partir de los comentarios de estudiantes universitarios." Revista iberoamericana de educación (2018).
3. Aung, Khin Zezawar, and Nyein Nyein Myo. "Sentiment analysis of students' comment using lexicon based approach." 2017 IEEE/ACIS 16th international conference on computer and information science (ICIS). IEEE, 2017.
4. Cambria, Erik, and Amir Hussain. Sentic computing: Techniques, tools, and applications. Vol. 2. Springer Science & Business Media, 2012.
5. “Lagos de Datos Y Análisis En AWS - Amazon Web Services.” Amazon Web Services, Inc., http://aws.amazon.com/es/big-data/datalakes-and-analytics/ [Último acceso: 29 03 2024].
6. Zhao, Jun, Kang Liu, and Liheng Xu. "Sentiment analysis: mining opinions, sentiments, and emotions." (2016): 595-598.
7. “AWS | Almacenamiento de Datos Seguro En La Nube (S3).” Amazon Web Services, Inc., http://aws.amazon.com/es/s3/ [Último acceso: 29 03 2024].
8. “Consultas de datos al instante | Análisis de datos SQL | Amazon Athena,” Amazon Web Services, Inc. https://aws.amazon.com/es/athena/ [Último acceso: 29 03 2024].
9. “Determine Sentiment - Amazon Comprehend.” https://docs.aws.amazon.com/comprehend/latest/dg/how-sentiment.html [Último acceso: 29 03 2024].
10. “Servicio de Inteligencia Empresarial | Amazon QuickSight | AWS.” Amazon Web Services, Inc., http://aws.amazon.com/es/quicksight/ [Último acceso: 29 03 2024].

MOTORIZACIÓN DE UN DRÓN TRICÓPTERO VTOL Y VUELO HORIZONTAL

Rodolfo Rodríguez Padilla, María del Rosario Baltazar Flores y Miguel Ángel Casillas Araiza

Instituto Tecnológico de León.
rodolfo.rodriguez@leon.tecnm.mx

RESUMEN

La entrega de mercancías por parte de las empresas de paquetería, la entrega de alimentos por empresas de comida rápida y medicamentos se está volviendo común para comunidades suburbanas y rurales. Una forma rápida y económica es la utilización de pequeñas aeronaves, las cuales pueden desplazarse en menor tiempo para hacer su entrega debido a que lo realizan por el aire, además de que lo hacen a un costo menor al ser un vehículo pequeño y no contar con una persona que lo conduzca.

Para eliminar el uso de pistas de despegue y aterrizaje, los vehículos cuentan con la característica de despegue y aterrizaje verticales (Vertical Take Off and Landing VTOL), y además de un vuelo de crucero horizontal. Esto abre un mundo de posibilidades de formas y configuraciones de número de rotores.

La propuesta es un drón tipo ala delta para el vuelo de crucero, con rotores abatibles, para orientar su eje de manera vertical, para de esta manera despegar y aterrizar verticalmente. Se consideró utilizar cuatro motores, dos en la parte posterior que mantendría en todo momento su eje verticalmente, y dos en la parte frontal abatibles. Un mecanismo articulado soportaría individualmente a cada motor delantero para girar el eje para la transición de vuelo vertical a horizontal para despegar, después vertical para hacer la entrega, posteriormente a horizontal para regresar, y finalmente vertical para aterrizar.

El vehículo cuenta con un peso total de 4.5Kg, y con una capacidad de carga de 1.5Kg, y se desplaza a una velocidad de crucero de 60Km/h. Se agregó un tren de aterrizaje para poder aterrizar en una pista corta y de esta manera aumentar su capacidad de carga en los casos que sean necesarios y las condiciones de las instalaciones lo permitan.

INTRODUCCIÓN

El uso de pequeñas aeronaves controladas de manera remota y con un plan de vuelo se ha hecho común, para dar soluciones a la adquisición de datos, de información y para llevar una pequeña carga de un lado a otro. Decidir cuántos motores, de qué características, que hélices y que baterías utilizar, dependerá del tipo de actividad a realizar y del peso del vehículo. El uso de una plataforma híbrida que combina el despegue y aterrizaje vertical, y el vuelo horizontal representa un reto adicional[1] (Wingcopter, 2021), aunque una ventaja en el área a cubrir durante el vuelo y el prescindir de una pista de aterrizaje.

TEORÍA

Una aeronave de ala rotativa y multirrotor puede despegar y aterrizar de forma vertical, y desplazarse de forma horizontal inclinando todos sus rotores hacia la dirección en la que lo hará. La estabilidad y la maniobrabilidad dependerán en todo momento del empuje y torque proporcionado por las hélices. Una aeronave de ala fija despega y aterriza de manera horizontal, requiriendo una pista o una lanzadera, la sustentación dependerá de al menos un ala y lo hará en contra del viento, el empuje lo proporcionará al menos una hélice, y la estabilidad y maniobrabilidad será proporcionada por superficies de control ubicadas en las alas y en los estabilizadores horizontales y verticales.

Una aeronave híbrida, poseerá características de ala rotativa y ala fija pudiendo combinar las características de ambos tipos, despegar y aterrizar verticalmente y volar horizontalmente.
Mediante la aplicación XFLR5, se construirá de manera virtual y se probará en vuelo, retroalimentando si es estable en vuelo horizontal, el ángulo de ataque, la velocidad mínima para la una masa propuesta, el coeficiente de sustentación y el coeficiente de fricción aerodinámica.

Para probar el empuje y la energía consumida por los motores y las hélices se utilizará una báscula donde se hará el montaje del motor y su hélice, y un multímetro, con el cual obtendremos los valores de voltaje, corriente y potencia consumidos para diferentes empujes, obteniéndose así, la caracterización de diferentes motores con diferentes hélices. Con la caracterización de los motores y el coeficiente de fricción aerodinámica, se podrá calcular el tiempo de vuelo, y la capacidad de las baterías necesarias para tal fin.

PARTE EXPERIMENTAL

Primer prototipo
Se construyó un drón híbrido de 1.4m de envergadura y un peso de 1.5Kg (Img.1), al cual se le instalaron cuatro motores con las características para levantar 2Kg, por lo que podría despegar y aterrizar verticalmente con empuje de sobra. Se le instalaron los motores ligeramente inclinados al frente para provocar un desplazamiento hacia adelante y analizar su comportamiento en vuelo para ver su factibilidad. El resultado cumplió las expectativas en el despegue y el aterrizaje, y mostró un vuelo horizontal más estable a bajas velocidades que una aeronave tipo avión, debido a la acción de los cuatro motores que en su conjunto y en todo momento producen un empuje vertical que se distribuye entre ellos corrigiendo los efectos del viento cruzado.

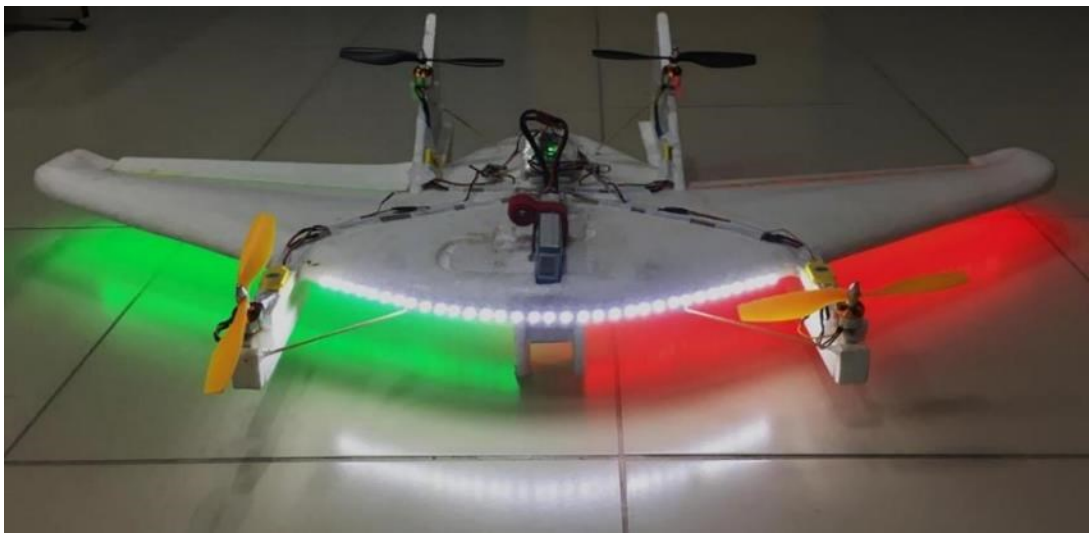
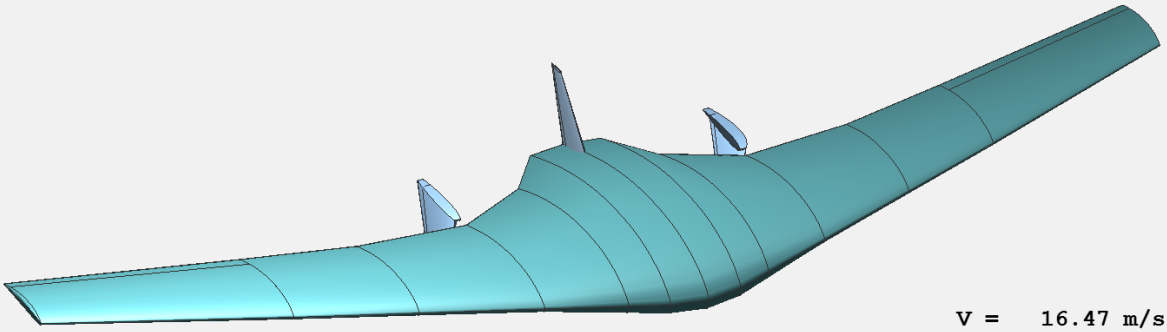


Imagen 1.Drón híbrido de 1.4m de envergadura y 1.5Kg.

Simulación del ala

Mediante la aplicación XFLR5 se simula una aeronave con ala delta, de 2m de envergadura y 5kg de peso (img.2). Se obtiene una velocidad mínima de 16.47m/s, equivalentes a 60Km/h, para mantenerse en vuelo. El coeficiente de resistencia aerodinámica arrojado es CD=0.018.

En la simulación del vuelo con perturbaciones muestra una recuperación en menos de tres segundos.



```
AlaTaperada
Wing Span       =     2.000 m
xyProj. Span    =     2.000 m
Wing Area       =     0.748 m²
xyProj. Area    =     0.748 m²
Plane Mass      =     5.000 kg
Wing Load       =     6.683 kg/m²
Tail Volume     =     0.006
Root Chord      =     0.780 m
MAC             =     0.441 m
TipTwist        =     0.000°
Aspect Ratio    =     5.347
Taper Ratio     =     3.900
Root-Tip Sweep  =    23.509°
XNP = d(XCp.Cl)/dCl =     0.000 m
Mesh elements   =   835
```

```
              V =   16.47 m/s
          Alpha =    2.423°
           Beta =    0.000°
             CL =    0.391
             CD =    0.018
     Efficiency =    1.031
          CL/CD =   22.095
             Cm =   -0.000
             Cl =   -0.000
             Cn =   -0.000
           X_NP =    0.360 m
           X_CP =    0.445 m
           X_CG =    0.444 m
Wing Flap 1 Moment = -0.0105 N.m
Wing Flap 2 Moment = -0.0105 N.m
Elev Flap 1 Moment = -0.0000 N.m
Elev Flap 2 Moment = -0.0000 N.m
Elev Flap 3 Moment = -0.0000 N.m
Elev Flap 4 Moment = -0.0000 N.m
Fin  Flap 1 Moment =  0.0000 N.m
```

Dron Híbrido 2m detallado*

Imagen 2. Drón híbrido de 2m de envergadura y 5Kg de masa simulado con XFLR5.

Construcción del drón

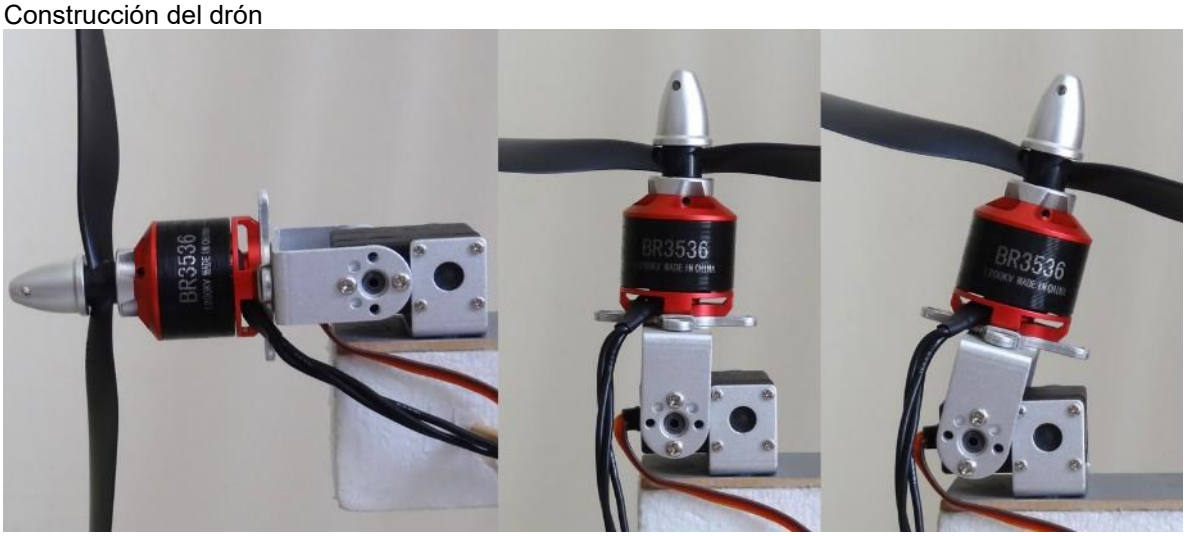


Imagen 3. Motor delantero en posición de vuelo de crucero y estático.

Los dos motores delanteros se montaron sobre un par de servomotores (img.3), que permitirán cambiar la dirección del empuje ligeramente para cumplir la función de estabilización y hasta 90° para cambiar del modo de vuelo vertical a horizontal.

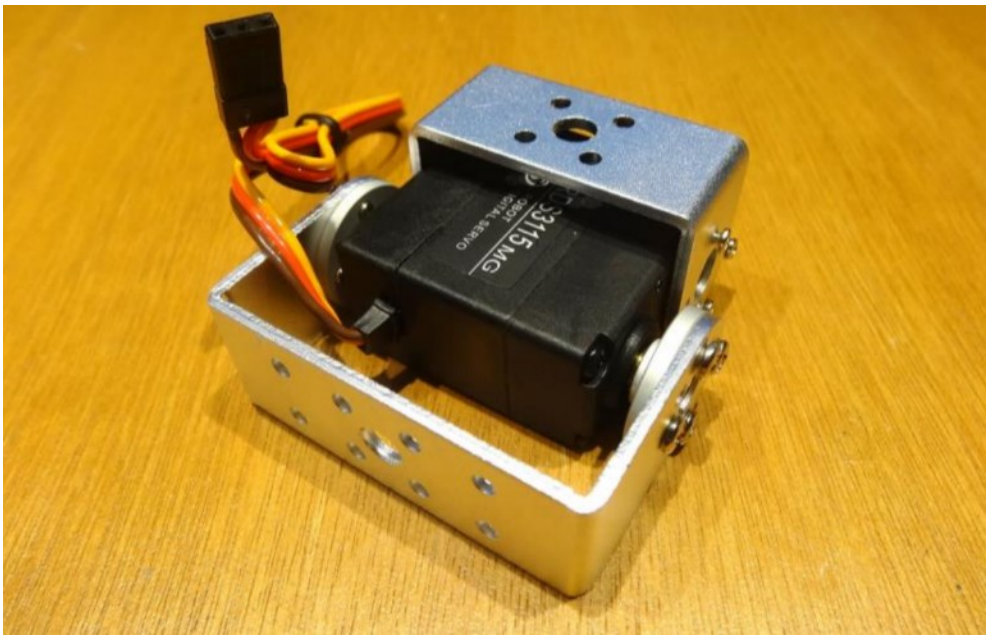


Imagen 4. Motor delantero en posición de vuelo de crucero y estático

Para la sustentación en la parte trasera de la aeronave, se utilizaron dos motores fijos en posición vertical, los cuales proporcionaran solamente empuje vertical para el despegue y el aterrizaje.

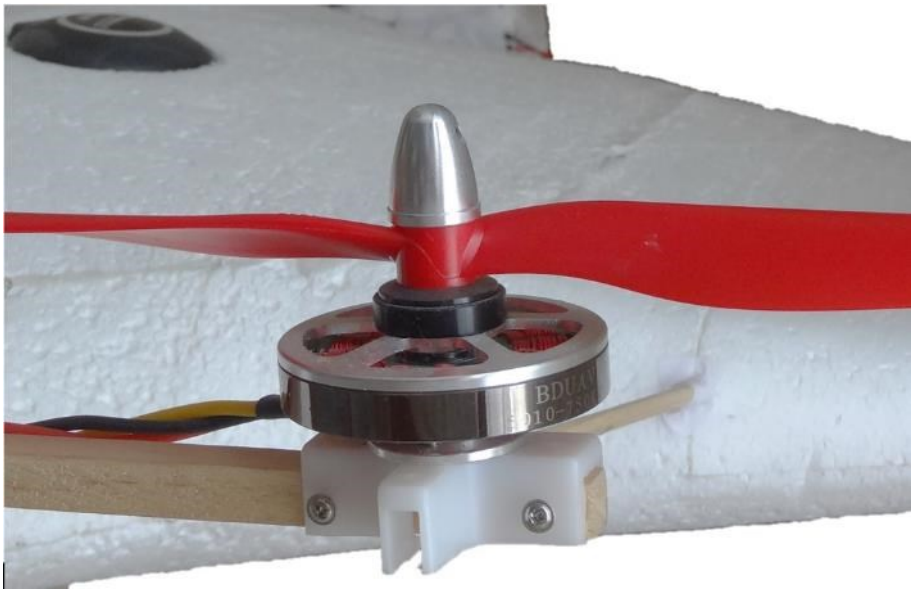


Imagen 5. Motores traseros 5010.

La aeronave casi terminada (img.6), destaca cuatro superficies de control en la punta de las alas, mismas que servirán para elevar el ángulo de ataque durante la transición del vuelo vertical a horizontal y del horizontal al vertical, además de proporcionar estabilidad durante el vuelo horizontal.

Opcionalmente contará con un tren de aterrizaje de tres ruedas en caso de que se pueda contar con una pista de aterrizaje y se requiera llevar una carga mayor que supere los cinco kilogramos. Se le agregaron luces de navegación debajo, en la parte frontal y trasera, además de las puntas de las alas (img.7), esto para que sea visible durante la noche y se sepa en qué dirección está orientado. Se observa que contará con una brújula y un sistema de GPS (img.8), además de podérsele cargar un plan de vuelo para una misión autónoma.

Imagen 6. Drón de 2m de envergadura.

Imagen 7. Luces de navegación.

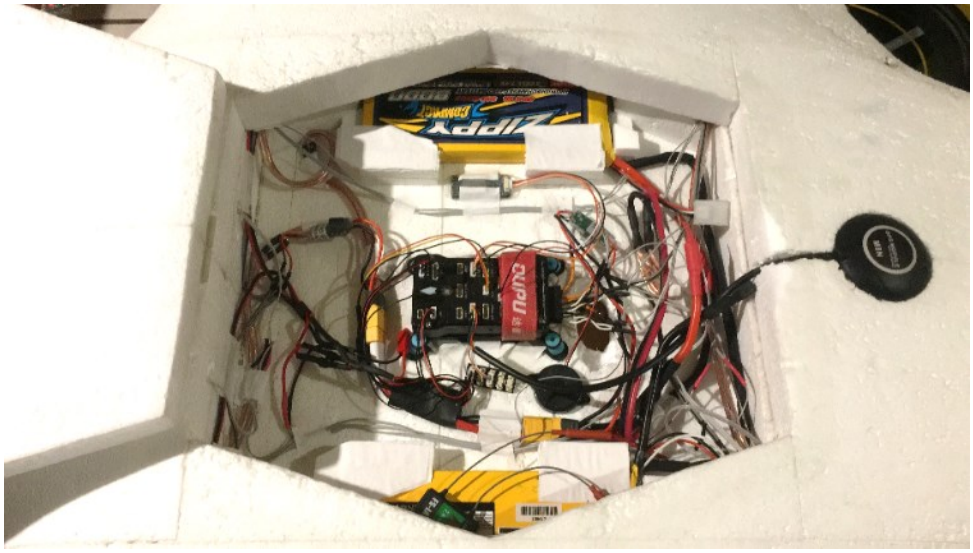


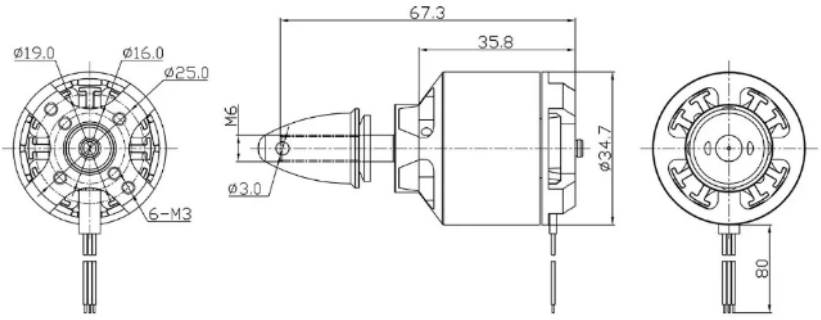
Imagen 8. Drón de 2m de envergadura.

Caracterización de Motores y hélices

Se montaron los motores con sus respectivas hélices de diez pulgadas de diámetro, sobre una báscula para medir el empuje al ir aumentando su velocidad de giro. Mediante un multímetro, se midió en todo momento, el voltaje, la corriente y la potencia del motor.

Imagen 9. Pruebas de empuje estático y consumo de energía.

MOTOR OUTLINE DRAWING



MOTOR PERFORMANCE DATA

MODEL	KV (rpm/V)	Voltage (V)	Prop	Load Current (A)	Pull (g)	Power (W)	Efficiency (g/W)	Lipo Cell	Weight (g) Approx
D3536	1200	11.1	10x6	35	1580	388	4.1	2-4S	115

Imagen 10. Características del fabricante del motor D3536.

El resultado de las mediciones, generó varias tablas para cada motor. Se muestran dos de ellas generadas por un voltaje de batería de dieciséis voltios.

Motor BR3536 1300 kv, batería 4S y Hélice 10X50SF				
Fuerza gramos	Corriente Amperios	Potencia Watts	Voltaje Voltios	Rendimiento g/W
100	0.79	23.00	16.39	7.69
200	1.70	27.80	16.33	7.19
300	2.84	45.80	16.16	6.55
400	3.75	60.30	16.09	6.63
500	5.22	83.80	16.03	5.97
600	6.93	110.70	15.91	5.42
700	8.63	136.90	15.85	5.11
800	10.45	165.10	15.79	4.85
900	12.27	191.70	15.62	4.69
1000	13.75	213.90	15.56	4.68
1100	16.13	248.20	15.32	4.43
1200	18.40	282.10	15.32	4.25
1300	20.93	317.80	15.18	4.09

Tabla 1. Caracterización del motor BR3536 con batería 4S y hélice 1050SF.

Motor 5010 750kv, batería 4S y Hélice 10X50SF				
Fuerza gramos	Corriente Amperios	Potencia Watts	Voltaje Voltios	Rendimiento g/W
200	1.20	20.40	16.33	9.80
300	2.10	35.10	16.27	8.55
400	3.30	53.40	16.21	7.49
500	4.30	69.70	16.09	7.17
600	6.00	96.20	15.97	6.24
700	7.50	119.30	15.91	5.87
800	9.20	145.90	15.85	5.48
900	10.30	162.70	15.73	5.53
1000	12.20	191.70	15.62	5.22
1080	13.40	208.60	15.56	5.17

Tabla 2. Caracterización del motor 5010 con batería 4S y hélice 1050SF.

Batería

Durante las pruebas de empuje estático, para mantener 4.500g en el aire, mediante cuatro motores, se tendría un consumo de 17 amperios por motor delantero con hélice de 10 pulgadas y 11 amperios por motor trasero con hélice de 12 pulgadas, dando como resultado, un consumo total de 56 amperios, esto conectando las baterías en serie para aumentar el voltaje a 16 voltios, y disminuir la corriente al entregar la misma potencia. Al dividir entre la corriente nominal de la batería, que en este caso es de 8000mAh, se obtiene 5.75C. Como la batería es de 30C, estaría trabajando a un 23% de su capacidad de descarga.

$$\boldsymbol{capacidad\ de\ descarga\ de\ la\ batería} = \left(\frac{\boldsymbol{56A}}{\boldsymbol{8Ah\ batería}}\right) = \boldsymbol{7C}$$

Imagen 11. Batería de dos celdas, 8000 mAh y 30C.

Para estimar el tiempo de vuelo estático máximo, dividiríamos el total de la energía de la batería que es de 8000mAh, entre la corriente consumida de 56A.

$$\boldsymbol{vuelo\ estático} = \left(\frac{\boldsymbol{8Ah\ batería}}{\boldsymbol{56A}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{60min}}{\boldsymbol{1h}}\right) = \boldsymbol{8.6min}$$

Para estimar el tiempo de vuelo de crucero máximo, utilizaríamos la velocidad de crucero, el coeficiente de fricción dinámica y el área estimada para encontrar la fuerza que se requiere para que la aeronave vuele a 60Km/h o 16.47m/s.

$$\boldsymbol{F_d = \frac{1}{2}(C_d * \rho * v^2 * A)}$$

$$\boldsymbol{F_d = \frac{1}{2}\left(1 * 1.3\frac{Kg}{m^3} * (16.47m/s)^2 * 0.05\ m^2\right)}$$

$$F_d = 8.81N = 0.9Kg$$

Estimaremos la resistencia al avance en 1.2Kg, que corresponderían 600g por motor, según la tabla 1, el consumo del motor correspondería a 6.93 amperios, en total para los dos motores serían 14A.

$$vuelo\ de\ crucero = \left(\frac{8Ah\ batería}{14A}\right)\left(\frac{60min}{1h}\right) = 34.3min$$

Suponiendo un minuto para el despegue y el aterrizaje, se calcularían los amperios hora consumidos durante ese minuto con la corriente demandada en vuelo estático.

$$corriente\ consumida = 1\ min\left(\frac{1h}{60min}\right)56A = 0.93Ah$$

A la corriente hora total de la batería, se le restaría la corriente consumida durante el despegue y el aterrizaje, para obtener la corriente hora que quedaría en la batería.

$$corriente\ restante = 8Ah - 0.93Ah = 7.07Ah$$

Con la corriente hora restante en la batería, y la corriente demandada durante el vuelo de crucero, se calculó el tiempo de vuelo de crucero.

$$vuelo\ de\ crucero = \left(\frac{7Ah\ batería}{14A}\right)\left(\frac{60min}{1h}\right) = 30min$$

30 minutos a la velocidad de 60Km/h obtendríamos una autonomía de:

$$distancia\ de\ vuelo = 30min\left(\frac{1h}{60min}\right)\left(\frac{60Km}{1h}\right) = 30Km$$

RESULTADOS

La menor densidad en la atmósfera por la altura de la ciudad de León, disminuye entre un diez y un veinte porciento, la eficiencia de las hélices, por lo que se ha tenido que utilizar motores que tengan la capacidad de girar más rápido, o utilizar hélices de mayor diámetro. Con la carga paga máxima de 1.5Kg, se tendrá la corriente hora mínima de las baterías, lo que limita a 15 kilómetros el radio de acción de la aeronave.

CONCLUSIONES

Los modelos híbridos entre ala giratoria y ala fija han resultado en plataformas versátiles y estables, pudiendo recorrer mayores distancias que un modelo de ala giratoria.
Por el contrario, la complejidad los vuelve más costosos y pesados, más susceptibles a errores en su construcción y fallas en su operación. Su configuración resulta más compleja, al prever escenarios más exigentes en su navegación. Son un reto en el cual ya estamos embarcados debido a la demanda de entrega de mercancías y la disminución de costos para ello.

REFERENCIAS

1. Wingcopter (2021). “Technical Details Wingcopter 178 Heavy Lift A (Delivery Variant)”. Enero. [Archivo PDF]. Sitio web: https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2021/02/Technical-Details-Wingcopter-178-Heavy-Lift-A-Delivery-Variant-1-1.pdf

AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA SBR PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

A. Muñoz-Veloz[1], A. J Hurtado-Mariles[2], P. A. López-Cuenca[3], G. I. Cerón-Montes[4], M. Quezada-Cruz[5]*

Laboratorio de Biotecnología Ambiental, División Químico Biológicas. Universidad Tecnológica de Tecámac, Edo. de México. Km. 37.5 Carretera Federal, Col. Sierra Hermosa. Tecámac, Edo. de México. CP. 55740

andresmveloz@gmail.com, *maryquezada9@gmail.com

RESUMEN

En México se reportan como tratadas el 57% de las aguas residuales colectadas, sin embargo, más de la mitad de las plantas de tratamiento municipales presentan una calificación de mala a pésima en su funcionamiento. Este proyecto experimental tuvo como propósito desarrollar la automatización de un Sequencing Batch Reactor a escala laboratorio con un empaque de tezontle para tratar agua residual de la Universidad Tecnológica de Tecámac. Se inició con el desarrollo de un programa en el software RSLogix 500 junto a una interfaz hombre-máquina en RSView 32. Para obtener una vista previa del reactor modeló en 3D cada uno de sus componentes con el software Solidworks. Con estos elementos mencionados se construyó la estructura del reactor y al mismo tiempo se desarrollaron los sistemas eléctricos y electrónicos de control. Tras periodos de 24 horas entre cada descarga se realizaron pruebas fisicoquímicas y microbiológicas. Los resultados mostraron que se obtuvo un porcentaje de remoción del 100% ante sólidos sedimentables, 98.5% y 99% de remoción de coliformes totales y fecales respectivamente, por último, se alcanzó un porcentaje de remoción de %83.33 de materia orgánica, como dato adicional, se realizó una observación microscópica del empaque contenido por el reactor y se encontraron microorganismos indicadores de buena calidad de agua como Arcella sp., Euglypha sp., y rotíferos del género Philodina sp.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un tema crítico en la actualidad, ya que las plantas de tratamiento municipal presentan una calificación de mala a pésima en su funcionamiento, lo que genera importantes implicaciones ambientales, económicas y sociales. En México, se reportan como tratadas el 57% de las aguas residuales colectadas, pero más de la mitad de las plantas de tratamiento municipales presentan una calificación de mala a pésima en su funcionamiento. Esto se debe a tres factores: las grandes cantidades de energía eléctrica necesarias, el costo de lodos activados y el material especial, así como los costos por funcionar con un volumen de agua residual excedente a su capacidad (Ceja, 2019).

El objetivo de este trabajo es automatizar un sistema SBR (Sequencing Batch Reactor) para el tratamiento de aguas residuales. El SBR es un proceso biológico discontinuo y secuencial ampliamente utilizado para la depuración de aguas residuales. Sin embargo, en algunas ocasiones, debido a distintas causas asociadas habitualmente con la tipología del agua residual, los requisitos de calidad del vertido o el propio diseño del proceso, presenta importantes limitaciones para una depuración segura y eficaz (Martínez y García, 2020).

El tratamiento de aguas residuales es fundamental para proteger el medio ambiente y la salud humana. Los principales contaminantes en grandes cantidades que podemos encontrar dentro de las aguas residuales son introducidos en el medio ambiente principalmente por el medio acuático terrestre y marino, entre ellos podemos destacar residuos farmacéuticos y fármacos, hormonas, detergentes, productos fitosanitarios, productos de higiene personal, estimulantes como la cafeína, etc. (Simón *et al.*, 2021).

El uso de tecnologías de control de optimización para el tratamiento de aguas residuales puede ayudar a reducir el costo operativo, aumentar el rango de tratamiento y, por lo tanto, mejorar la calidad del agua en el ambiente (Fan y Xie, 2011).

TEORÍA

Aguas residuales

Es el nombre dado al agua de desecho generada en las casas habitación. Presenta variaciones y fluctuaciones en el gasto y la composición a lo largo del día y del año, debido a las actividades hogareñas. Es frecuente que el flujo que llega a las plantas de tratamiento contenga agua residual doméstica, industrial y pluvias. El agua residual urbana, frecuentemente, es de color gris, tiene turbiedad y material flotante. Cabe destacar que, comúnmente, la contaminación la constituye un pequeño porcentaje de sólidos, del orden 0.1% (1,000 mg/L) (Jiménez, 2011).

Descargas residuales

Las descargas residuales se refieren a las aguas residuales generadas por las actividades humanas, como residuos domésticos, industriales y agrícolas. Estas descargas pueden contener sustancias químicas, biológicas y físicas que pueden afectar negativamente el medio ambiente y la salud humana si no se tratan adecuadamente (Jiménez, 2011).

Calidad de las descargas

Depende de su origen y se dividen en tres tipos: puntuales, accidentales y dispersas. Las fuentes puntuales son más fáciles de controlar debido a que se conoce su localización y, por lo tanto, se facilita el muestreo, la cuantificación y el análisis. Generalmente, éstas se generan en la industria o en los municipios. Las dispersas, en cambio, son de difícil control y provienen de retorno agrícolas, silvicultura, lixiviados de residuos y desechos sólidos, erosión, drenados de minas, lavado de contaminación atmosférica, falta de drenaje, fugas y fosas sépticas. Por último, las descargas accidentales son casi imposibles de cuantificar, pues como su nombre lo indica ocurren aleatoriamente. Los accidentes industriales, como los derrames de Pemex, son de muy difícil control, por lo que se deben establecer estrategias específicas para enfrentarlos en cada caso (Jiménez, 2001). Para determinar la calidad del agua y sus descargas, las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas son fundamentales para evaluar la calidad del agua residual. Estas pruebas incluyen análisis de pH, temperatura, conductividad, turbidez, nitrógeno amoniacal, fosfatos, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*. Estos parámetros son críticos para determinar la eficiencia del tratamiento del agua residual.

Bioprocesos

Los bioprocesos implican la utilización de microorganismos para degradar y eliminar sustancias químicas y biológicas del agua residual. Estos procesos pueden incluir la oxidación, la reducción y la fermentación. Los bioprocesos son efectivos para eliminar materia orgánica, nitrógeno y fosfatos del agua residual (Doran, 1995).

Sequencing Batch Reactor

El Sequencing Batch Reactor (SBR) es un sistema de llenado y extracción para el tratamiento de aguas residuales, el cual, su prototipo del concepto de “lodos activos” se basó en este sistema, agregando un reactor por “lotes” con el fin de eliminar componentes indeseados y luego descargarlos. Las etapas de reacción, aireación y sedimentación se pueden realizar en el mismo reactor. Este tipo de reactores son especialmente utilizados para el tratamiento de aguas residuales caracterizadas por sus condiciones de bajo flujo o intermitente. Las etapas del SBR consisten en: llenado, reacción, sedimentación y descarga (Wang y Shammas, 2010).

Lodos Activados

Los lodos activados son una técnica de tratamiento de agua residual que implica la oxidación de la materia orgánica mediante la adición de oxígeno. Los microorganismos presentes en los lodos activados requieren de un medio adecuado rico en oxígeno y alimento. En estas condiciones estos microorganismos se multiplican rápidamente formando la biomasa, que oxida los diferentes tipos de materia orgánica presente en las aguas residuales y completan de esta forma el tratamiento biológico. Algunas bacterias tienen la capacidad de unirse a otras para formar lodos, estos permiten

una alta eficiencia en el proceso de sedimentación secundaria para obtener un efluente final más transparente y de mejor calidad. Los lodos están conformados por microrganismos, materia orgánica e inorgánica Los lodos activados son efectivos para eliminar materia orgánica, nitrógeno y fosfatos del agua residual (Arcos, 2014).

Automatización

La automatización de los procesos industriales constituye uno de los objetivos más importants de las empresas en la siempre incesante tarea de la búsqueda de la competitividad en un entorno cambiante y agresivo. La automatización de un proceso industrial, consiste en la incorporación al mismo, de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguran su control y buen comportamiento. Dicho automatismo, en general ha de ser capaz de reacciones frente a las situaciones previstas de antemano y además frente a imponderables, tener como objetivo situar al proceso y a los recursos humanos que lo asisten en la situación más favorable (García, 2020).

Estructura de un Sistema Automatizado

La estructura de un Sistema Automatizado puede clasificarse en dos partes claramente diferenciadas, las cuales son: Parte Operativa y Parte de Control. Parte operativa: Es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen mover la máquina como motores de corriente continua y alterna, cilindros neumáticos, accionadores hidráulicos, compresores, captadores y transductores. Parte de mando: La parte de mando puede ser un autómata programable. En un sistema de fabricación automatizado está el autómata programable en el centro del sistema. El autómata programable debe ser capaz de comunicarse con todos los contribuyentes del sistema automatizado. El autómata es el dispositivo encargado de realizar la coordinación de las distintas operaciones encaminadas a mantener la Parte Operativa bajo control (García, 2020).

Autómatas Programables

García (2020) describe a un autómata es el encargado de elaborar las acciones a realizar sobre el sistema de fabricación en base al programa que ha sido introducido en su memoria, en base a las señales de los captadores, y en base a las órdenes que provengan del operador. El autómata dialoga con el operario, recibiendo consignas y suministrando informaciones. Puede coordinarse con otros procesos comunicándose con los demás autómatas de la línea de producción o con un nivel de supervisión. Las principales funciones de un autómata son: Detección, mando, dialogo Hombre-Máquina y programación.

Automatismos secuenciales

La automatización de los procesos industriales constituye uno de los objetivos más importantes de las empresas en la siempre incesante tarea de la búsqueda de la competitividad en un entorno cambiante y agresivo. La automatización de un proceso industrial, (máquina, conjunto o equipo industrial) consiste en la incorporación al mismo, de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento. Dicho automatismo, en general ha de ser capaz de reaccionar frente a las situaciones previstas de antemano y además frente a imponderables, tener como objetivo situar al proceso y a los recursos humanos que lo asisten en la situación más favorable (García, 2020).

Modelado 3D

El modelado 3D utiliza un entorno gráfico, intuitivo y fácil de manejar para diseñar y simular que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable (Gómez, 2008).

Instrumentación

En los inicios de la era industrial, la operatoria de los procesos se llevaba a cabo con un control manual de estas variables utilizando sólo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con qué éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización

progresiva por medio de los instrumentos de medición y control. Estos instrumentos han ido liberando al personal de campo de su función de actuación física directa en la planta y, al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas (Creus, 2011).

PARTE EXPERIMENTAL

Programación

Se elaboró un código de control en lógica Ladder que fue implementado en el sistema que evalúa los sensores y tiempos de operación para realizar cada una de sus etapas y en caso de que la evaluación resulte negativa se mantendrá en esa etapa hasta cumplirla. Con la intención de simplificar la operación del reactor en secuencia automática o en cada etapa por separado (llenado, aireación o vaciado), se implementó una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) en la cual se observó el estado de cada elemento y etapa del reactor (Figura 1). En la zona superior se colocaron dos botones digitales que corresponden a "PARO" e "INICIO" los cuales pueden ser activados desde la computadora. En la misma línea se posicionaron los indicadores de "SENSOR LLENO" y "SENSOR VACÍO", que indicaban cuando los sensores del mundo físico se activaban, cambiando a un color verde. En la zona central se colocaron cuatro lámparas indicadoras, la primera señalaba cuando se activaba la etapa de llenado, la segunda cuando se activaba la etapa de reacción, la tercera cuando se activaba la etapa de sedimentación y la cuarta cuando se activaba la etapa de vaciado

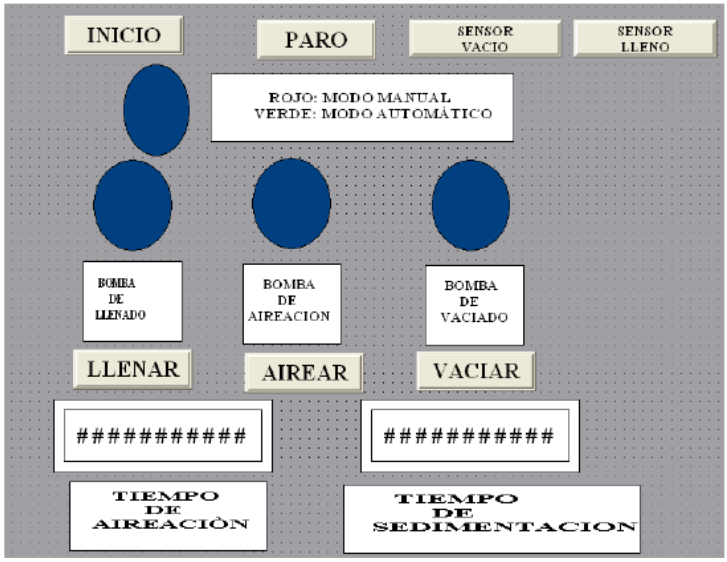


Figura 1. Interfaz Hombre-Máquina del SBR.

Diseño y construcción del SBR

El diseño y construcción del SBR se llevó a cabo de manera detallada y precisa. Se diseñó la columna de acrílico con una capacidad de 20 L y se construyó un soporte robusto para el reactor. El sistema de aireación se basó en dos mangueras conectadas a bombas de oxígeno para suministrar aire de manera eficiente. Se modeló el SBR en 3D utilizando SolidWorks (Figura 2A), lo que permitió visualizar cada elemento del sistema. Se elaboró un Diagrama de Tuberías e Instrumentación para guiar la lectura y comprensión del sistema. Los diagramas eléctricos y electrónicos detallaron el uso de voltajes y la protección del controlador. La construcción del SBR incluyó la implementación de un empaque de tezontle para mantener los microorganismos en el reactor, y se colocó una malla plástica para controlar el burbujeo durante la etapa de aireación. Además, se añadió una llave de paso para purgar los sedimentos generados durante el proceso de limpieza.

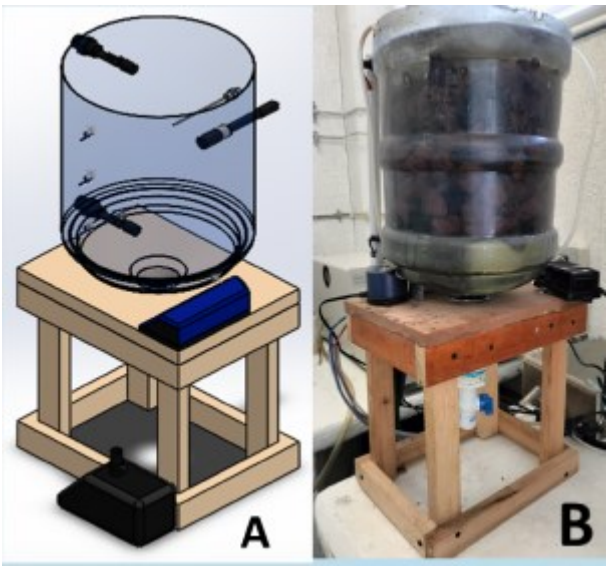


Figura 2. A) Modelo 3D del SBR. B) Modelo construido y ensamblado.

Determinación de la Eficiencia del SBR

Materia Orgánica
Se determinó la materia orgánica de acuerdo con Clesceri *et al.*, (1992) mediante el método de Demanda Química de Oxígeno (ROQ). Se utilizaron soluciones de digestión de dicromato de potasio (K2Cr2O7), ácido sulfúrico (H2SO4) y el indicador ferroína ($C_{36}H_{24}FeN_{62}$). Para la titulación se utilizó sulfato ferroso amoniacal (AFA). Se prepararon muestras por triplicado de agua residual y agua tratada en el SBR.

Sólidos Sedimentables
El análisis de sólidos sedimentables se realizó con base en la NMX-AA-004-SCFI-2013. Se tomó una muestra de 1 litro de agua residual y agua tratada en el SBR y se dejó sedimentar en un cono Imhoff durante 45 minutos. Se registró el volumen de sólidos sedimentados en ml/L.

Análisis Microbiológico
Se realizó el análisis microbiológico de coliformes totales y fecales mediante la técnica de tubos múltiples con base en la NMX-AA-042-SCFI-2015. Se inocularon alícuotas de 10 ml, 1 ml y 0.1 ml de agua residual y agua tratada en caldo lactosado de doble concentración. Después de 48 horas de incubación a 35°C, se realizó la prueba presuntiva observando turbidez y producción de gas. Las muestras positivas se resembraron en caldo verde bilis brillante para la prueba confirmativa a 44.5°C durante 24 horas

RESULTADOS

Los resultados (Tabla 1) se muestran en promedio semanal. Los resultados obtenidos en sólidos sedimentables se compararon de acuerdo con NOM-001-ECOL-1996 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1997), esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales. El influente tuvo una concentración de 1.5ml/L de sólidos sedimentables, es decir están dentro de los límites máximos permisibles (1-7.5ml/L), sin embargo, al ser tratados por el SBR automatizado fueron removidos por completo, adicionalmente se pudo observar un cambio en las propiedades organolépticas de olor y color, en cuanto color hubo un cambio de amarillo-café (turbio) a transparente y de un olor a huevo podrido y agua estancada a inolora.

Determinación	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Eficiencia (%)
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Sólidos sedimentables (ml/L)	0.7	0	1.5	0	1	0	100
Coliformes totales (NMP/100mL)	460	4	460	≤3	≥2400	≤3	98.03 – 99.87
Coliformes fecales (NMP/100mL)	110	11	≥2400	240	≥2400	93	94 - 99
Materia orgánica (mg/L)	373.33	170.6	96	16	144	37.3	54.30– 83.33

Durante el desarrollo de la determinación de coliformes totales y fecales se pudo observar que los tubos con la muestra de agua residual sin tratar generaban turbidez y gas dentro de las campanas de Durham en la prueba presuntiva y la prueba confirmativa en todos los tubos, al realizar las mismas pruebas en el agua tratada, se observó la disminución de la turbidez y gas de hasta 3 tubos. En esta prueba se demostró una reducción mayor al 90 % en la cuantificación de coliformes totales y fecales después del tratamiento, estos resultados fueron similares a los obtenidos por Muñoz-Nava y Baumann (2017) que trabajaron con un SBR acoplado a un humedal, en el análisis realizado de la salida del SBR alcanzaron una eficiencia de 98.62% para coliformes totales, dato similar al obtenido por el SBR automatizado en el presente trabajo (98.95%). Para coliformes fecales se compararon los resultados obtenidos con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (Secretaría De Medio Ambiente, y Recursos Naturales, 1998), la cual indica que el límite máximo permisible es de 240 NMP/100ml y 1000 NMP/100ml para contacto directo e indirecto al público respectivamente, el SBR automatizado alcanzó una remoción de coliformes fecales de 11 NMP/100ml, representando una remoción de hasta el 99% y por lo tanto la concentración está dentro del límite máximo permisible, este resultado se obtuvo al comparar la cantidad de tubos que presentaron fermentación entre el agua residual y el agua tratada.

En la determinación de materia orgánica (como ROQ) se observó que antes de ingresar los tubos de ensayo al horno mostraban un color amarillo claro y según fuera la muestra (agua residual o tratada), la solución podía tornarse a un color verde claro o mantener un color amarillo. Al adicionar el indicador de ferroína se modificó la muestra a un tono verde oscuro. En la titulación se observó que los tubos con agua residual, se utilizaron hasta 1.5 ml de titulante en comparación del agua tratada en la que se utilizaron hasta 2.4 ml, la cantidad utilizada en este último era similar a la utilizada en los tubos testigos (2.5 ml). Los cambios visibles en las soluciones se pudieron observar en un orden especifico durante la viración , inició en un tono verde oscuro, en segundo lugar, un color azul turquesa, posteriormente una decoloración y por último una coloración rojiza.

Se realizó una observación microscópica con muestra extraída del empaque de tezontle y agua contenida en el reactor. Durante la observación se apreció la presencia de algunos microorganismos que de acuerdo con Isac *et al.* (2008) son indicadores de buena calidad de agua. Se pudieron observar amebas testáceas como *Euglypha* sp., su presencia es sinónimo de bajas concentraciones de sólidos en el reactor y a buenas condiciones del efluente (Figura 3A) y *Arcella* (Figura 3B) que representa bajas cargas orgánicas, altos tiempos de retención celular, además, Ginoris *et al.* (2007) menciona que ambos microorganismos son indicadores de una satisfactoria oxigenación dentro del reactor y lodos activados de una edad avanzada (mayor a 20 días).

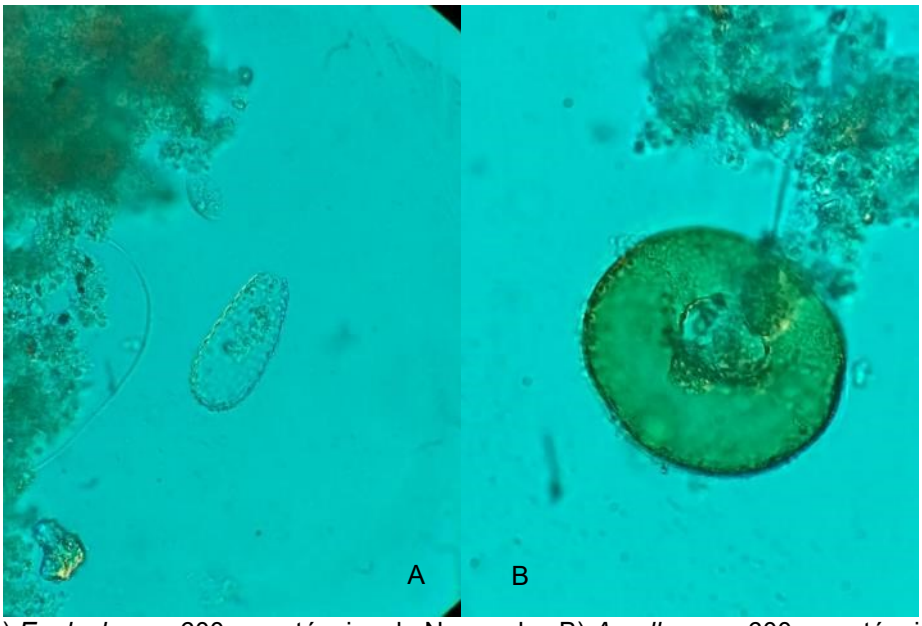


Figura 3. A) *Euglypha* sp. 600x con técnica de Nomarsky. B) *Arcella* sp. a 600x con técnica de Nomarsky.

Otros microorganismos observados fueron *Trinema* sp., que es poco frecuente en lodos activados (Figura 4A), por último, otro microorganismo presente dentro del reactor fue un rotífero del género *Philodina* sp., presente en sistemas con lodos activados de edad avanzada. También, Méndez *et al.* (2004) menciona que éste último es un indicador de buena calidad de agua (Figura 4B).

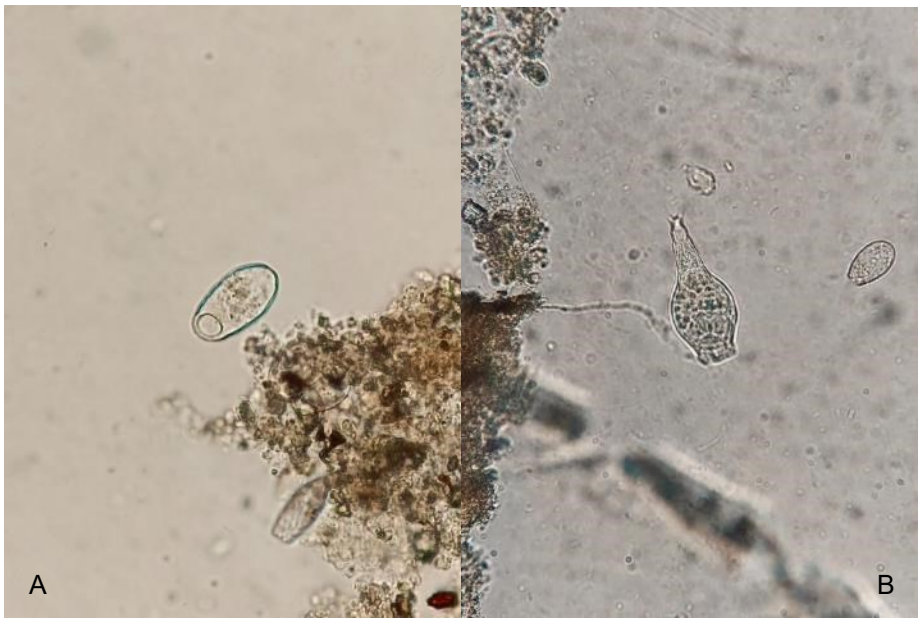


Figura 4. A) *Trinema* sp. en 300x. B) Rotifero *Philodina* sp. a 300x.

CONCLUSIONES

El SBR automatizado demostró eficiencia en la remoción de materia orgánica, sólidos sedimentables y coliformes totales y fecales. La DQO disminuyó en un 90% y los sólidos sedimentables fueron removidos por completo. El sistema también redujo significativamente los coliformes totales y fecales

BIBLIOGRAFÍA

1. Arcos, Y. (2014). Microbiología de lodos activados. Hechos Microbiológicos, 4(2), 117–122. https://doi.org/10.17533/udea.hm.21093

2. Akyürek, A., Ağdağ, O. N. (2024). Comparison of constructed wetlands and package type sequencing batch biological treatment plants in rural areas in terms of efficiency and cost in a full-scale example. Ecological Engineering, 201(107190), 107190. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107190

3. Basu, S. (2023). Batch process control and automation. In Plant Intelligent Automation and Digital Transformation (209–241). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90246-5.00014-4

4. Bournazou, M., Hooshiar, K., Arellano-Garcia, H., Wozny, G., Lyberatos, G. (2013). Model based optimization of the intermittent aeration profile for SBRs under partial nitrification. Water Research, 47(10), 3399–3410. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.044

5. Ceja, Z. (2019). Tratamiento de aguas residuales. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC . Información Cientifica y Tecnológica para el Congreso de la Unión 28, 1-3 https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf

6. Clesceri, S., Greenberg, E., Trussell, R. (1992). Requerimiento de Oxígeno Químico. Clesceri, S., Greenberg, E., Trussell, R. Métodos normalizados para aguas potables y residuales. (12-18). Ediciones Díaz de Santos.

7. Cohen, A., Hegg, D., De Michele M., Song, Q., Ksabov, N. (2003). An intelligent controller for automated operation of sequencing batch reactors. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 47(12), 57-63. https://doi.org/10.2166/wst.2003.0628

8. Creus, A. (2011). Instrumentación industrial. Alfa Omega Grupo Editor S.A. de C.V.

9. Doran, M. (1995). Bioprocess Engineering Principles. Academic Press Inc. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=GoOqw3hKIyIC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Doran,+P.+M.+(2006).+Bioprocess+Engineering+Principles+(2nd+ed.).+Academic+Press.&ots=ZOX9nwfkg_&sig=PBgfSX_4pWR2pYTzE0_lZFIPftc#v=onepage&q&f=false

10. Fan, L., Xie, Y. (2011). Optimization Control of SBR Wastewater Treatment Process Based on Pattern Recognition. Procedia Environmental Sciences, 10, 20–25. https://doi:10.1016/j.proenv.2011.09.005

11. García, E. (2020). Automatización de procesos industriales. Robótica y Automática. Universidad Politécnica de Valencia. https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8e93e52-34be-44c8-a377-364b03b76cfd/TOC_6607_01_01.pdf?guest=true

12. Ginoris, Y., Amaral, A., Nicolau, A., Coelho, M., Ferreira, C. (2007). Development of an image analysis procedure for identifying protozoa and metazoa typical of activated sludge system. Water Research, 41(12), 2581–2589. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.006

13. Gómez, S. (2008). El gran libro de Solidworks. Marcombo, Ediciones Técnicas.

14. Irizar, I. (2021). A mathematical framework for optimum design and operation of SBR processes. Journal of Water Process Engineering, 39(101703),1-13. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101703

15. Isac, L., Rodríguez, E., Salas, D., Fernández, N., Zornoza, A. (2008). Atlas de protistas y metazoos presentes en fangos activos. Jornada Internacional de Tratamiento y Reutilización en Aguas Residuales, 8-76. https://www.researchgate.net/publication/234842687_Atlas_de_protistas_y_metazoos_presentes_en_fangos_activos

16. Jiménez, B. (2011). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, Colegio de ingenieros ambientales en México, A. C., Instituto de ingeniería de la UNAM y FEMISCA.

17. Langergraber, G., Gupta, K., Pressl, A., Hofstaedter, F., Lettl, W., Weingartner, A., Fleischmann, N. (2004). On-line monitoring for control of a pilot-scale sequencing batch reactor using a submersible UV/VIS spectrometer. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 50(10), 73–80. https://doi:10.2166/wst.2004.061

18. Lobo, C. C., Bertola, N. C., Contreras, E. M. (2016). Approximate expressions of a SBR for wastewater treatment: Comparison with numeric solutions and application to predict the biomass concentration in real cases. Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 100, 65–73. https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.12.008

19. Martínez, R., García, P. (2020). Conversión de procesos biológicos SBR en biología de membranas MBR. Una alternativa técnica sostenible. WEHRLE. https://www.wehrle-werk.de/sites/default/files/sidebar/fa_conversion_de_sbr_en_mbr_es_oct._2020_p.garcia_r.martinez_0.pdf

20. Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., Carrasco, N. (2004). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. Instituto de Investigación FIGMMG, 7(14), 74–83. https://core.ac.uk/download/pdf/304893961.pdf

21. Muñoz-Nava, H., Baumann, J. (2017). Remoción de bacterias coliformes en un sistema de lodos activados y humedal construido. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 4(11), 287. https://doi.org/10.19136/era.a4n11.913

22. Rockwell, A. (1996). Juego de instrucciones SLC 500 y MicroLogix 1000. Allen-Bradley https://fdocuments.in/download/manual-de-plc-rslogix-500-56b83028d5f0d

23. Simón, P., Lardín, C., Sanchez, A., López, J. (2021). Estudio del efecto del carbón activo como material filtrante en el tratamiento terciario de la edar de abanilla (murcia) como alternativa a las arenas de sílex-antracita y efecto sobre la eliminación de contaminantes emergentes. AGUASRESIDUALES.INFO, 10. https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/estudio-del-efecto-del-carbon-activo-como-material-filtrante-en-el-tratamiento-terciario-de-la-edar-de-abanilla-murcia

24. Secretaría de economía. (2016). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015 análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termo tolerantes) Y Escherichia coli – método Del número más probable en tubos múltiples

(cancela a la NMX-AA-42-1987). Diario Oficial de la Federación, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf

25. Secretaría de economía. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-AA-004-SCFI-2013, análisis de agua - medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y Residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000). Diario Oficial de la Federación, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf

26. Secretaría De Medio Ambiente, y Recursos Naturales. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los lí¬mites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, México. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf

27. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación, México. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf

28. Wang, K., Shammas, K. (2010). Sequencing batch reactor technology. In Environmental Biotechnology, 10,721–747. https://doi:10.1007/978-1-60327-140-0_15

CONTROL INALAMBRICO DE UN ROBOT MÓVIL UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE RADIOFRECUENCIA POR BLUETOOTH

Ortiz Vega, M.J.[1, 2], Cervantes Ramírez, L.A.[1], Núñez Olvera, O.F.[2], Sánchez Niño, F.[1,2]

[1]Universidad Tangamanga Campus Industrias, Av. Industrias 3690, Zona Industrial, San Luis Potosí, S.L.P, 78395, México.
[2]IICO – UASLP, Av. Karakorum 1470 Lomas 4ª sección, San Luis Potosí, S.L.P, 78210, México.

RESUMEN

En este trabajo se presenta como interfaz de control inalámbrico de un robot de tipo vehicular, una aplicación móvil para sistemas operativos Android llamada: “Arduino Bluetooth Controller”, dicha aplicación se constituye como el núcleo central de funcionamiento del robot diseñado para probar el correcto funcionamiento de la aplicación Android antes mencionada. Esta aplicación permite controlar de forma manual y remota el funcionamiento del robot móvil, esto lo logra tomando el control del módulo bluetooth del equipo en donde es instalada la aplicación y emparejándose con un cliente bluetooth, como, por ejemplo, el módulo HC-05. Todo esto en conjunto permite supervisar y dirigir los movimientos de los motores acoplados a las llantas del vehículo. Un Arduino Mega 2560 se emplea como enlace de control entre la aplicación y el robot móvil, dado que tiene la responsabilidad de controlar y alimentar determinados dispositivos, toma una serie de decisiones de acuerdo con el programa descargado e interactúa con él físicamente gracias a sensores y actuadores. Adicionalmente se agrega un sensor ultrasónico que es utilizado para que el robot pueda evadir algún obstáculo que se presente cuando realice algún tipo de tarea o movimiento.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de control inalámbrico de un robot móvil utilizando tecnología de radiofrecuencia por bluetooth, las razones por la cual se implementó este proyecto, es que permite proporcionar una mayor movilidad y flexibilidad en el manejo del robot móvil, también reduce la necesidad de cables y conexiones físicas, así como la optimización de recursos. Sobre todo permite una interacción más dinámica entre el usuario y el robot móvil, posibilitando un control más intuitivo y preciso. En este contexto, se aborda una problemática fundamental relacionada en las limitaciones de movilidad actuales debido a conexiones físicas y cómo esta afecta la eficiencia operativa y disminuye la capacidad de respuesta del sistema dado que limita el potencial del robot en entornos dinámicos. Ante este escenario se planteó la necesidad de implementar un sistema de control inalámbrico utilizando tecnología de radiofrecuencia y específicamente bluetooth, esta solución no solo eliminará las restricciones físicas, sino que también proporciona al robot una capacidad de respuesta mejorada y una mejor adaptación a entornos cambiantes.

TEORÍA

A medida que la tecnología evoluciona, la robótica inalámbrica se presenta como una herramienta clave para ampliar las capacidades y aplicaciones de los robots en el siglo XXI. Su evolución ha transformado la manera en que interactuamos y supervisamos robots en diversas situaciones. La capacidad de dirigir y supervisar las operaciones de un robot de forma remota no se encuentra limitada por conexiones físicas, abriendo así nuevos caminos de exploración y automatización. Gracias a tecnología como bluetooth, Wi-Fi y radiofrecuencia, el dominio de la robótica inalámbrica se ha destacado en áreas que van desde la movilidad robótica hasta la tele presencia y automatización industrial.

Los protocolos de comunicación son estándares de comunicación inalámbrica orientados a implementaciones de aplicaciones de adquisición de datos, medición y control de procesos. La radiofrecuencia utiliza ondas de radio para la transmisión de datos con un alcance limitado. A continuación, el Wi-Fi respaldado por el estándar IEEE 802.11, es uno de los protocolos que permite comunicarse a través de puntos de acceso y routers inalámbricos. Por último, él xbee (Zigbee) está basado en el estándar Zigbee (IEE 802.15.4), especializado en redes de bajo consumo y corto alcance, diseñado específicamente para controles y sensores remotos. (De Redacción De Agendapro, 2022)

Ahora al dirigirnos hacia la comunicación bluetooth es un estándar desarrollado para comunicaciones de datos de corto alcance, se utiliza un protocolo RFCOMM ”Radio Frequency Communication” dado que es un conjunto simple de transporte construido sobre el protocolo L2CAP ”Logical Link Control and Adaptation Protocol” que proporciona sesenta conexiones simultaneas para dispositivos bluetooth emulando puertos serie RS-232. (UNAM)

PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto se centra en un carrito de control manual, operado a través de una aplicación móvil. Su funcionamiento implica utilizar botones para determinar la dirección del movimiento del carro.

Además, incorpora un mecanismo de paro de emergencia que facilita la detección de obstáculos en el entorno, para lograr esto se emplearon los siguientes componentes:

- Arduino Mega 2560
- Modulo bluetooth HC-05
- Puente H L298N
- Sensor Ultrasónico HC-SR04
- Chasis
- Baterías de 9V

El carro dispone de 6 movimientos, que comprenden:

- Izquierda
- Derecha
- Hacia delante
- Detener
- Giro izquierda
- Giro derecha

La aplicación móvil es importante destacar que se trata de una aplicación prediseñada. Esta aplicación se conecta automáticamente mediante bluetooth, aunque se requiere configuración adicional desde la terminal para asignar la tarea específica.

El programa fue desarrollado desde Arduino IDE para controlar un carro con un puente H, se realizó la definición de los pines para el puente H que controla dos motores y también para los pines del sensor ultrasónico , se estableció la configuración inicial de la función para la dirección de los pines como entrada o salida según corresponda , en el bucle principal se verifico si hay datos disponibles en el puerto serie para la lectura de los valores recibidos que en este caso son los movimientos de los motores, también para controlar su velocidad se realizó mediante los pines de habilitación.

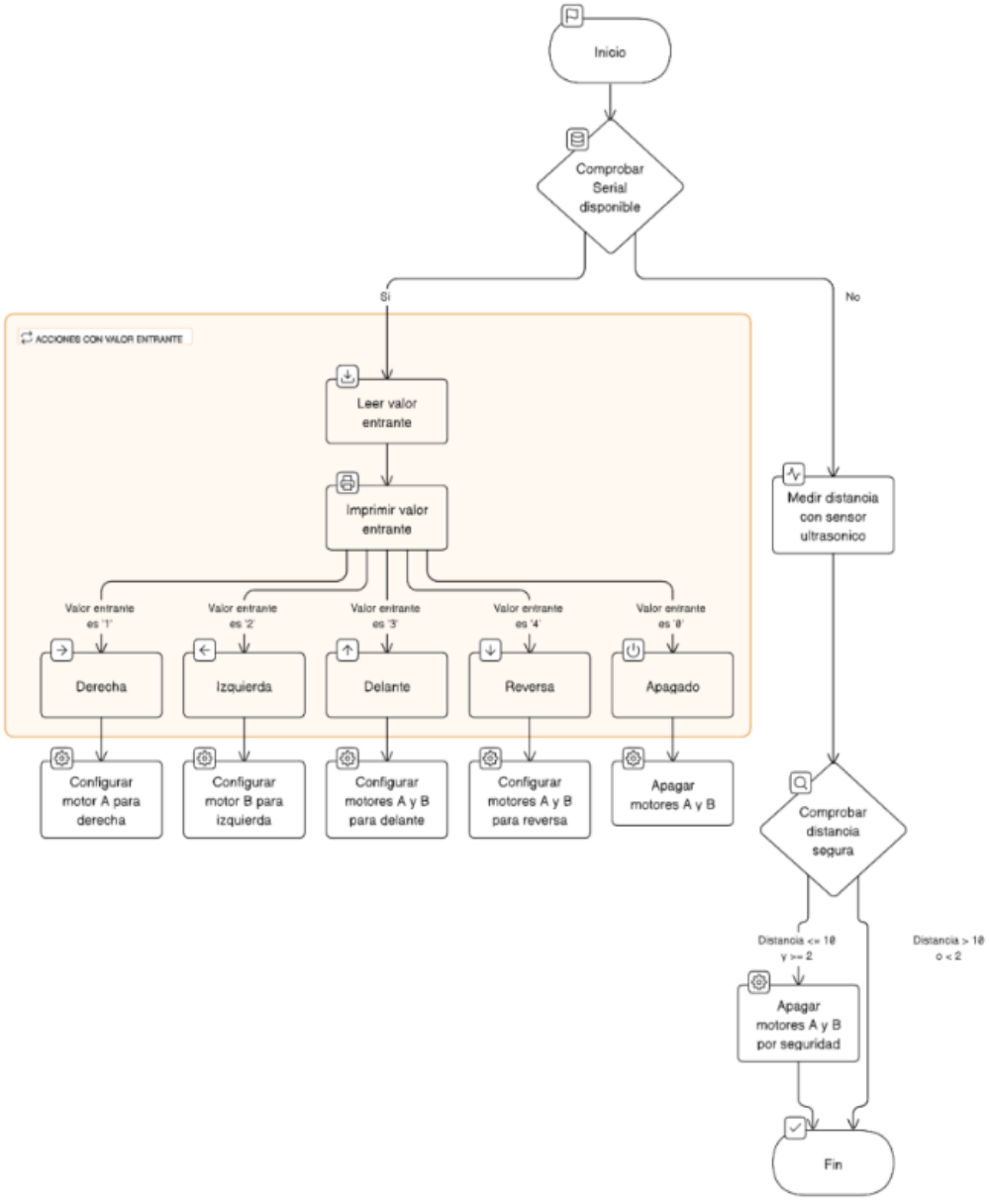
Se utilizó la biblioteca Software Serial para establecer la comunicación, al ser recibidos los comandos, controlan el movimiento del robot. Pará el sensor ultrasónico, sé emitieron pulsos y se midió la duración hasta que el pulso regresa. Dado que la distancia se calcula basada en la duración del pulso, si la distancia es menor o igual a 10 cm y mayor o igual a 2 cm, se detienen ambos motores.

La figura 1 presenta el diagrama de flujo que ilustra de manera gráfica el funcionamiento del programa.

Para el control manual se cuenta con dos interfaces de la aplicación móvil una que consta de cuatro botones que tienen una correspondencia directa con los distintos movimientos de los motores. Cada botón designa una función específica permitiendo al usuario un control intuitivo y directo sobre el movimiento del sistema, la segunda interfaz se presenta con la composición de un game controller simulando un control de videojuegos, se estructura de manera específica con la disposición de botones, palancas o elementos táctiles dado que se adapta para ofrecer un manejo eficiente y preciso permitiendo al usuario ejecutar de manera cómoda y controlada.

Asimismo, se incorpora un paro de emergencia de respaldo con el sensor ultrasónico HC-SR04 dado que permite la detección de obstáculos en el entorno del carro, el paro de emergencia se activa automáticamente para evitar impactos no deseados.

Figura 1. Diagrama de flujo del sistema de control de motor, sensor ultrasónico y modulo bluetooth



RESULTADOS

Después de completar el diseño electrónico y el código destinado para la implementación en el Arduino 2560, se procedió a realizar pruebas iníciales de funcionamiento, una de las pruebas incluyó la verificación de comunicación entre el Arduino, modulo bluetooth, sensor ultrasónico y aplicación móvil las cuales arrojaron resultados satisfactorios, como se puede observar en la figura 2. Seguidamente, se llevaron a cabo pruebas en los motores con el propósito de ajustar, si fuera necesario, el sentido del giro y confirmar que respondieran a las direcciones enviadas.

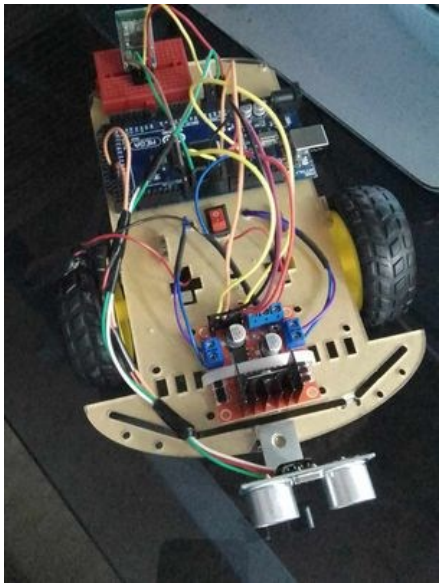


Figura 2. Carro y aplicación ejecutándose de manera integrada

CONCLUSIONES

Se ha concebido un sistema de control inalámbrico para un robot móvil. Este sistema se materializa a través de una aplicación prediseñada llamada “Arduino bluetooth controller” disponible para dispositivos Android, dicha aplicación facilita el control manual y eficiente permitiendo la supervisión y dirección de los movimientos de los motores mediante el módulo de comunicación bluetooth, en el núcleo de configuración se implementa un Arduino Mega 2560 con sus funciones especiales, tales como la interacción con el modulo bluetooth y sensor ultrasónico dado que contribuyen al rendimiento integral del sistema

REFERENCIAS

1. Módulo Bluetooth HC05. (s. f.). NaylampMechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html
2. Cáceres, P. S. (2018, 3 marzo). ARDUINO: Sensor ultrasónico HC-SR04. Blog de Tecnología - IES José Arencibia Gil - Telde. https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2018/02/06/arduino-sensor-ultrasonico-hc-sr04/
3. CODIZI. (s. f.). Control de GIRO y VELOCIDAD de MOTORES con L298N. https://codiziapp.com/projects/control-de-giro-y-velocidad-de-motores-con-l298n

4. SIECLED. (s. f.). https://www.siecled.com/sistemas-de-control-inalambrico-IoT.html
5. Sistema Inalámbrico de Control Remoto para sistemas de Visualización - HUB digital de innovación. (2022, 10 agosto). HUB Digital de Innovación. https://www.upm.es/recursosidi/offers-resources/patentes/sistema-inalambrico-de-control-remoto-para-sistemas-de-visualizacion/
6. Miboxeador. (2023, 11 agosto). Embrace thefreedom: Theadvantages of wirelessremote control systems. miboxeador. https://miboxer.com/es/noticias-de-la-industria/abrace-la-libertad-las-ventajas-de-los-sistemas-de-control-remoto-inalambrico/
7. Tipos de protocolos de comunicación, qué son y para qué sirven. (2022, septiembre 13). Agendapro.com. https://blog.agendapro.com/centros-de-salud/tipos-de-protocolos-de-comunicacion

EL SOFTWARE COMO SERVICIO EN LA NUBE (SAAS): INNOVACIONES Y DESAFÍOS CON ONSHAPE EN LA INGENIERÍA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Marlen León Serrano, Cinthya Guadalupe Silva Gallardo, César Manuel Hernández Mendoza, Juan Pablo Serrano Rubio

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) es un área de conocimiento que considera técnicas, herramientas y funciones relacionados con el uso de un software especializado, los estudiantes de ingeniería lo practican para satisfacer necesidades de diseño en la industria que pueden mejorar e innovar sus procesos. Así mismo, se puede considerar una ciencia debido a que requiere la aplicación de principios matemáticos, físicos, mecánicos, de materiales, algoritmos, entre otros. Por esta razón un estudiante de ingeniería debe contar con un equipo de cómputo adecuado que le permita desarrollar estas actividades. Por otra parte, puede llegar a ser debatible que software de CAD es el que se debe enseñar y practicar en el salón de clases, y no solo eso, también hay que combatir algunos obstáculos técnicos y económicos para hacer uso de estos programas especializados, tales como la demanda de recursos que debe tener el equipo de cómputo, ya que en ocasiones y según el diseño trabajado, puede ser muy alto el procesamiento en memoria y en la tarjeta gráfica, pudiendo ralentizar el equipo. Además, las instituciones educativas deben crear convenios, pagar la licencia durante algunos años o adquirir los derechos para hacer uso de algún software; en algunos casos las licencias superan los cientos de miles de pesos, dificultando a un centro educativo poder hacer uso de ellos, por lo que es muy común que las instituciones opten por el software que facilite estos trámites y se adapte a su presupuesto, propiciando que el profesor utilice únicamente este software. Como parte de este proyecto se utilizó una metodología que hace uso de una plataforma de CAD en línea integrada al modelo del SaaS (Software como Servicio), que permite contribuir a la solución de la problemática planteada y ser una opción más para que académicos, profesionistas y otras personas interesadas en el tema, cuenten con una opción viable para el desarrollo de las habilidades de diseño, análisis y modelado. Con este proyecto, los estudiantes pudieron aprovechar ventajas y beneficios que ofrecen los tipos de servicios en la nube, ya que el servicio SaaS es un modelo en donde los estudiantes no se preocupan por la instalación del software, su actualización, licencia, compatibilidad entre versiones, archivos compatibles con otros programas o el mantenimiento del mismo, ya que la plataforma controla todo esto y se hace responsable de casi todo lo requerido, dejando al estudiante en un escenario perfecto en donde lo único que requiere es “internet” para trabajar. Finalmente, el proyecto permitió a dos grupos de Sistemas Automotrices adquirir las habilidades y competencias requeridas en la materia de Fundamentos de Dibujo mediante un software libre que les permite acceder y utilizar esta plataforma como un servicio en línea y disminuyendo la carga de recursos en sus equipos.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se trabaja con tecnologías de vanguardia que ofrecen los servicios en la nube, conocido como: “Cloud Computing”, específicamente trabajamos con el Software como servicio (SaaS) el cual tiene como objetivo ofrecer aplicaciones de software mediante un navegador de internet a usuarios finales (en este caso los estudiantes de Sistemas Automotrices), cabe recalcar que este servicio incluye el préstamo de servidores y recursos informáticos del proveedor, es decir, el procesamiento y memoria que se requiere para trabajar con el software se genera en el servidor en internet y no en el equipo de cómputo local del estudiante, por lo que el software y su proveedor son los encargados de mantener actualizado el programa, resguardar copias de seguridad y básicamente todo el Backend (desarrollo web que da seguimiento a la lógica de una página o plataforma web) requerido para hacer uso del software. La plataforma que se utilizó es OnShape, es

un sistema de software de Diseño Asistido por Computadora que, hasta el día de hoy, es único en seguir el modelo de software como servicio que incluye también la gestión de datos en tiempo real.

Integral Innovation Experts, 2023: *La plataforma Onshape conecta a todas sus partes interesadas en un espacio de trabajo en la nube unificado y seguro, lo que permite que su equipo de desarrollo de productos pase más tiempo diseñando y menos tiempo bloqueado por dolores de cabeza de software basados en archivos.*

Onshape, 2023: *Acelere el desarrollo de productos con el poder de la computación en la nube, las herramientas de colaboración en tiempo real y un sistema de Gestión de Datos Productos (PDM) integrado.*

Por otra parte, proponemos trabajar con esta plataforma como una herramienta útil para el Ingeniero en Sistemas Automotrices y otras ingenierías a fines al CAD, consideremos en base a una búsqueda por internet, que existen actualmente en el mercado una lista de al menos 30 programas o plataformas destinadas al CAD, de las cuales es ampliamente debatible cuál de ellas es mejor que otra, tendremos características diferentes, diversas áreas de aplicaciones, ventajas o desventajas, incluso podemos citar empresas que están totalmente vinculadas al uso exclusivo de un solo software, sin embargo no significa que sea el mejor o el más apto para enseñar dentro de las aulas y laboratorios. De este modo los estudiantes y profesores se encuentran con **dos problemáticas**: la primera consiste en el tema de costos, ya que adquirir una sola licencia de software representa un gasto considerable para una institución de educación pública, por lo que es común que ciertos softwares ofrezcan descuentos, convenios o acuerdos para que las instituciones usen su programa que muy probablemente terminen aceptando, el inconveniente es que los estudiantes pueden pasar toda su carrera utilizando el mismo software sin considerar aprender a manejar otros. La segunda problemática tiene que ver con aspectos técnicos que incluso pueden representar un problema o causa raíz para que los estudiantes no aprueben una materia o no realicen sus prácticas, dado que la instalación, licencia, versiones y compatibilidad entre un mismo programa de CAD representa una de sus principales problemáticas, podemos encontrar problemas desde que el programa no abre hasta que según las capacidades del equipo de cómputo no pueda generar simulaciones o no se puedan visualizar diferentes perspectivas de un modelo debido a que el equipo se ralentiza, en ocasiones si el profesor cuenta con una versión más actualizada del software, los estudiantes no podrán ver/abrir sus trabajos, de este modo la segunda problemática incide totalmente en la capacidad de las prestaciones del equipo de cómputo y la versión del software.

Por estas razones el equipo de investigación considera que los estudiantes que trabajan con CAD deben conocer y utilizar de dos a tres programas especializados durante toda su carrera con el fin de que puedan entender y desarrollar habilidades propias al diseño, modelado y análisis de piezas que pudieran generar, para crear bocetos o cumplir con necesidades que la industria y el sector laboral les pudiera solicitar en un futuro cercano, además de utilizar las tecnologías de vanguardia que pudieran complementar su profesión.

TEORÍA

Learn-Microsoft, 2023: *El modelo de responsabilidad compartida se aplica a todos los tipos de servicio en la nube. SaaS es el modelo que sitúa la mayor responsabilidad en el proveedor de nube y la menor responsabilidad en el usuario. En un entorno de SaaS, serán responsabilidad suya los datos que ha puesto en el sistema, los dispositivos que le permiten conectarse al sistema y los usuarios que tienen acceso. De casi todo lo demás se encargará el proveedor de nube. Este será el responsable de la seguridad física de los centros de datos, la potencia, la conectividad de red, así como del desarrollo y la aplicación de revisiones.*

Comenzaremos a describir primeramente que es el Software como servicio, el cual podemos encontrarlo abreviado como “SaaS”, es uno de los servicios en la nube que se ofrece al público en

internet, recordemos que los servicios en la nube nos prestan los recursos, infraestructura y memoria en servidores que pueden estar alojados en diversos países o diferentes continentes, pero que resguardan y están a nuestra disposición 24/7, ejemplos sencillos son el correo electrónico, OneDrive, Drive de Google, entre otros. La plataforma de CAD: OnShape es una plataforma que se rige bajo el servicio SaaS, por lo que permite que los estudiantes solo sean responsables del equipo de cómputo, un explorador, internet y su acceso a la cuenta, mientras que el proveedor se encarga de la identidad del usuario, el funcionamiento de la propia plataforma, los controles de red, el sistema operativo donde se aloja el software, los hosts físicos (discos duros, equipos, servidores), la red física, el datacenter, el mantenimiento y actualización de la plataforma y su seguridad. Véase la Figura 1 para observar esta responsabilidad compartida.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Responsabilidad compartida entre usuario y software

OnShape como Software como Servicio SaaS

OnShape, como hemos descrito en este trabajo, es una plataforma de software como servicio en la nube, entrando propiamente a sus cualidades, podemos mencionar que fue creado como un programa de CAD destinado al uso de múltiples industrias que tengan como objetivo diseñar productos, piezas industriales, maquinarias, o cualquier objeto del que se haga uso en la vida común o líneas de producción. Como es una plataforma relativamente "nueva" y al igual que muchas otras plataformas en línea, ofrece videos y tutoriales para aprender a usarlo. Como antecedente, OnShape fue lanzado en el año 2012 y en 2015 se puso en marcha la plataforma como un SaaS por dos exdirectivos del programa SolidWorks (John Hirschtick y John McEleney), véase la Figura 2.

Fuente: www.engineering.com/story/from-the-sopranos-of-cad-to-the-rebels-in-the-cloud-the-remarkable-journey-of-solidworks-founders

Figura 2. John Hirschtick(derecha) y John McEleney, fundadores de OnShape

Por otra parte, tenemos las características técnicas que hacen de OnShape un diferenciador entre otras plataformas, en las que podemos destacar:

Cuenta con las mismas **características** que presentan otros programas de CAD como análisis y diseño de partes, ensamblaje, vista explosionada, listado de materiales, historial de modificaciones, modificadores, etc.

Gestión de datos: se trata del manejo y control de la información relacionada con los diseños y modelos creados en el software, quiere decir que permite almacenar, organizar, acceder y compartir archivos de diseño 3D de manera estructurada y segura, permitiendo trabajar en los mismos diseños simultáneamente, manteniendo un solo archivo y evitando versiones duplicadas.

Facilita el **flujo de trabajo** en equipo: involucra desde la creación inicial de un diseño hasta su finalización y posible distribución o fabricación, incluye la creación de bocetos, la generación de modelos 3D, la simulación, el dibujo técnico, la colaboración en tiempo real y la aprobación de diseños, entre otras actividades.

Analítica: otro de sus diferenciadores es que la plataforma ofrece funcionalidades para analizar métricas relacionadas con el uso del software (memoria, procesador, tiempo, etc.), el rendimiento de los equipos, el historial de versiones de los diseños y otros datos relevantes para la toma de decisiones informadas.

Al ser un SaaS en la nube y al igual que muchas otras plataformas, OnShape permite la **colaboración** con otros usuarios de manera paralela y simultánea, y en donde se ve reflejado el cambio de cada uno de ellos en tiempo real.

OnShape también permite la **compatibilidad** de las piezas y objetos creados para ser guardados, descargados o exportados a otros programas e incluso permite la descarga directa como un archivo STL, listo para imprimir el objeto creado en una impresora 3D.

Finalmente, el usuario final no necesita dar actualización al software ni mantenimiento alguno, ya que la plataforma se encarga de esto, por lo que tampoco es necesario instalar el software y no exige requerimientos mínimos como si suele suceder en otros programas especializados en CAD. En la Figura 3, se muestra la página web principal de OnShape.

Fuente: www.onshape.com/en/

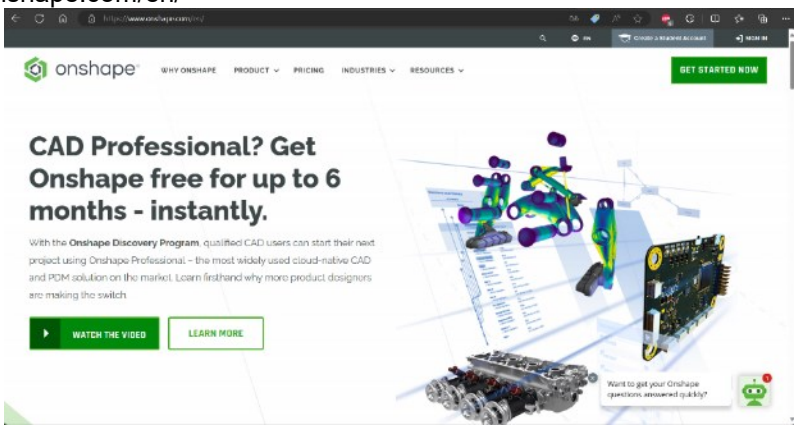


Figura 3. Página principal de OnShape

Competencias y habilidades del estudiante

En otra área de estudio tenemos la parte modular de esta investigación, la cual indica la necesidad de que los estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices logren desarrollar habilidades y competencias enfocadas al Diseño Asistido por Computadora, en este caso para la materia de Fundamentos de Dibujo que se imparte en el primer semestre de su carrera, en donde podemos citar

las competencias que se deben alcanzar según el temario oficial del TECNM para la materia de Fundamentos de Dibujo de la Ingeniería en Sistemas Automotrices cuya clave es SAB-1317:

- *Utiliza al dibujo como herramienta de comunicación*
- *Elabora dibujos seleccionando el menor número de vistas que definen completamente a los objetos en estudio realizado el dimensionamiento.*
- *Realiza dibujos de elementos mecánicos, utilizando vistas auxiliares a fin de determinar los objetos en los planos de proyección.*
- *Realiza dibujos de elementos y/o sistemas mecánicos que se ensamblan.*
- *Realiza ensambles de modelos en CAD-3D de acuerdo a normas y especificaciones con ajustes y tolerancias.*

Así mismo, el temario solicita realizar diversas prácticas en computadora con el fin de que los estudiantes puedan alcanzar y realizar estas competencias previamente mencionadas.

PARTE EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo este proyecto el profesor de la materia y los estudiantes de primer semestre siguieron una metodología de cuatro etapas con el fin de cumplir con las competencias señaladas anteriormente, en la Figura 4 se presenta esta metodología.

Fuente: Elaboración propia

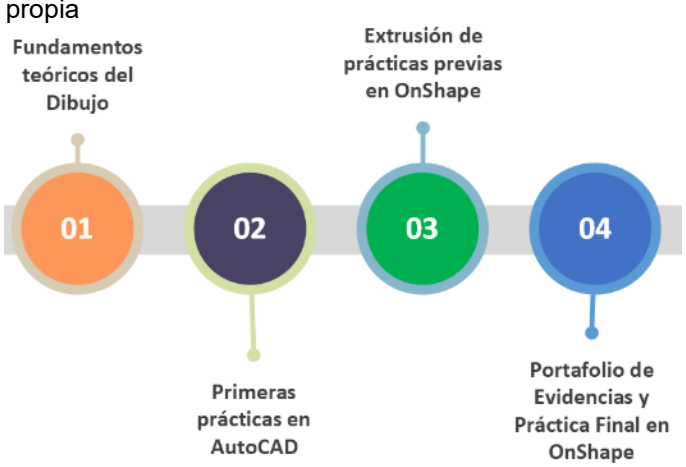


Figura 4. Etapas desarrolladas en la metodología del proyecto

Para comenzar se trabajó con los fundamentos teóricos del dibujo, en este caso los estudiantes conocieron temas y conceptos como: uso de cotas, simbología GD & T, trazos básicos, perspectivas, y formas básicas como círculos por radio, por diámetro, medidas angulares, entre otras, hasta conocer la interfaz y comandos básicos de un software especializado en CAD. Los estudiantes primero realizaron algunos diseños a mano alzada con algunos de estos conceptos, posteriormente trabajaron con AutoCAD y generaron diseños básicos enfocados a piezas mecánicas, en la Figura 5, puede observarse algunas imágenes que se trabajaron en esta etapa.

Se observo que el grupo mantenía interés por aprender la herramienta, algunos estudiantes tenían conocimientos previos, sin embargo, para la mayoría era la primera vez que trabajaban con AutoCad, se percibió una expectativa de realizar diseños cada vez más elaborados.

Así mismo, se fue trabajando las cotas y los comandos básicos para realizar líneas, círculos, arcos, entre otros con el fin de que pudieran practicar por su cuenta. Cabe destacar que los estudiantes realizaban prácticas más complejas a medida que avanzaban con el fin de aplicar comandos previos y otros nuevos que iban aprendiendo para generar estas actividades.

Fuente: Estudiante: Juan Esteban Echeverría Elías / Logo de AutoCAD: www.indiamart.com/proddetail/autodesk-autocad-01-03-yearly-21704753762.html?pos=10&pla=n

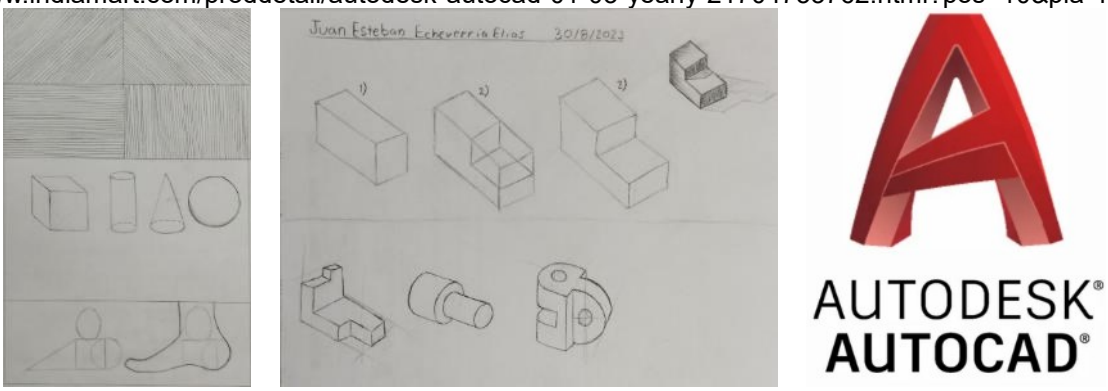
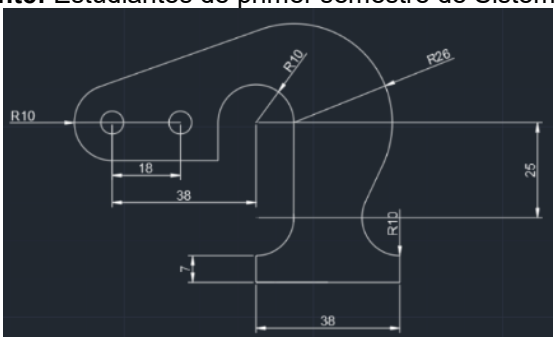


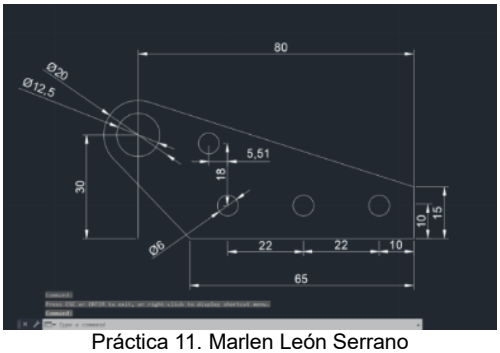
Figura 5. Diseño a mano alzada y logotipo oficial de AutoCAD

En la Figura 6, se observa este proceso, observe que hasta este punto de la metodología los estudiantes no han realizado extrusión de piezas.

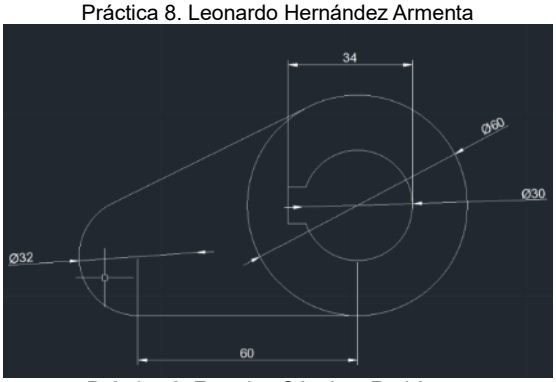
Fuente: Estudiantes de primer semestre de Sistemas Automotrices



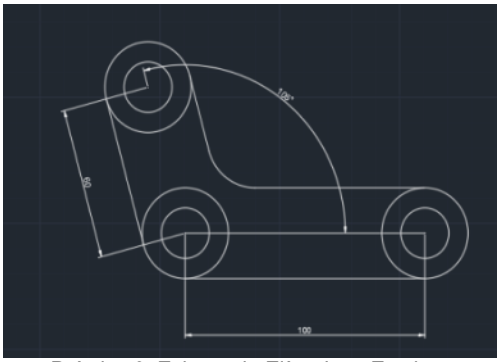
Práctica 8. Leonardo Hernández Armenta



Práctica 11. Marlen León Serrano



Práctica 6. Faustino Sánchez Rodríguez



Práctica 9. Echeverria Elías Juan Esteban

Figura 6. Prácticas realizadas por los estudiantes en AutoCAD

En la tercera etapa se trabaja de manera esencial con la propuesta del proyecto, se les da a conocer a los estudiantes que es OnShape, como trabaja, como funciona, se les presenta como un SaaS y algo que les llama mucho la atención es la forma “diferente y semejante“ a la vez que tiene con AutoCAD, algunas observaciones que hacen los estudiantes al terminar las primeras prácticas son: “*es parecido por que se manejan comandos o herramientas similares, en algunos casos hasta se llaman igual*”, “*son iguales por que al final tienes los mismos diseños generados a partir de las cotas indicadas*”, sin embargo al comenzar a realizar prácticas más complejas, los estudiantes van descubriendo ciertas diferencias, tales como: “*la manera en generar los diseños en OnShape es más*

intuitiva por que la plataforma te indica que debes ir haciendo", "*la extrusión y aplicación de modificadores en OnShape son más fáciles de conseguir*", "*en OnShape la plataforma te indica en color rojo las líneas o curvas que no están interceptadas*". En este punto los estudiantes llevan la mayor carga de trabajo ya que comienzan a generar prácticas más laboriosas y además se les demuestra que las prácticas realizadas en AutoCAD también las puede generar en OnShape. En la Figura 7, se presentan diseños realizados en OnShape, con la finalidad de que los estudiantes pudieran identificar diferencias y semejanzas al generar las mismas prácticas en uno y otro software de CAD. Por otra parte, los estudiantes no percibieron ni presentaron dificultades técnicas al utilizar OnShape, algo por lo que algunos estudiantes estaban preocupados era cuanto "pesaba" el programa, ya que algunos requerían desinstalar otros programas para liberar espacio en su disco duro, pero esta situación no fue requerida, es decir el SaaS realiza eficazmente su trabajo al dejar todo el procesamiento e instalación a los servidores y no al equipo local.

Fuente: Estudiantes de primer semestre de Sistemas Automotrices

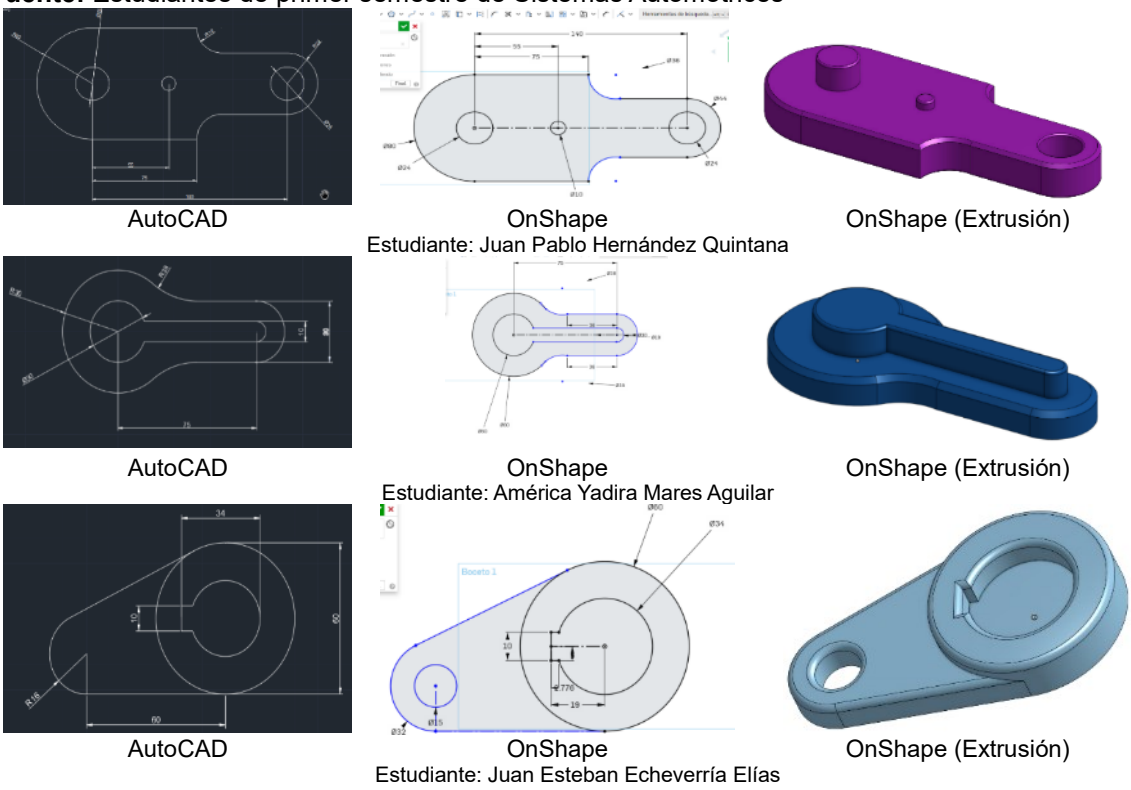


Figura 7. Prácticas realizadas en la tercera etapa con AutoCAD y generadas en OnShape.

Finalmente, en la etapa cuatro, los estudiantes generan su portafolio de evidencias, cabe destacar que este fue un requisito obligatorio para acreditar la materia, además de que se genera para ellos una tarjeta de presentación, utilizan un formato institucional y profesional, además de añadir un diseño por hoja de cada práctica realizada, para que eventualmente puedan demostrar su talento, habilidades y desarrollo de competencias a un tercero o en alguna empresa que solicite personal capacitado en el tema. En esta última etapa, las prácticas solicitadas ya presentaban mayor dificultad y en este punto, la asesoría del profesor no era necesaria, ya que por iniciativa propia los estudiantes comenzaron a buscar e investigar nuevos modificadores que pudieran aplicar para generar sus diseños. Como último trabajo/examen final, los estudiantes tienen que realizar el diseño de una pieza mecánica de cualquier índole en OnShape, utilizar extrusiones y otros modificadores como barridos, vaciado, redondeo o chaflan entre otros. En la Figura 8, se presentan los mejores trabajos obtenidos del portafolio de evidencias.

Con esta metodología el proyecto permitió a los estudiantes conocer dos programas especializados en CAD, así mismo presentaban interés en seguir desarrollando prácticas y aprender nuevos comandos, en algunos casos, los estudiantes proponían nuevos diseños o bien modificaban algunos con el fin de conocer que otras herramientas estaban disponibles. Algo que también se les explico fue que OnShape permite la compatibilidad con otros programas especializados, pudiendo abrir diseños generados en otro software o bien exportando algún diseño al formato STL, el cual puede llegar a imprimirse en una impresora 3D.

Fuente: Estudiantes de primer semestre de Sistemas Automotrices

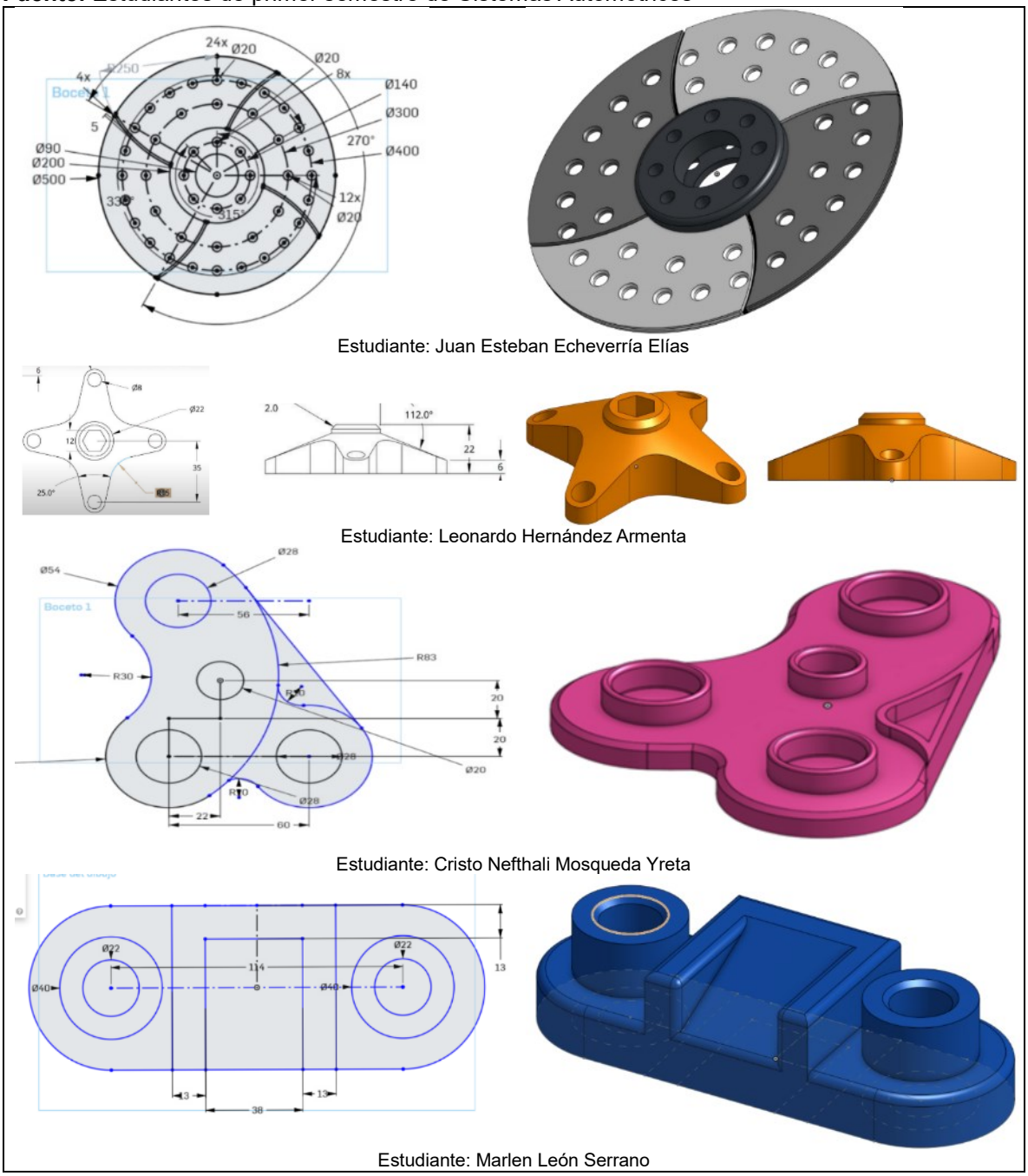


Figura 8. Prácticas generadas en OnShape

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este proyecto se presentan en tres áreas principales: resultados técnicos, resultados de la materia, resultados del SaaS:

Al utilizar AutoCAD los estudiantes presentaron diversas problemáticas técnicas en sus equipos las cuales se describen en la Tabla 1, mientras que en OnShape solo hubo una. Lo que demuestra que el uso de programas y plataformas SaaS facilitan y responsabilizan de casi todo el procesamiento, instalación e infraestructura a la propia plataforma y facilita el acceso a los usuarios evitándoles dificultades técnicas.

AutoCAD	OnShape
El programa no se instala porque mi Sistema Operativo no lo admite	Debo tener internet para usarlo
El programa no se instala porque me marca errores casi cuando termina de instalar. (Falta actualizar, SP, reiniciar, framework, etc.)	--
Debo eliminar programas en mi disco duro por que ya no tengo espacio	--
Cuando trabajo con zoom muy alto y/o comandos de extrusión mi equipo se alenta.	--
No puedo abrir ejercicios de versiones anteriores a mi AutoCAD.	--
A pesar de utilizar la versión de estudiante, el AutoCAD me pide la licencia.	--

Tabla 1. Resultados obtenidos en la parte técnica al utilizar AutoCAD y OnShape

Alcanzar las competencias de la materia se cumple solo con el hecho de trabajar con cualquiera de los dos programas, pero en este caso hay algunas ventajas académicas y profesionales que se adquieren al conocer y desarrollar habilidades en softwares especializados en CAD, es decir, por un lado tenemos que los estudiantes trabajan con el software más popular en CAD, el cual es AutoCAD, lo que permite que de manera general el estudiante pudiera entrar en otros campos de ingeniería que no sea propiamente la de Sistemas Automotrices, ya que existen otras carreras y áreas profesionales que hacen uso de este software para llevar a cabo sus actividades, y también utilizan herramientas digitales de vanguardia, conocen términos y como el uso de servicios en la nube facilitan el trabajo. Por otra parte, en la Tabla 2, se presentan las prácticas realizadas durante el semestre agosto – diciembre del 2023, cabe destacar que el número de prácticas en OnShape es menor debido a que primeramente los estudiantes tuvieron que conocer los conceptos básicos en AutoCAD para poder diferenciar el trabajo en OnShape.

AutoCAD: 29 prácticas	OnShape: 12 prácticas
TOTAL= 41 prácticas	

Tabla 2. Resultados obtenidos como parte de la materia.

CONCLUSIONES

El proyecto permitió a dos grupos de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices adquirir las habilidades y competencias requeridas en la materia de Fundamentos de Dibujo mediante un software libre que les permite acceder y utilizar esta plataforma como un servicio en línea y disminuyendo la carga de recursos en sus equipos, además de permitirles alcanzar las competencias de la materia y el desarrollo de habilidades enfocadas al diseño. Por otra parte, OnShape es (hasta el momento de generar este proyecto) el único software de CAD orientado al SaaS, por lo que es pionero y tiene la posibilidad de encontrar más complementos y usuarios que puedan ayudar a generar una comunidad en línea que ayude a hacer más popular la plataforma y sus funciones. Se espera que este proyecto permita a profesores y otros profesionistas a considerar las ventajas que le ofrece el SaaS y pueda contribuir en su quehacer como docentes en áreas afines al dibujo. El desafío que nosotros consideramos es que OnShape pueda hacer evidente que tiene las mismas cualidades y características que otros programas especializados, además de colaborar simultáneamente en un mismo trabajo desde una plataforma en línea, dejando al usuario en un escenario en donde lo único que requiere es la imaginación y un mouse para comenzar a diseñar.

BIBLIOGRAFÍA

1. 3D natives (Alicia M.). (28 de 05 de 2020). *3D Natives el sitio web de la impresión 3D*. (A. M., Editor) Obtenido de https://www.3dnatives.com/es/onshape-software-3d/

2. Integral Innovation Experts. (20 de 01 de 2024). *https://integralplm.com/*. Obtenido de https://integralplm.com/soluciones/diseno-cad-cae-renderizado-3d/
3. Microsoft Learn. (28 de 01 de 2024). *https://learn.microsoft.com/es-es/training/*. Obtenido de https://learn.microsoft.com/es-es/training/modules/describe-benefits-use-cloud-services/onshape.
4. (15 de 01 de 2024). *https://www.onshape.com/en/*. Obtenido de https://www.onshape.com/en/
5. TECNM, temario oficial del TECNM para la materia de Fundamentos de Dibujo de la Ingeniería en Sistemas Automotrices cuya clave es SAB-1317

EVALUACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LA INHIBICIÓN DE HONGOS TRICHOPHYTON EN POLÍMEROS ENRIQUECIDOS CON AGNPS

Armando Mares Castro, Karen Vianney Caudillo Alcalá, Raúl Reyes Bautista y Martín Barajas Segoviano

Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle # 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato. C.P. 36413, México.
armando.mc@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

El estudio de la propiedad de inhibición del crecimiento de hongos es de particular importancia en materiales que se utilizan en humanos de forma común, ya que se pueden presentar condiciones que generan daños en la piel de los usuarios, en particular en personas con piel delicada como en el caso de los diabéticos. Actualmente no existen normativas específicas para la evaluación del crecimiento de hongos de la familia *Trichophyton* en poliuretanos, por lo cual se deben adaptar metodologías diseñadas originalmente para otro tipo de hongos y materiales para evaluar el crecimiento o inhibición obtenidos en laboratorio. El análisis de hongos *Trichophyton* presenta retos interesantes, ya que la evaluación por métodos de procesamiento de imágenes o biomasa no son muy eficientes debido a las características del hongo, además, se ha observado que la cantidad y velocidad del crecimiento del hongo puede variar en función de los medios de cultivo utilizados, por lo que es importante proponer esquemas de evaluación que sean eficientes.

En esta investigación se presenta un análisis comparativo de evaluación basado en dos normativas, en el primer caso se utiliza una evaluación cualitativa basada en categorías de acuerdo con crecimiento observado, mientras que el segundo método permite la cuantificación por medio de unidades formadoras de colonias. Cada metodología presenta características particulares, como es el caso de los métodos de cultivo utilizados, los tiempos registrados en el crecimiento entre otras.

Los resultados de las pruebas experimentales a nivel laboratorio fueron similares con las dos metodologías, en las cuales se registró inhibición del crecimiento del hongo. La definición del método más eficiente aún requiere de más estudios y pruebas, aunque el método por evaluación cuantitativa puede ser más efectivo debido a la discriminación que se puede obtener en el análisis de efectos en los parámetros experimentales como la concentración, la dispersión de las AgNPs y tamaño de partícula. Las muestras con mejor capacidad antimicótica en aquellas muestras con mayor dispersión de partícula y mayor concentración con 95.2- 88.83% de inhibición contra el hongo.

En la discusión de resultados se presenta un comparativo de las ventajas y desventajas en cuanto a procedimientos de experimentación y evaluación para los dos métodos, lo cual es la aportación principal de esta investigación. Es importante establecer el efecto inhibitorio de cada uno de los parámetros experimentales, lo cual requiere una buena evaluación de la respuesta experimental para ser abordada por diferentes metodologías estadísticas, ya que el paso previo al muestreo estadístico en cualquier metodología experimental consiste en la verificación de eficiencia del sistema de medición a utilizar.

Keywords: Evaluación cualitativa y cuantitativa, inhibición de hongos, Trichophyton, Polímeros.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de la nanotecnología y la química supramolecular ha llevado a una atención creciente en la producción de sistemas poliméricos que incorporan nanopartículas metálicas, destacando propiedades físicas y químicas únicas [1]. En este contexto, las

nanopartículas de plata (AgNPs) han demostrado interferir eficazmente en la replicación viral y fúngica, actuando a través de mecanismos como la prevención de la unión y entrada del virus en la célula huésped y la inhibición de factores celulares internos necesarios para la adecuada asamblea de la progenie viral [2].

Este proyecto se centra en la elaboración y desarrollo de un compuesto a base de poliuretano reforzado con nanopartículas de plata AgNPs con propiedades antimicóticas superficiales [3]. Buscamos evaluar la inhibición fúngica de este compuesto mediante pruebas específicas como la ASTM G21-15 [3] para Determinar la resistencia de los materiales poliméricos para hongos con cepas de *T. rubrum* y *A. Brasiliensis* con la norma ISO 22196 [4] para la medición de actividad antifúngica en superficies plásticas con la cepa *T. rubrum*, variando concentraciones y tamaños de partícula. El objetivo principal es determinar la concentración mínima inhibitoria, explorando así el potencial de esta tecnología en campos diversos, especialmente en medicina. La investigación no solo aspira a contribuir a la comprensión de las propiedades antimicóticas de los nanocompuestos, sino también a abrir nuevas posibilidades para su aplicación en la prevención y tratamiento de infecciones fúngicas en diversos entornos.

La presencia de hongos en materiales de uso cotidiano puede representar un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en individuos con condiciones médicas preexistentes como la diabetes, donde la piel tiende a ser más vulnerable. Los compuestos de poliuretano, ampliamente utilizados en diversas aplicaciones médicas y de consumo, son particularmente susceptibles a la colonización por hongos. Entre estos, los hongos del género **Trichophyton** son notorios por causar infecciones cutáneas que pueden complicarse en personas con piel delicada. La necesidad de desarrollar materiales con propiedades antimicóticas efectivas ha llevado a la incorporación de AgNPs en poliuretanos, debido a sus conocidas propiedades antimicrobianas. No obstante, la evaluación de la eficacia antimicótica de estos materiales enfrenta desafíos significativos, ya que las normativas específicas para la inhibición de hongos como **Trichophyton** en poliuretanos aún no están establecidas.

En este estudio, se propone la adaptación y comparación de dos metodologías distintas para evaluar la inhibición del crecimiento de **Trichophyton** en compuestos de poliuretano con AgNPs. La primera metodología se basa en una evaluación cualitativa que clasifica el crecimiento fúngico en categorías observacionales, mientras que la segunda utiliza una evaluación cuantitativa mediante la medición de unidades formadoras de colonias (UFC). Ambas metodologías fueron aplicadas en condiciones controladas de laboratorio para determinar su efectividad y comparabilidad. Los resultados obtenidos no solo buscan establecer la eficacia antimicótica de los poliuretanos modificados, sino también proponer un esquema de evaluación robusto que pueda ser utilizado como referencia en futuras investigaciones y normativas.

TEORÍA

Desde la antigüedad, la micología médica, relacionada con las enfermedades humanas, comenzó con el descubrimiento de la etiología fúngica del favus y se intensificó con el trabajo de Robert Remak, Johann L. Schönbein y David Gruby, tres médicos europeos de mediados del siglo XIX cuyas aportaciones son reconocidas a nivel mundial. Remak, en 1835, observó por primera vez estructuras microscópicas peculiares que aparecían como bastones y brotes en costras de lesiones. Aunque no publicó sus observaciones, permitió que estas fueran citadas en una tesis doctoral de Xavier Hube en 1837. Remak afirmó que no reconoció las estructuras como fúngicas y atribuyó este reconocimiento a Schönbein, quien describió su naturaleza micótica en 1839.

Pocos hongos causan enfermedades transmisibles, como lo son los dermatofitos, que son enfermedades adquiridas de animales o aves infectadas. Un ejemplo es **Microsporum gallinae**, que se establece principalmente en aves gallináceas. Algunas especies de **Trichophyton**, **Epidermophyton** y **Microsporum** están estrechamente relacionadas con los dermatofitos y parecen ser casi exclusivamente sapróbicas. Los miembros de estos tres géneros no tienen una

designación colectiva, y el término "dermatofitos" debe restringirse para designar a organismos infecciosos, los cuales denominaremos de aquí en adelante dermatofitos y sus congéneres. Este grupo incluye organismos biológicamente relacionados que no están incluidos en las especies de *Chrysosporium*, con teleomorfos en el género *Arthroderma*. Los dermatofitos y sus congéneres se han clasificado durante mucho tiempo en especies antropófilas, zoófilas y geofílicas [5].

La familia *Aspergilli* contiene aproximadamente 340 especies que desempeñan una variedad de funciones biológicas en el medio ambiente, y se sabe que alrededor de 40 de ellas pueden causar problemas de salud [6]. La sección *Nigri* de *Aspergillus* comprende un grupo de especies relacionadas, incluyendo *Aspergillus niger*, *A. welwitschiae*, *A. carbonarius*, *A. brasiliensis* y *A. tubingensis*. Algunas de estas especies son morfológicamente muy similares a *A. niger*, pero exhiben diferentes patrones de susceptibilidad a agentes antifúngicos. Aunque muchas especies de *Aspergillus* no suelen ser dañinas, existen cepas que pueden ocasionar enfermedades cutáneas y pulmonares. Actualmente, estas infecciones se tratan con antifúngicos como los polienos, triazoles y equinocandinas. Estos compuestos actúan sobre la pared celular del hongo, interrumpiendo la biosíntesis de ergosterol o β-1,3-glucano, o dirigiéndose directamente al ergosterol [7].

Los hongos de la familia *Trichophyton*; estos dermatofitos son causantes de tiniea unguium es del 91% en Alemania. *T. rubrum* y *T. interdigitales* (anteriormente conocido como T. mentagrophytes) son responsables de aproximadamente el 90% de todos los casos de dermatofitosis en Polonia y en Gran Bretaña [8]. La infección por *T. rubrum* puede transmitirse por contacto directo con la piel infectada [9].

La nanotecnología es una tecnología habilitadora que se ocupa de estructuras que van desde aproximadamente 1-100 *nm* en al menos una dimensión (British Standards Institute [BSI] 2007; Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados [SCE-NIHR] 2008). El nanotamaño da como resultado las características fisicoquímicas específicas que difieren de las de la sustancia a granel o partículas de mayor tamaño. La nanotecnología está creciendo rápidamente y se utiliza en diversas áreas, como el cuidado de la salud, productos de consumo como cosméticos, TIC, alimentos y piensos, salud ambiental y agricultura [10].

Las nanotecnologías exhiben un potencial significativo en el campo de la medicina, incluidas las técnicas de imagen y las herramientas de diagnóstico, los sistemas de administración de fármacos, las construcciones de ingeniería tisular, los implantes y la terapéutica farmacéutica y han avanzado en tratamientos para varias enfermedades, incluidas las enfermedades cardiovasculares, el cáncer y la gestión de enfermedades, etc. afecciones musculoesqueléticas, enfermedades psiquiátricas y neurodegenerativas, infecciones bacterianas y virales, y diabetes [11].

PARTE EXPERIMENTAL

Para evaluar la capacidad inhibitoria del crecimiento de los hongos, en compuestos de poliuretano (PU) adicionados con AgNPs, se implementaron varias etapas experimentales. Estos pasos incluyen la síntesis del compuesto de PU con AgNPs, la preparación de las cepas fúngicas, y la cuantificación de la mínima concentración inhibitoria. Además, se utilizaron dos normas establecidas para la evaluación de la capacidad inhibitoria: ISO 22196:2011 y ASTM G21-15. A continuación, se describen detalladamente los procedimientos empleados en cada una de estas etapas (Figura 1):

- Síntesis del Compuesto de PU Asistido Adicionado con AgNPs: Se desarrolló un método para integrar las AgNPs en la matriz de poliuretano, asegurando una distribución uniforme de las nanopartículas en el material.
- Preparación de las Cepas Fúngicas: Se cultivaron cepas del hongo en condiciones controladas para asegurar su viabilidad y consistencia en los ensayos posteriores.
- Cuantificación de la Mínima Concentración Inhibitoria (MIC): Utilizando la técnica de Kirby-Bauer, se determinó la menor concentración de AgNPs que inhibe el crecimiento visible del hongo en el compuesto de PU.

- Determinación de la Capacidad Inhibitoria según la Norma ISO 22196:2011: Esta norma se aplicó para medir la actividad antimicrobiana en superficies no porosas tratadas con AgNPs, evaluando la reducción en el número de microorganismos en contacto con la superficie tratada.
- Determinación de la Capacidad Inhibitoria según la Norma ASTM G21-15: Se empleó esta norma para evaluar la resistencia de los materiales a la colonización por hongos, mediante la exposición a condiciones ambientales favorables para el crecimiento fúngico y la posterior cuantificación del crecimiento.

Estos métodos combinados permitieron una evaluación comprensiva de la eficacia antimicótica del compuesto de PU con AgNPs, proporcionando una comparación detallada de la capacidad inhibitoria mediante diferentes enfoques normativos.

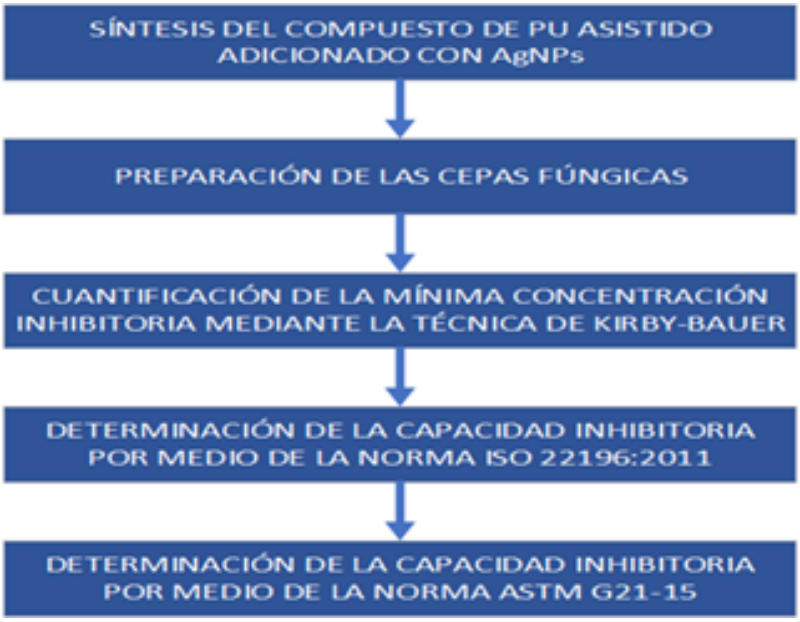


Figura 1. Metodología Propuesta

La preparación del sistema poliol- isocianato, elementos que conforman en PU para las pruebas se realizó con el pesado inicial de los componentes y la aplicación de tratamiento ultrasónico para mejorar la dispersión de las AgNPs, como se muestra en la Figura 2.

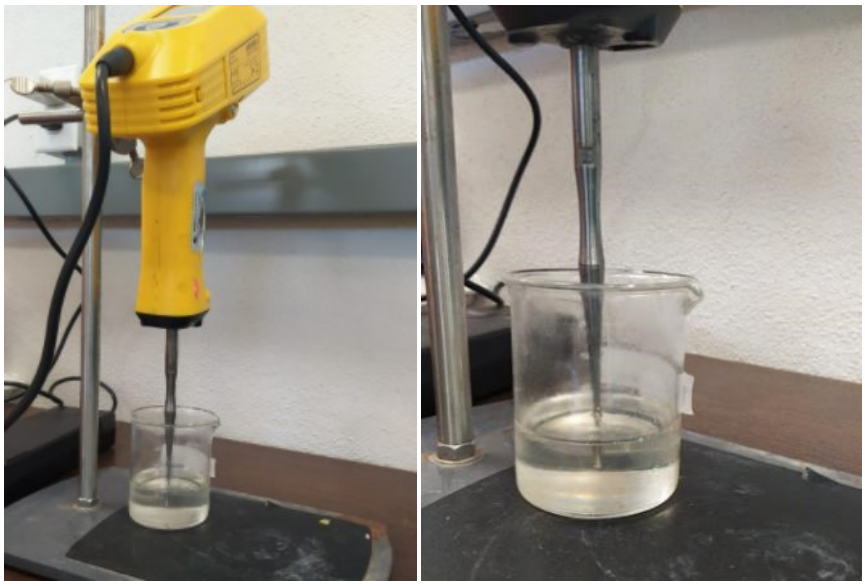


Figura 2. Agitación y tratamiento ultrasónico

RESULTADOS

Para evaluar la capacidad inhibitoria del crecimiento de *T. rubrum* y *A. brasiliensis* en compuestos de PU adicionados AgNPs, se implementaron varias etapas experimentales. Estos pasos incluyen la síntesis del compuesto de PU con AgNPs, la preparación de las cepas fúngicas, y la cuantificación de la mínima concentración inhibitoria. Además, se utilizando la norma establecida para la evaluación de la capacidad inhibitoria: ASTM G21-15. Como se muestra en la Figura 3.

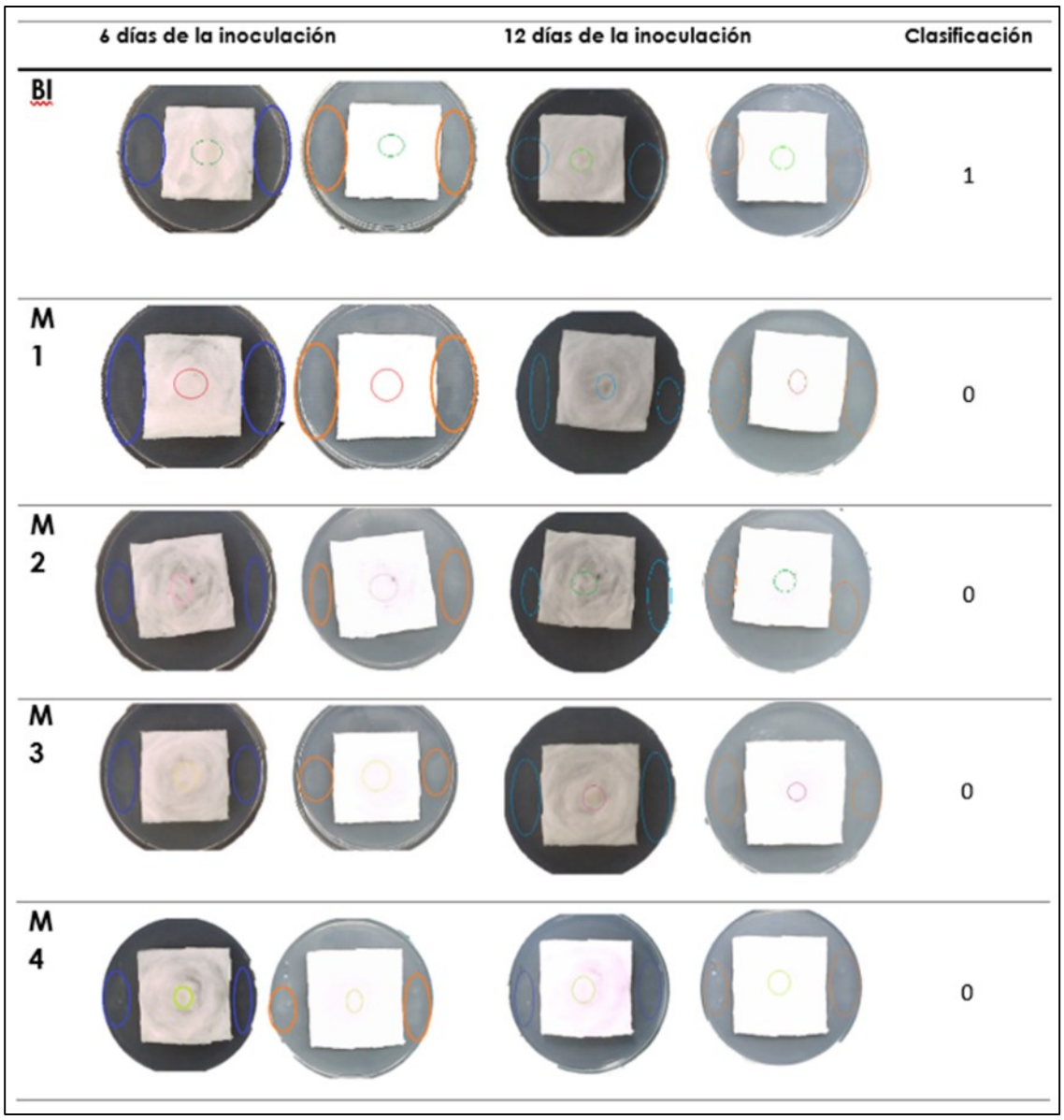


Figura 3. Determinación del crecimiento del *T.rubrum* de acuerdo a la norma ASTM G21-15.

Por el método de difusión en disco (Kirby-Bauer) mostrado en la Figura 4, las AgNPs no mostraron inhibición contra el hongo *T. rubrum* a diferencia del control positivo de ketoconazol, aparentemente las nanopartículas no tienen efecto inhibitorio por si solas, en medio líquido (Figura 4).

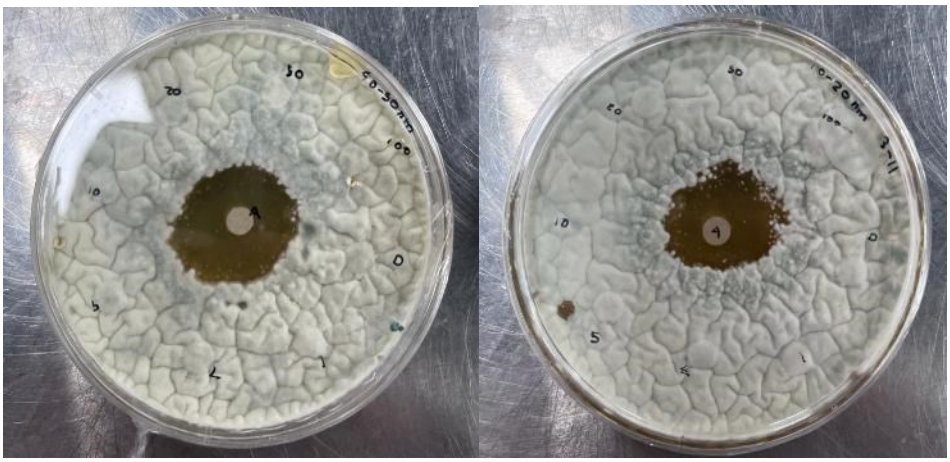


Figura 4. Método de difusión por disco de las AgNPs en tamaños a) 45 nm y b) 15 nm

La Figura 5 muestra las imágenes de las respectivas cajas Petri de *T. rubrum*, después de 48 h de acuerdo con la norma ISO 22196: 2011 como se describió en la metodología, se realizó un conteo de UFC formadas de una dilución de 10^{-3}.

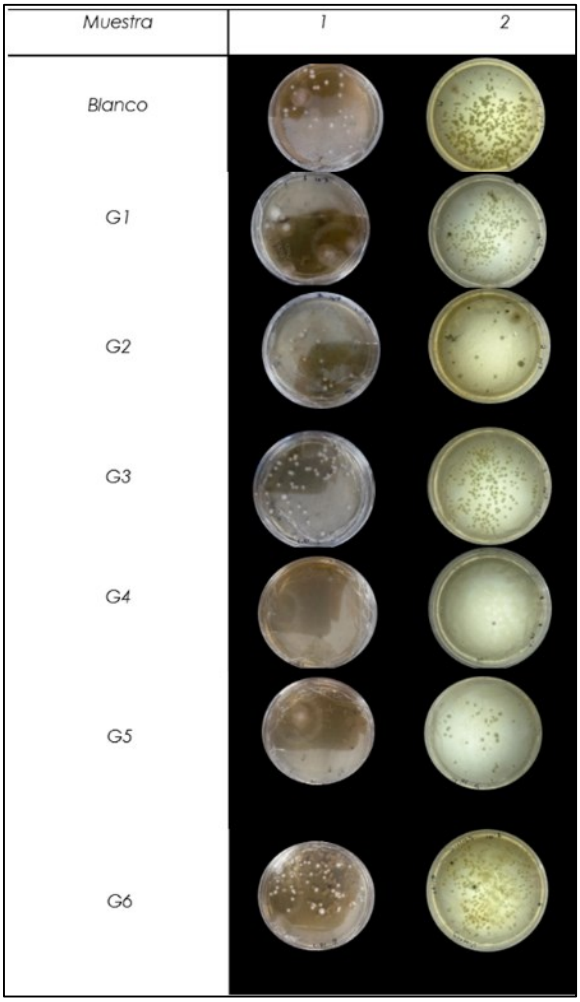


Figura 5. Imágenes de cajas Petri de las muestras de PU-AgNPs y blanco de la actividad fúngica de acuerdo con la ISO 22196.

Se encontró que en todas las muestras a excepción de la muestra G6 presentaron una menor cantidad de UFC's formadas con respecto al blanco, lo que indica que presentan un efecto antimicótico contra el hongo *T rubrum*. En la Figura 6 se muestra el porcentaje de inhibición de cada muestra.

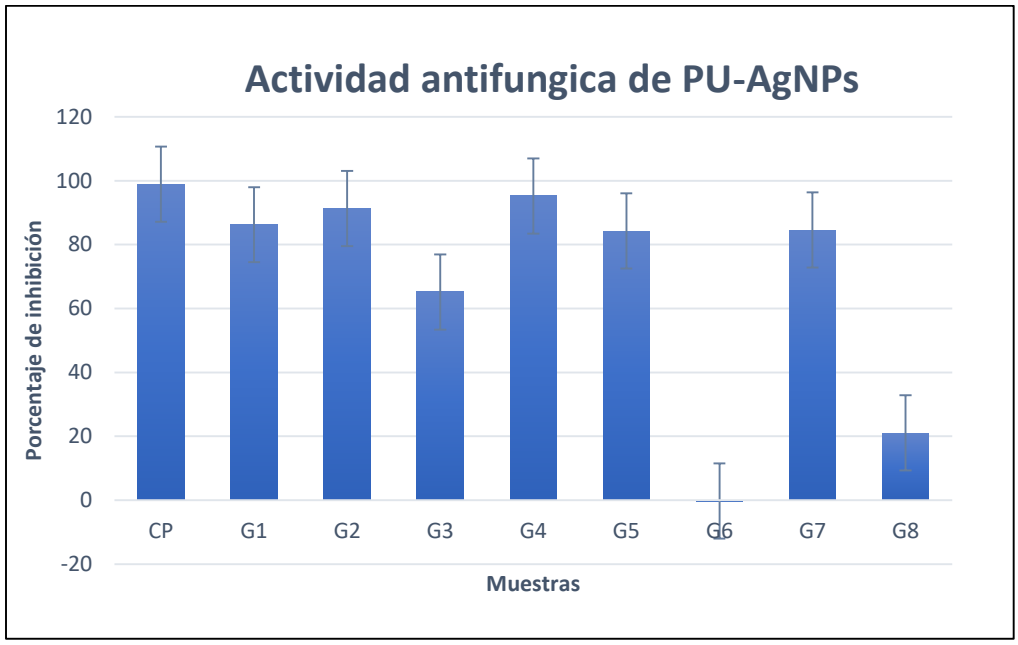


Figura 6. Porcentaje de inhibición del compuesto PU-AgNPs, CP es el control positivo del ketoconazol de 50 mg/ ml.

CONCLUSIONES

La norma ASTM G21-15, que se basa en la observación visual del crecimiento de hongos, presenta limitaciones para la cuantificación precisa del crecimiento o inhibición del hongo. En nuestro estudio, se utilizó esta norma para clasificar visualmente el crecimiento de *T. rubrum* y *A. brasiliensis* en presencia del compuesto PU-AgNPs, siguiendo la tabla de calificación ordinal especificada en la norma.

Por otro lado, el método de difusión en disco (Kirby-Bauer) no mostró inhibición del hongo *T. rubrum* por las AgNPs, a diferencia del control positivo con ketoconazol. Esto sugiere que las nanopartículas de plata no tienen un efecto inhibitorio significativo por sí solas en medio líquido.

Siguiendo la norma ISO 22196:2011, se realizó un conteo de UFCs tras 48 horas, utilizando una dilución de 10^-3. Todas las muestras, excepto la muestra G6, mostraron una menor cantidad de UFC en comparación con el control blanco, lo que indica un efecto antimicótico del compuesto PU-AgNPs contra el hongo *T. rubrum*. Este análisis cuantitativo proporcionó resultados más alentadores, evidenciando una capacidad antimicótica significativa en las muestras tratadas con PU-AgNPs.

Es crucial destacar que la adaptación de la norma ISO 22196, con condiciones más apropiadas para el crecimiento del hongo, permitió asegurar que la toxicidad del compuesto PU-AgNPs fuera la responsable de la inhibición observada.

Aunque los resultados del estudio son prometedores, es fundamental abordar las complejidades asociadas con la liberación de plata y su interacción con los microorganismos mediante enfoques estandarizados y avanzados. La investigación futura debería enfocarse en optimizar estos enfoques

para mejorar la eficacia y la seguridad de los compuestos antimicóticos basados en nanopartículas de plata.

BIBLIOGRAFÍA

1. Savelyev, Y., Gonchar, A., Movchan, B., Gornostay, A., Vozianov, S., Rudenko, A., Rozhnova, R., & Travinskaya, T. (2017). Antibacterial polyurethane materials with silver and copper nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, *4*(1), 87–94. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.01.196
2. Díaz-Puertas, R., Rodríguez-Cañas, E., Bello-Perez, M., Fernández-Oliver, M., Mallavia, R., & Falco, A. (2023). Viricidal Activity of Thermoplastic Polyurethane Materials with Silver Nanoparticles. *Nanomaterials*, *13*(9), 1467. https://doi.org/10.3390/NANO13091467/S1
3. ASTM D ASTM-G21-15-4. Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi. (n.d.). In *obtained from: https://www.astm.org/g0021-15r21e01.html*.
4. *ISO 22196:2011 - Measurement of antibacterial activity on plastics and other non-porous surfaces*. (n.d.). Retrieved June 2, 2024, from https://www.iso.org/standard/54431.html
5. Gregory., P. H. (1935). THE DERMATOPHYTES. *Biological Reviews*, *10*(2), 208–233. https://doi.org/10.1111/J.1469-185X.1935.TB00483.X
6. Wiley, B. J., Im, S. H., Li, Z. Y., McLellan, J., Siekkinen, A., & Xia, Y. (2006). Maneuvering the surface plasmon resonance of silver nanostructures through shape-controlled synthesis. *Journal of Physical Chemistry B*, *110*(32), 15666–15675. https://doi.org/10.1021/JP0608628/ASSET/IMAGES/LARGE/JP0608628F00008.JPEG
7. Gajbhiye, M., Kesharwani, J., Ingle, A., Gade, A., & Rai, M. (2009). Fungus-mediated synthesis of silver nanoparticles and their activity against pathogenic fungi in combination with fluconazole. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, *5*(4), 382–386. https://doi.org/10.1016/J.NANO.2009.06.005
8. Nenoff, P., Krüger, C., Ginter-Hanselmayer, G., & Tietz, H. J. (2014). Mycology - an update. Part 1: Dermatomycoses: causative agents, epidemiology and pathogenesis. *Journal Der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft = Journal of the German Society of Dermatology : JDDG*, *12*(3), 188–210. https://doi.org/10.1111/DDG.12245
9. Wijesiri, N., Yu, Z., Tang, H., & Zhang, P. (2018). Antifungal photodynamic inactivation against dermatophyte Trichophyton rubrum using nanoparticle-based hybrid photosensitizers. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, *23*, 202–208. https://doi.org/10.1016/J.PDPDT.2018.06.019
10. Wijnhoven, S. W. P., Peijnenburg, W. J. G. M., Herberts, C. A., Hagens, W. I., Oomen, A. G., Heugens, E. H. W., Roszek, B., Bisschops, J., Gosens, I., Van De Meent, D., Dekkers, S., De Jong, W. H., Van Zijverden, M., Sips, A. J. A. M., & Geertsma, R. E. (2009). Nano-silver – a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology*, *3*(2), 109–138. https://doi.org/10.1080/17435390902725914
11. Sim, S., & Wong, N. K. (2021). Nanotechnology and its use in imaging and drug delivery (Review). *Biomedical Reports*, *14*(5), 1–9. https://doi.org/10.3892/BR.2021.1418/HTML

ANÁLISIS DE LA SINERGIA ENTRE LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN Y FOTOCATÁLISIS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES PRESENTES EN AGUA UTILIZANDO UN COMPÓSITO DE POLÍMERO-TIO_2

María Elena Gómez Hernández, Eva González Jasso y Mónica Araceli Vidales Hurtado

Instituto Politécnico Nacional, CICATA Unidad Querétaro, Cerro Blanco No. 141, Colinas del Cimatario, CP. 76090 Santiago de Querétaro. México.
gomezh2300@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Los colorantes sintéticos presentes en las descargas industriales, principalmente aquellos desechados por la industria textil, son un severo problema de contaminación ambiental, muchos de ellos tienen alta estabilidad química y elevada toxicidad, presentando un riesgo potencial en los equilibrios biológicos de los sistemas acuáticos y la salud de los humanos, por no ser tratados debidamente antes de su liberación. Estos colorantes no son degradados por procesos biológicos y permanecen en el ambiente, incluso por décadas. En el área de investigación, se ha trabajado en el desarrollo de diversos procesos para su eliminación, entre los que se encuentran la adsorción y la fotocatálisis, utilizando materiales que tienen buena respuesta para uno u otro proceso, rara vez para ambos. En el presente trabajo se muestran los resultados del comportamiento de un material compuesto polímero-TiO_2 al implementarlo como material adsorbente y fotocatalítico, utilizando como moléculas de prueba los colorantes, azul de metileno y naranja ácido 7. Para las pruebas de adsorción se utilizaron tres concentraciones de los colorantes y tres cantidades del compósito con diferente tamaño de partícula, con el propósito de evaluar el efecto del área superficial, manteniendo la solución con agitación magnética constante. La prueba fotocatalítica inició una vez que el proceso de adsorción llegó al equilibrio. Adicionalmente, se realizó una mezcla de ambos colorantes a la misma concentración para determinar la afinidad hacia uno de ellos. Se encontró que el material tiene la capacidad de adsorber ambos colorantes, incluso en la mezcla; además, la reducción del tamaño de partícula acelera el proceso de adsorción, pasando de 180 h a menos de 80 min para alcanzar el 100% de remoción de los contaminantes, y que para altas concentraciones, donde la adsorción no alcanza a remover todo el colorante, la combinación con fotocatálisis permite que se llegue al 100%, demostrando que la combinación de ambos procesos permite obtener resultados más eficientes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existen diversas industrias como la alimentaria, la cosmética, la agrícola y la textil, que generan y liberan al ambiente efluentes con una gran cantidad de contaminantes. Se ha determinado que las aguas residuales que generan contienen una amplia gama de productos químicos entre los que se encuentran los colorantes y metales pesados como: mercurio, cromo, cadmio, plomo y arsénico. Del total de los colorantes que se producen anualmente (cerca de 10^9 kg), el 70% son colorantes azoicos [1] que son ampliamente utilizados en el teñido de textiles, por su estabilidad química. Durante este proceso, cerca del 50% del colorante empleado no se une a las fibras y tejidos y es desechado en los efluentes, por lo que estas sustancias son uno de los principales contaminantes del agua [2].

Entre los métodos convencionales para la limpieza de aguas residuales se encuentran los tratamientos biológicos, la irradiación, la coagulación y precipitación y la adsorción, entre las propuestas emergentes se encuentran los procesos de oxidación avanzada, que incluye la fotocatálisis; cada uno de ellos con sus respectivas ventajas y desventajas.

La eliminación de colorantes por adsorción empleando carbón activado es un método eficaz, sin embargo, una de sus limitantes es su costo. Por otro lado, el empleo de semiconductores, como el TiO_2 son una alternativa prometedora ya que estos materiales pueden ser activados con radiación solar, promoviendo la degradación de las moléculas contaminantes.

Una tendencia actual está enfocada en la búsqueda de materiales que tengan la capacidad de combinar más de un proceso para la eliminación efectiva de los contaminantes presentes en agua, por lo que se busca sintetizar materiales que puedan retener moléculas en su superficie por un proceso de adsorción para, posteriormente, activarlos con luz, y desencadenar la formación de especies reactivas del oxígeno que oxiden y degraden compuestos tóxicos, como las moléculas de colorante [2]. La sinergia de ambos procesos se presenta como una alternativa eficiente para lograr un impacto en la descontaminación de agua.

TEORÍA

Clasificación de los colorantes

Los colorantes sintéticos, en su mayoría, son compuestos que en su estructura contienen anillos aromáticos, además de diferentes grupos funcionales. El color, se atribuye a la estructura del grupo cromógeno-cromóforo y la capacidad de coloreado al grupo auxocromo. El cromógeno está constituido de una estructura aromática basada en anillos de benceno, naftalina o antraceno, que está unida al cromóforo cuya estructura contiene dobles enlaces conjugados [3]. Este grupo es una base para la clasificación de los colorantes, entre los más importantes se encuentran el enlace carbonilo (-C=O), metilo (-CH=), nitro (-NO_2) y azo (-N=N) [1].
La mayoría de los colorantes textiles están incluidos en las clases azo o antraquinona [3]; los azoicos se utilizan principalmente para los colores amarillo, naranja y rojo, presentan gran resistencia a la luz, por lo que es muy común emplearlos en cortinas, alfombras y otros tejidos. El grupo azo, en estos compuestos, une al menos, dos anillos aromáticos. Todos los compuestos azoicos son coloridos, pero no todos son útiles como colorantes [4].

Los colorantes también pueden ser clasificados de acuerdo con su estructura en aniónicos y catiónicos y no iónicos. Los dos primeros exhiben grupos funcionales específicos que, posterior a su disociación en una solución acuosa, generan iones con carga negativa y positiva [5]. En la Figura 1 se muestra la estructura química del colorante azul de metileno, que es uno de los colorantes más usados por la industria para colorear fibras de algodón, la seda, algunas pieles, etc. Su molécula está basada en tres anillos en la que dos anillos de benceno están unidos a un anillo central formado por un átomo de nitrógeno y otro de azufre. Este colorante al ser disuelto en solución acuosa obtiene una carga positiva (catiónico) [3].

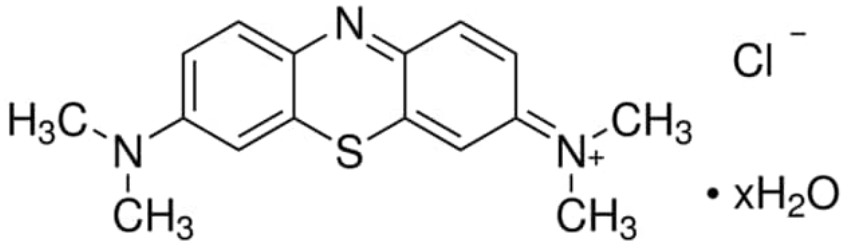


Figura 1. Estructura molecular del colorante azul de metileno. Tomado de Merck [6].

En la Figura 2 se observa la estructura química del colorante naranja ácido 7, de origen sintético, al disociarse en agua mantienen una carga negativa (aniónico). Su permanencia en los cuerpos de agua se debe a la estabilidad molecular del enlace azoico presente en su estructura [7].

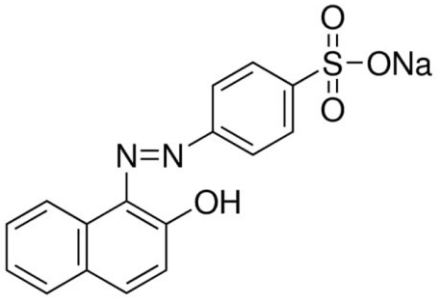


Figura 2. Estructura molecular del colorante naranja ácido 7. Tomado de Merck [8].

Adsorción

Es un proceso fisicoquímico por el cual una sustancia, conocida como adsorbato, que se encuentra presente en una fase móvil se adhiere a la superficie de un material llamado adsorbente, por fuerzas interfaciales débiles. El adsorbente posee centros activos que retienen moléculas de adsorbato compatibles a su superficie [9]. Aprovechando esta propiedad es posible eliminar totalmente algunas sustancias que se solubilizan en agua El adsorbente más utilizado es el carbón activado por la gran cantidad de contaminantes que retiene, además de olores y sabores.

Fotocatálisis heterogénea

Es un proceso avanzado de oxidación (PAO) que se aplica para la degradación y mineralización de una sustancia, basado en el uso de un catalizador semiconductor que acelera la reacción de descomposición de un contaminante por medio de la acción de la luz, ya sea natural o artificial. En este proceso, el semiconductor fotoactivado, es capaz de generar pares electrón-hueco, formando especies reactivas (como los radicales hidroxilo y superóxido) que interactúan con la molécula contaminante, llegando incluso hasta su mineralización total, como se muestra en el siguiente esquema de reacciones [4, 10]:

$$\textbf{Fotocatalizador} + \textbf{hv} \rightarrow h_{BV}^{+} + e_{BC}^{-}$$
$$\mathbf{H_2O} + h_{BV}^{+} \rightarrow \mathbf{OH^*}(\textbf{radical hidroxilo}) + \mathbf{H^+}$$
$$\mathbf{O_2} + e_{BC}^{-} \rightarrow \mathbf{O_{2^*-}}\ (\textbf{radical superóxido})$$
$$\mathbf{OH^*} + \textbf{contaminante} \rightarrow \textbf{Productos intermedios} \rightarrow \mathbf{H_2O} + \mathbf{CO_2}$$
$$\mathbf{O_{2^*-}} + \textbf{contaminante} \rightarrow \textbf{Productos intermedios} \rightarrow \mathbf{H_2O} + \mathbf{CO_2}$$

Esquema 1. Reacciones del proceso fotocatalítico [10].

El óxido de titanio (IV) o Titania (TiO_2), es un material semiconductor utilizado ampliamente para la eliminación de contaminantes por fotocatálisis, utilizando luz ultravioleta (UV) para su activación. El TiO_2, es un sólido blanco insoluble en agua, presenta tres formas polimórficas: anatasa, rutilo y brookita es usado en pinturas, protectores solares y como un colorante de alimentos. Es un material de bajo costo, con una gran disponibilidad y una alta estabilidad química y fotoquímica.

El uso de materiales a escala nanométrica posee diversas ventajas, sin embargo, una de sus más grandes limitantes es la recuperación de las nanopartículas después de ser empleadas, por su tamaño. Por ello, para la aplicación en descontaminación de agua, se propone el uso de una matriz polimérica para dispersar las partículas y, así, obtener un compósito con una alta capacidad de adsorción con propiedades fotocatalíticas, para que una vez empleado sea fácil retirarlo de los cuerpos de agua.

PARTE EXPERIMENTAL

El material utilizado como adsorbente fue un compósito polímero-TiO_2 particulado, con tamaño de partícula promedio de 500 µm. Como moléculas modelo se utilizaron los colorantes, azul de metileno

(catiónico) y naranja ácido 7 (aniónico). La experimentación fue dividida en dos etapas: 1) pruebas de adsorción y 2) pruebas fotocatalíticas.

Pruebas de adsorción

El seguimiento en los cambios de concentración por adsorción y fotocatálisis se realizó con mediciones de absorbancia, aplicando la ley de Beer-Lambert ($\boldsymbol{A = \varepsilon bc}$), por lo que fue necesario hacer una curva de calibración, para cada colorante a partir de una solución estándar de 50 ppm, con diluciones a 5, 10, 15 y 20 ppm. Las mediciones de absorbancia se obtuvieron con un espectrofotómetro SP-UV1100.

Para las pruebas de adsorción, se utilizaron tres cantidades de material adsorbente: 40, 70 y 100 mg, que fueron puestos en 4 ml de la solución acuosa a 20 ppm, de ambos colorantes, sin modificar el pH. Las muestras se mantuvieron en agitación magnética hasta concluir el proceso. Las mediciones para el seguimiento en la concentración se tomaron cada 10 minutos.

Mezcla de colorantes

Para determinar la afinidad de adsorción del compósito, se realizó una mezcla de colorantes a igual concentración (20 ppm) y 100 mg de material adsorbente, las mediciones de absorbancia se realizaron con una frecuencia de 20 minutos.

Prueba fotocatalítica

Se utilizó 50 ml de solución a 50 ppm para ambos colorantes y una cantidad de 100 mg del compósito. Una vez que se alcanzó el equilibrio en el proceso de adsorción, se inició con la prueba fotocatalítica, utilizando una lámpara de luz UV sumergible.

RESULTADOS

Adsorción de azul de metileno

La Figura 3 muestra el comportamiento del proceso de adsorción con la solución de azul de metileno a 20 ppm, utilizando 40, 70 y 100 mg del material adsorbente. El efecto en la cantidad del material adsorbente es notable en los primeros 25 minutos, ya que se observa una mayor remoción del colorante a mayor masa de este material, sin embargo, a mayores tiempos la diferencia se vuelve menos notable, de tal manera que, para las tres cantidades en una hora se alcanza a remover el 100% del colorante.

Para evaluar el efecto del tamaño de partícula se utilizó el material sin moler, con un tamaño entre 0.5-0.7 mm, el comportamiento en el proceso de adsorción se observa en el inserto de la Figura 3, donde se puede ver que la remoción total del colorante se alcanzó hasta las 180 horas.

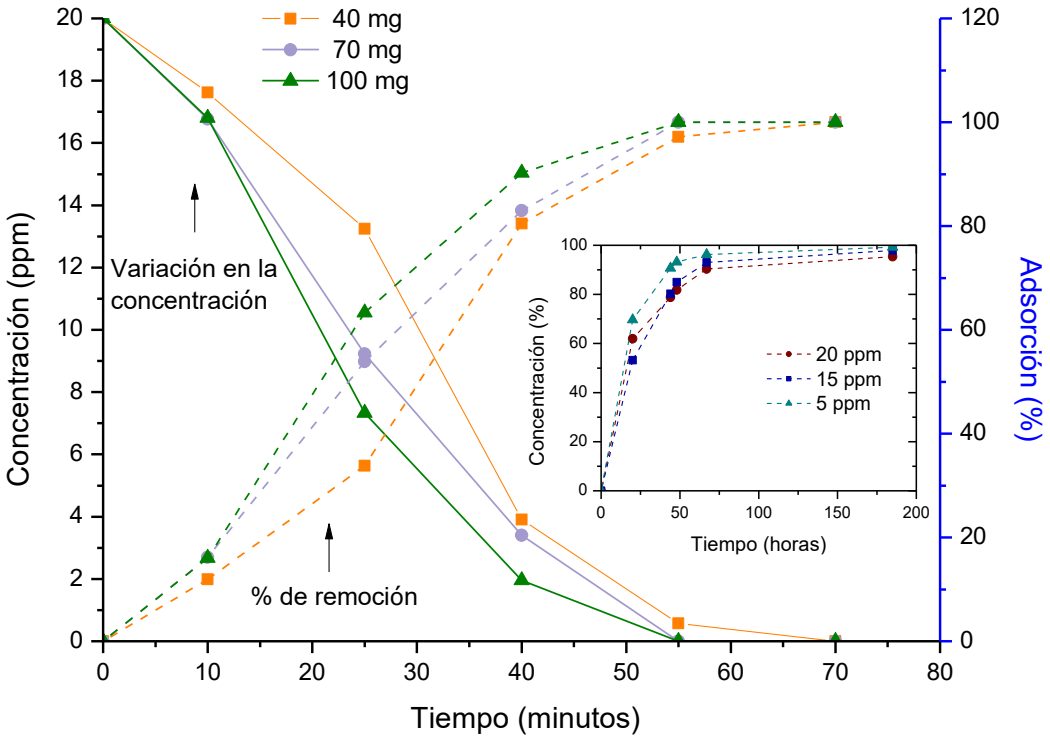


Figura 3. Variación en la concentración (izquierda) y porcentaje de remoción (derecha) de una solución de azul de metileno a 20 ppm, utilizando diferentes cantidades de material adsorbente. En el inserto se muestra el porcentaje de adsorción utilizando un compósito con tamaño de partícula de 0.5-0.7 mm.

La Figura 4 muestra imágenes del resultado final del proceso de adsorción. Se observa como algunas partículas coloreadas caen al fondo del recipiente, mientras que otras se mantienen en la superficie, mientras que el líquido es totalmente transparente, debido a la eliminación total colorante.

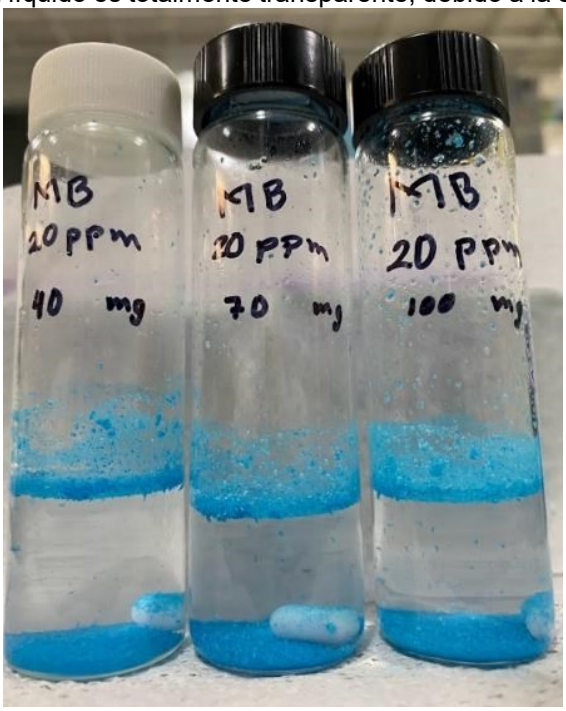


Figura 4. Soluciones del colorante azul de metileno a 20 ppm con variación en la cantidad de masa de material adsorbente, después del proceso de adsorción.

Naranja ácido 7

En la Figura 5 se presenta la gráfica que muestra el comportamiento del proceso de adsorción para el colorante naranja ácido 7 a 20 ppm, para las tres cantidades de masa del material adsorbente (40, 70 y 100 mg). Con este colorante el proceso de adsorción es más rápido que para el colorante azul de metileno, alcanzando una remoción de entre el 60 y 70% en los primeros 10 minutos, para todas las cantidades del compósito. No se observaron cambios importantes al incrementar la masa de este material, alcanzando un máximo de adsorción del 90% en un tiempo de 85 minutos, equivalente a concentración de 2 ppm, sin embargo, las soluciones se muestran incoloras, Figura 6. Esto se atribuye a que las partículas de muy bajo diámetro se filtran en la toma de las alícuotas e interfieren con la medición de absorbancia. A igual que con el colorante azul de metileno, algunas partículas se precipitan al fondo del recipiente y otras quedan en la superficie como se observa en la Figura 7. En el inserto de la Figura 5 se muestra que el tiempo para alcanzar el equilibrio en la adsorción llega hasta 180 horas, con tamaño de partícula de 0.5-0.7 mm, sin alcanzar el 100% de remoción del colorante, para concentraciones de 5, 15 y 20 ppm.

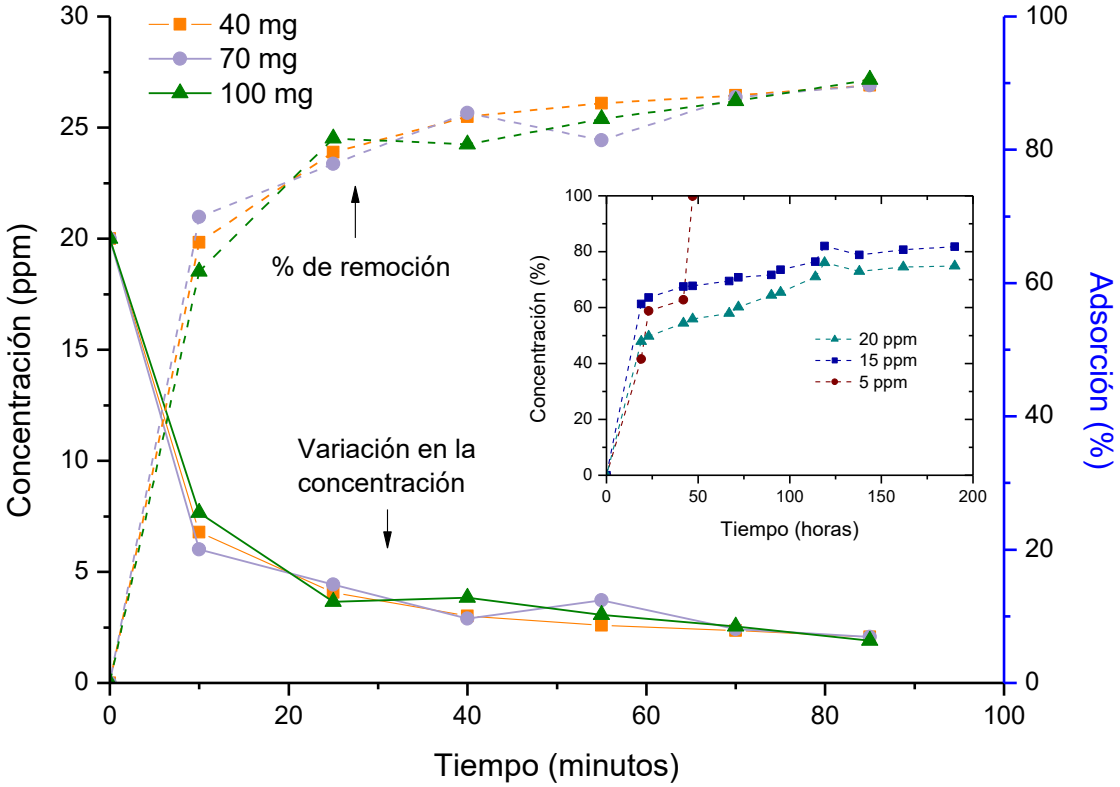


Figura 5. Variación en la concentración (izquierda) y porcentaje de adsorción (derecha) de una solución de naranja ácido 7 a 20 ppm, utilizando diferentes cantidades de material adsorbente. En el inserto se muestra el porcentaje de adsorción utilizando un compósito con tamaño de partícula de 0.5-0.7 mm.

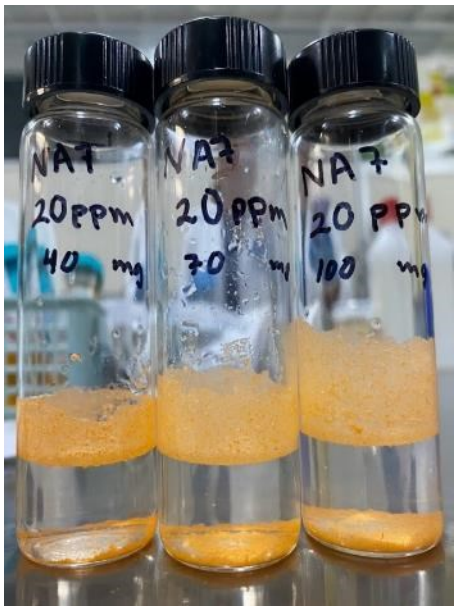


Figura 6. Aspecto de la solución naranja ácido 7 y materiales adsorbentes, después de 90 minutos.

Mezcla de colorantes

La Figura 7 muestra el comportamiento en la adsorción cuando se tiene la mezcla de colorantes a la misma concentración (20 ppm). Dentro de los primeros 20 minutos el color de la solución cambia de verde olivo a salmón, mientras que las partículas se comienzan a colorear de tono azul cielo, Figura 8, además, la concentración para el azul de metileno disminuye más rápido en comparación a la del colorante naranja ácido 7, con lo anterior se afirma que el material presenta una mayor afinidad a la captación de las moléculas del colorante azul de metileno. El tiempo total de esta prueba fue de 200 minutos para remover la cantidad total de las moléculas de ambos colorantes.

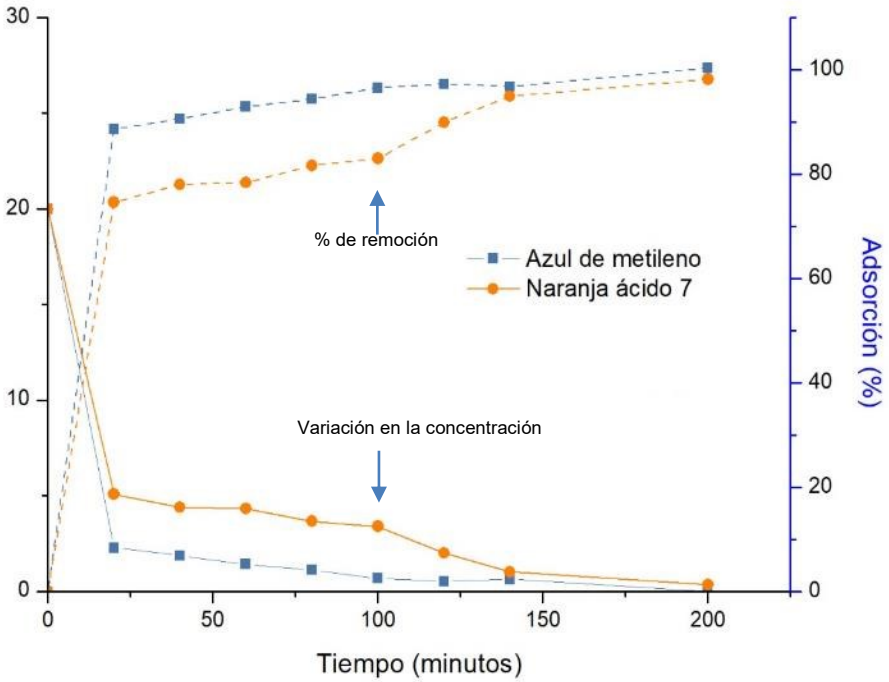


Figura 7. Comportamiento del compósito en el proceso de adsorción en mezcla de colorantes

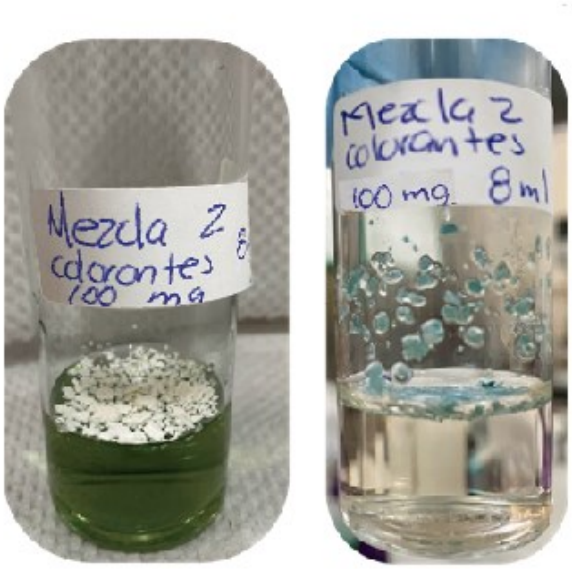


Figura 8. Aspecto de la solución química con una mezcla de colorantes y el compósito, antes y después del proceso de adsorción.

Actividad fotocatalítica

El proceso fotocatalítico se inicia una vez que el proceso de adsorción llega al equilibrio, es decir, una vez que la concentración del colorante se mantuvo constante. Las pruebas fotocatalíticas se realizaron utilizando las soluciones químicas de los colorantes a una concentración de 50 ppm, para cada colorante.

Azul de metileno

En la Figura 9 se muestra el proceso de adsorción (línea color azul) en obscuro (sin radiación), del colorante azul de metileno. En los primeros 20 minutos se alcanza a remover un 66% del colorante por adsorción, equivalente a mantener una solución a 17 ppm. El equilibrio se alcanza aproximadamente a los 160 minutos, con un remanente de 5 ppm de colorante en la solución (88% de adsorción). Al emplear la radicación UV para activar el proceso fotocatalítico (línea color rojo) se logró completar al 100% la remoción del colorante después de 60 minutos, obteniendo una solución totalmente incolora.

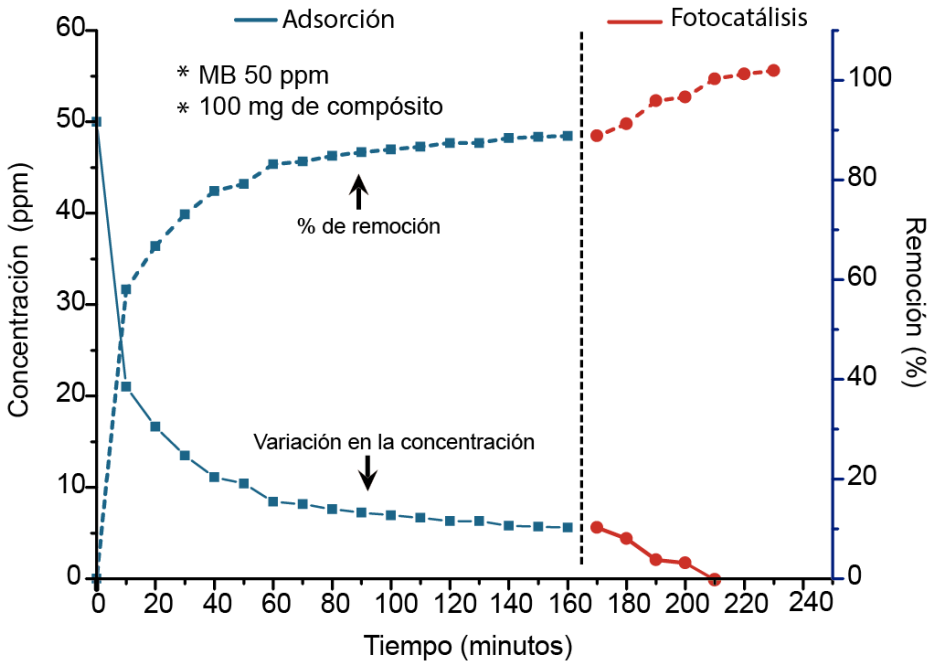


Figura 9. Proceso fotocatalítico del compósito polímero-TiO_2 para el colorante azul de metileno a 50 ppm.

La Figura 10 muestra el color de la solución antes del inicio del proceso fotocatalítico, una vez alcanzado el estado de equilibrio en la adsorción (a). En la imagen (b) se observa que después de 60 minutos de irradiar el material con luz UV la solución es totalmente incolora. Las partículas del material presentan una tonalidad azul marino, algunas de ellas tienen color blanco en la superficie, es muy probable que durante este proceso la luz comenzará a degradar el colorante adherido al compósito.

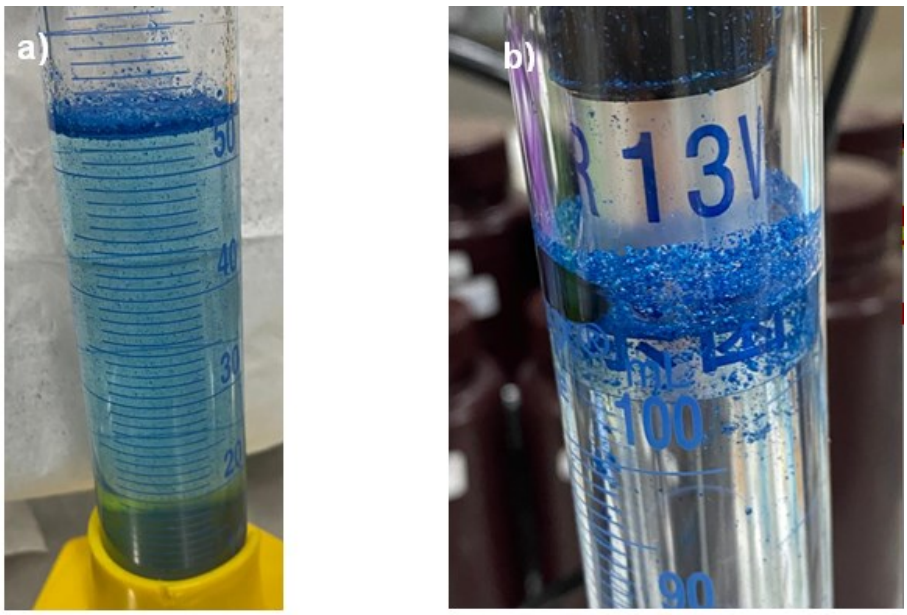


Figura 10. Solución del colorante azul de metileno con partículas antes de iniciar proceso fotocatalítico (a) y al final del proceso fotocatalítico (b) con radiación de luz UV.

Naranja ácido 7

La Figura 11 muestra el proceso de adsorción (línea color azul) y fotocatalítico (línea color rojo) para el colorante naranja ácido 7. Durante los primeros 100 minutos se alcanzó un 23% de remoción durante el proceso de adsorción, logrando el equilibrio en la solución con una concentración remanente de colorante de 38 ppm. El proceso fotocatalítico se llevó a cabo en un tiempo de 80 min, obteniendo una solución totalmente incolora y una remoción del 100% de las moléculas de colorante.

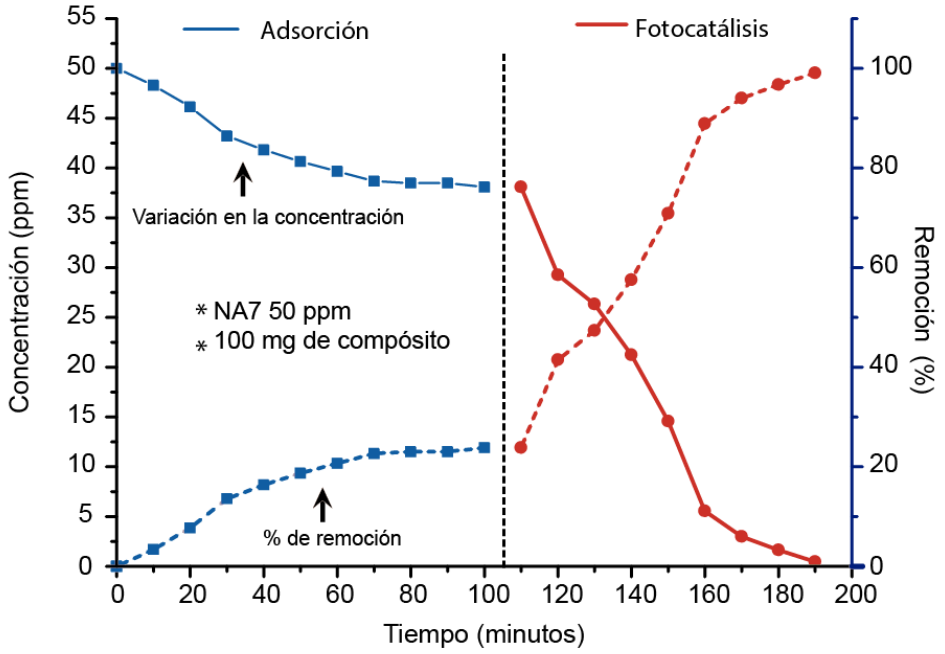


Figura 11. Proceso de adsorción y fotocatálisis del colorante naranja ácido 7 a 50 ppm.

En la Figura 12 (a) se presenta la solución utilizada para iniciar la actividad fotocatalítica del material adsorbente, el color es evidente ya que no fue adsorbido todo el colorante. Se observa la presencia de las partículas del compósito flotando en la solución y en el fondo del recipiente. La Figura (b) muestra el aspecto del compósito al concluir el proceso fotocatalítico, el material presenta color naranja en tonalidad durazno, muy claro, lo que indica que el colorante presente en el material se comienza a degradar por la radiación UV captada por el material.

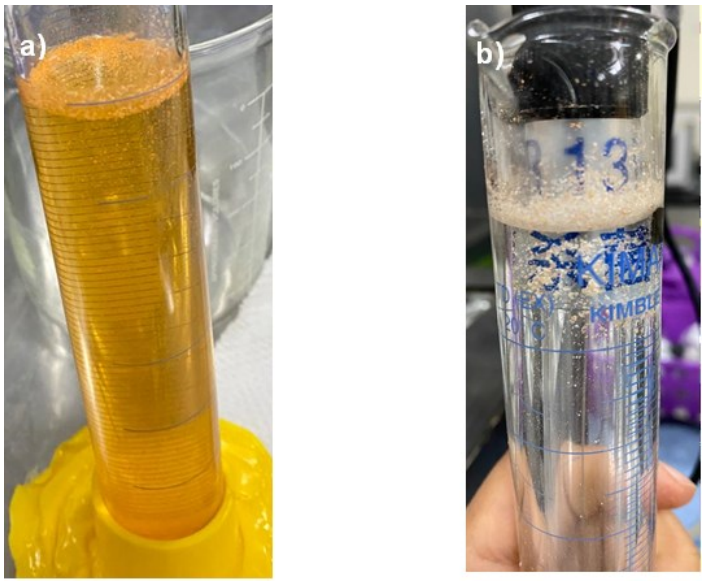


Figura 12. Solución con partículas al alcanzar el equilibrio por adsorción (a) y resultado final al concluir el proceso de activad fotocatalítica (b) empleando luz UV en colorante naranja ácido 7.

CONCLUSIONES

El compósito polímero-TiO_2 mostró una buena capacidad de adsorción para colorantes catiónicos y aniónicos, así como actividad fotocatalítica.

En soluciones químicas con altas concentraciones (50 ppm), se puede llegar a eliminar totalmente el colorante, ya que una vez que se alcanza la saturación por adsorción, el material puede ser activado por radiación, continuando con la remoción hasta la eliminación total del color.

La aplicación de materiales compósitos polímero-TiO_2 son una alternativa prometedora que puede ser aplicada en la descontaminación de agua por el efecto sinérgico que muestran en los procesos de adsorción-fotocatálisis.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Panić, Vesna V.; Šešlija, Sanja I.; Nešić, Aleksandra R.; Veličković, Sava J.;, «Adsorption of azo dyes on polymer materials,» *Hemijska industrija,* 2013.

[2] K. B. Tan, M. Vakili, B. A. Horri, P. E. Poh, A. Z. Abdullah y B. Salamatinia, «Adsorption of dyes by nanomaterials: Recent developments and adsorption mechanisms,» *Separation and Purification Technology,* vol. 150, pp. 229-242, 2015.

[3] Zaharia, Carmen; Suteu, Daniela;, Textile Organic Dyes – Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents – A Critical Overview, 2012.

[4] N. Muhd Julkapli, S. Bagheri y S. B. Abd Hamid, «Recent Advances in Heterogeneous Photocatalytic Decolorization of Synthetic Dyes,» *The Scientific World Journal,* 2014.

[5] Z. H. Jabbar y S. E. Ebrahim, «Recent advances in nano-semiconductors photocatalysis for degrading organic contaminants and microbial disinfection in wastewater: A comprehensive review,» *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management,* vol. 17, 2022.

[6] Merck, [En línea]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/search/methylene-blue?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=Methylene%20blue&type=product. [Último acceso: 2024].

[7] García Martínez, Diana Carolina; Rojas García, Elizabeth; Rubio Marcos, Fernando; López Medina , Ricardo; Maubert Franco, Ana Marisela;, «Degradación fotocatalítica de colorantes usando nanopertículas de titania soportadas en materiales metal-orgánicos basados en hierro,» México, 2018.

[8] Merck, [En línea]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/search/acid-orange-7?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=acid%20orange%207&type=product_name. [Último acceso: 2024].

[9] Pillai, Suraj Babu;, Handbook of water and used water purification, C. Springer, Ed., 2024.

[10] L. V. Bora y R. K. Mewada, «Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: Fundamentals, mechanisms and parametric review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews ,* nº 76, pp. 1393-1421, 2017.

COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE LA MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO Y SU RELACIÓN CON LA COLOCACIÓN DEL MORTERO

Paola Romo Letechipía, Milena Mesa Lavista, José Álvarez Pérez y Jorge Humberto Chávez Gómez

Universidad Autónoma de Nuevo León.
paolaromoletechipia@gmail.com

RESUMEN

La mampostería es un material de construcción compuesto por unidades (Bloques o ladrillos) unidas con mortero. Actualmente, es uno de los materiales más usados en la construcción, y su función es resistir fuerzas tanto verticales como horizontales en edificios de vivienda uni o multifamiliar en México y otros países del mundo. Por lo anterior una correcta unión entre las unidades y el mortero (interfaz) es esencial, así como la determinación de la resistencia debido a las cargas aplicadas. En la práctica constructiva de muros de mampostería en México, existe una divergencia con lo que establecen las normas de diseño en cuanto a la forma de colocación del mortero y la construcción. Esto representa un problema en los esfuerzos generados en la mampostería. El objetivo de la presente investigación es estudiar la influencia que tiene la colocación del mortero en la mampostería de bloques de concreto de dos huecos sometida a esfuerzos cortantes. Se utilizaron bloques con dimensiones nominales de 15 x 20 x 40 cm (espesor x altura x largo) y un mortero con una dosificación 1:6 (cemento: arena), y una resistencia a compresión mayor de 12.5 MPa. Se realizaron ensayos a compresión diagonal de 30 muretes de tres hiladas de 60 x 60 cm de acuerdo con la NMX-C-464-ONNCCE-2010. Se ensayaron 15 muretes construidos con la colocación del mortero en el área neta (*Full Face*) y 15 con la colocación del mortero en las caras laterales (*Face Shell Bedding*). Se obtuvieron los tipos de fallas predominantes para ambos casos, así como la resistencia a compresión diagonal máxima y el módulo cortante. La diferencia entre ambas formas de colocación del mortero estuvo alrededor del 5% en resistencia diagonal máxima y 7% en relación del módulo de corte.

INTRODUCCIÓN

La mampostería es un material compuesto que consta de unidades/piezas unidas con o sin mortero [1, 2]. Una correcta unión entre las unidades y el mortero es esencial para determinar cómo la mampostería transfiere y resiste los esfuerzos debido a las diversas cargas aplicadas [2]. La comprensión del comportamiento estructural es necesaria para lograr estabilidad y resistencia en las estructuras ante la acción de las cargas. Las cargas principales que debe resistir la mampostería son las de compresión debido a las cargas vivas y de peso propio. Sim embargo, también es necesario estudiar el comportamiento a corte, ya que estas estructuras deben resistir los esfuerzos provocados por las cargas horizontales como lo son las solicitaciones por viento y principalmente las sísmicas.

Las investigaciones sobre el comportamiento estructural de la mampostería han estado en constante desarrollo y los avances en la experimentación han tenido un crecimiento notable [3]. Generando un auge en los últimos años en la construcción de edificaciones con muros de mampostería [3]. Es por ello, que estos elementos estructurales siguen siendo los más usados para resistir fuerzas verticales y horizontales en edificios de vivienda uni o multifamiliar [4]. Adicionalmente, las investigaciones en este campo han progresado en relación con la modelación numérica de este comportamiento y contribuyendo a la calibración y validación de los modos de falla ante acciones sísmicas [3].

Una problemática existente en la construcción de las estructuras de mampostería es que la mala ejecución en la mano de obra ha llevado a una variación en la colocación del mortero. Sin embargo, esto no está especificado en las normativas que se usan en la nación y puede conllevar a una variación en el comportamiento del estado esfuerzo-deformacional de la estructura. Debido a esta

situación, es necesario estudiar el comportamiento de la mampostería cuando se varía la forma de colocación del mortero. Específicamente en este trabajo se llevó a cabo la comparativa con dos formas de colocación del mortero en mampostería de bloques huecos de concreto (BHC).

Consecuente de ello, actualmente en el norte de México, no se cuenta con normas técnicas para el diseño y construcción de estructuras de mampostería que respondan a las características propias de los materiales fabricados en la región. No obstante, en los últimos años se han llevado a cabo algunos estudios de la resistencia a compresión de la mampostería con BHC [5, 6] y de la resistencia a tensión de las piezas [7] en el estado de Nuevo León. En ese sentido la hipótesis que se planteó para la siguiente investigación es la siguiente: Con la variación de la colocación del mortero en el área neta y el área lateral del bloque, variará significativamente el comportamiento a cortante en mampostería de BHC.

TEORÍA

La mampostería queda definida como un sistema tradicional de construcción [8], constituidos por dos elementos principales, unidos entre sí, el mortero y la pieza, dispuestas en un patrón regular [9]. Existe una variedad de tipos de mampostería desde aquellas que llevan confinamiento/ refuerzo hasta aquellas que están hechas de piedras naturales. El tipo que fue estudiado en la presente investigación es la mampostería simple con BHC, en la cual no se considera refuerzo alguno, misma que exhibe un comportamiento frágil ante las acciones laterales principalmente.

La investigación de Madhavi [10] corrobora que el estado del conocimiento con relación a las características en resistencia y deformación de la mampostería sometida a cargas laterales en el plano tienen poco desarrollo en comparación con la compresión. Por lo que la consideración de parámetros en muros de mampostería como la fuerza de corte y la rigidez, deben ser considerados significativamente en el diseño de estructuras contra cargas laterales. Debido a la complejidad del comportamiento que la mampostería presenta ante esfuerzos cortantes y la existencia de los diferentes modos de falla que se presentan en esta, las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes se relacionan directamente.

Las piezas que se utilizan para la mampostería tienen una diversidad de características que describen a este elemento, dependiendo del tipo de material y geometría que lo compone. De esta manera las piezas son la resultante del material principal en la mampostería ya que la característica básica tiene primacía en su alta resistencia a compresión axial. Este elemento tiene diferentes parámetros tanto geométricos como mecánicos por los que debe ser aprobado ante las normativas mexicanas (dimensionamientos, peso volumétrico, absorción y resistencia a compresión) [11-16]. En el caso del mortero, es un material de construcción que se compone únicamente por tres materiales, el cemento hidráulico o de albañilería, el agregado fino (arena) y el agua. Con base a las dosificaciones que se establecen, el mortero queda definido como mortero tipo I o II, según las normativas mexicanas [17, 18].

Finalmente, cabe mencionar que la consideración de juntas de mortero en investigaciones actuales o de hace pocos años, han creado un interés especial en el análisis de estructuras de mampostería. Así, la literatura [19] define que no solo la variación de tipos de piezas influye en el comportamiento a compresión de la mampostería, sino que también los tipos de mortero, así como los métodos de colocación de este (área completa o área lateral) y la resistencia afectan significativamente las respuestas generales. De esta manera, enfatizar en la importancia que tiene la fuerza de esta unión (interfaz) es fundamental, ya que ésta es una propiedad esencial de la mampostería, y, por ende, puede ser utilizada para teorías de múltiples fallas dadas [20].

Otra de las razones por las que se menciona la colocación del mortero, es debido a que la inconsistencia que existe en el enfoque de diseño y práctica constructiva de la mampostería no se contempla en el código nacional y en algunos de los diferentes códigos internacionales. A continuación, se muestra en la Figura 1 los diferentes tipos de colocación de mortero que se

aplica a un bloque hueco.

a) b)

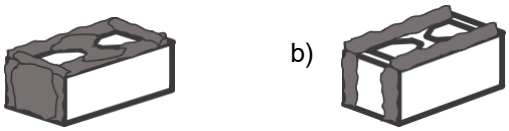


Figura 1. Tipos de colocación del mortero a) Área neta y b) Área lateral.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo de la experimentación que se llevó a cabo está basado en el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE) S. C. [11-16, 18, 21, 22], así como también en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC) [17]. La metodología del diseño de experimentos está dividida en tres diferentes fases, la primera de ellas es la caracterización de los materiales que componen la mampostería, la segunda son los ensayos de resistencia a compresión diagonal de muretes y la tercera es el análisis estadístico que se aplicó a la segunda fase.

Caracterización de materiales

La caracterización de materiales está descrita por dos diferentes partes, una de ellas es la metodología aplicada al mortero y la otra, por su parte, es la caracterización de los bloques. De los diferentes ensayos en bloques y mortero, se analizó el cumplimiento de los valores mínimos y máximos que exigen las normas [11-16].

La caracterización del mortero se realizó con los siguientes materiales: Cemento Portland Compuesto CPC 30R, agua y arena de río No. 5, dosificación de 1:1:6 respectivamente. La experimentación se dividió en los ensayos de resistencia a compresión y resistencia a tensión. Todas las probetas se ensayaron en la máquina INSTRON 600DX.

Para la resistencia a compresión se ensayaron veintisiete cubos de 5 cm x 5 cm con base en las especificaciones de la NMX – C – 061 [14]**.** De la misma manera también se ensayaron siete cilindros con base en la NMX-C-083-ONNCCE-2014 [22] y ASTM C39 [23] con moldes dimensiones de 15 cm de altura por 7.5 cm de diámetro y un cabeceo de azufre – ceniza volante relación 2:1. Para el caso de los cilindros, se utilizaron strain gauges (EA-06-20CBW-120 y EA-06-500BH-120) y transductores de diferencial lineal variable (LVDT).

Respecto a los ensayos de resistencia a tensión, se ensayaron veintisiete briquetas con base en la ASTM C307 [24]. Como se muestra en la siguiente *Figura* 2.

a) b) c)

Figura 2. Ensayes realizados al mortero en a) compresión en cubos, b) compresión en cilindros, c) tensión en briquetas.

Como segunda parte de esta fase, se realizaron diferentes ensayos para la caracterización de los bloques. Se usaron bloques huecos de concreto manufacturados en el estado de Nuevo León. La muestra fue de 150 piezas, tomados de una misma fábrica de diferentes lotes. El tamaño de los

bloques es de 15 x 20 x 40 cm (espesor x altura x largo).

Las características de los bloques se dividen en las geométricas, donde intervienen los ensayos de determinación de las dimensiones [13] usando Vernier y cinta métrica; especificaciones y método de ensayo [11, 15] y el peso volumétrico neto mínimo [17] que requiere de una báscula.

Por otra parte, las características mecánicas, como la determinación de la absorción [12] usando una tina de curado, un horno con ventilación y control de temperatura (105 ºC ± 5°C) además de una báscula. Dentro de las características mecánicas también se encuentra la resistencia de compresión (Ver Figura 3) [11], donde se emplea un cabeceo de azufre – ceniza volante relación 1:2, aceite y moldes. Para llevar a cabo el ensayo a compresión se empleó la máquina Instron 600DX (Ver Figura *3*) y la máquina universal Tinius Olsen (Capacidad 200 ton).

Figura 3. Ensayo de resistencia a compresión de bloques.

Ensayos de resistencia a compresión diagonal

Los ensayos de resistencia a compresión diagonal ayudan a obtener los parámetros mecánicos que definen el comportamiento a corte de la mampostería. Para el desarrollo de este trabajo se ensayaron treinta muretes. La preparación de la muestra se realiza inclinando el murete a 45, sujeto por dos cabezales metálicos de distribución de carga (superior e inferior) unidos con una junta de yeso, y finalmente, se añaden los marcos metálicos para sujetar los LVDT [18] usando dos niveles pequeños. Se toman medidas con cinta métrica, así como de los soportes metálicos que sostienen los transductores.

Para la preparación del ensayo es necesario un marco de carga adecuado a las dimensiones del murete, para la obtención de valores es necesario un adquisidor de datos (Wheatstone bridge), así como una celda de carga y gato hidráulico (100 ton) (Ver Figura 4).

Figura 4. Ensayo de resistencia a compresión en murete.

Quince de los muretes se designaron al tipo de colocación del mortero en área neta y los quince restantes en el tipo de colocación en áreas laterales.

Análisis estadístico

Con base a los resultados de la fase anterior se realizó un análisis estadístico mediante diferentes pruebas, una de ellas es la de distribución normal de Kolmogórov-Smirnov. La segunda la prueba de homocedasticidad utilizando el test de Levene y como última prueba, la comparación de medias, en

específico se realizó la prueba de T – Student.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se dividen en tres fases, la primera consta en la caracterización de los materiales, la segunda en los valores obtenidos de los ensayos de compresión diagonal de los muretes (Parámetros mecánicos), y como última fase los resultados de las diferentes pruebas que conlleva el análisis estadístico.

Primera fase: Caracterización de los materiales

El mortero quedó definido con una resistencia a compresión media de 19.9 MPa con un coeficiente de variación de 17.43% y por ende una resistencia de diseño a compresión de 13.86 MPa, siendo un 10.91% mayor que el valor mínimo que establece la norma [18] para entrar en clasificación tipo I. El módulo de elasticidad obtenido fue de E = 12,258.96 MPa.

Por otra parte, el bloque cumple con los parámetros geométricos mínimo que establece la normativa [17]. También cumplió con el peso volumétrico neto en estado seco siendo 21.06% mayor al que establece la normativa [17]. Dentro de los parámetros mecánicos, se cumplió con la absorción máxima que marca la normativa siendo un 54% menor al valor máximo que el establecido [12, 15]. La resistencia a compresión media respecto a su área neta fue de 8.55 MPa con un coeficiente de variación del 9.16% y una resistencia de diseño de 6.957 MPa (en área neta) cumpliendo con el valor mínimo permitido de diseño según la NTC [17]. El módulo elástico resultó ser de E = 4,154.8 MPa.

Segunda fase: Ensayos de resistencia a compresión diagonal de muretes

Analizando los dos tipos de colocación del mortero empleados, en área neta y área lateral se obtuvieron los resultados que se plantean a continuación. La mampostería con colocación en área neta tuvo como valor de resistencia media a compresión diagonal (V_m) 0.566 MPa con un coeficiente de variación de 19.95%. La resistencia de diseño fue de 0.378 MPa. El módulo de corte (G) fue de 1,830.56 MPa con un coeficiente de variación de 27.68%. La curva de esfuerzo cortante (τ) – Deformación angular (γ) se muestra en la Figura *5*.

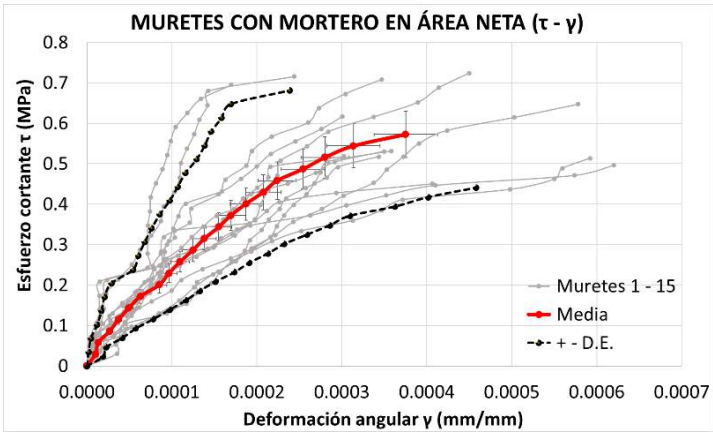


Figura 5. Curva τ – γ de los muretes con la colocación del mortero en área neta.

Así mismo, las diferentes modalidades que se presentaron en las fallas de los especímenes se presentan la Figura 6.

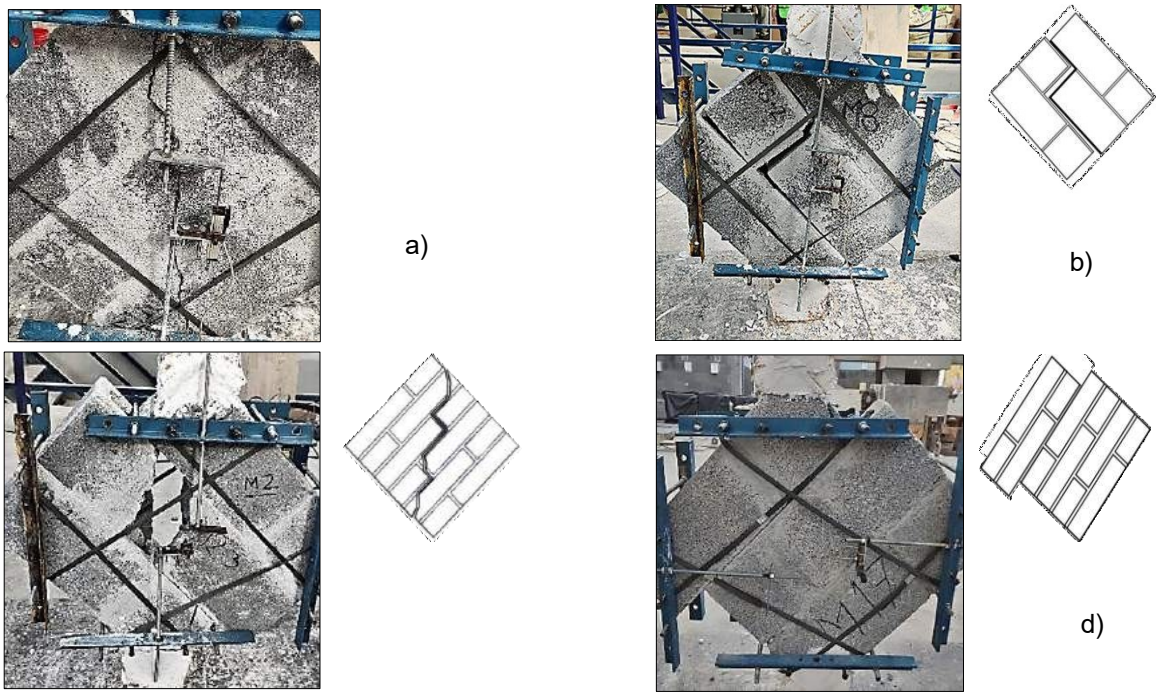


Figura 6. Tipos de falla en mampostería de colocación en área neta a) Tensión diagonal b) Adherencia c) Combinada y d) Deslizamiento

Cada una de las fallas se define por las siguientes características: a) Tensión diagonal: Atraviesa piezas y junta, b) Adherencia de las juntas: Puede existir fractura en la pieza debido a la tensión, c) Combinada: Tensión diagonal + cortante y d) Deslizamiento: Desplazamiento de la hilada horizontal debido a separación de la unión mortero – piezas.

De los 15 muretes ensayados con la colocación del mortero en área neta se obtuvieron los siguientes porcentajes:

a) Falla por tensión diagonal: 5.88%, b) Falla por adherencia: 29.41%, c) Falla combinada: 58.82% y d) Falla por deslizamiento: 5.88%.

El tipo de falla predominante como se observa en los porcentajes fue la falla combinada y una de las posibles causas es debido al contacto de junta aplicada en un área pequeña, o sea, bloques con grandes huecos.

Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos de los muretes con colocación en área lateral. Estos presentaron un valor de resistencia media a compresión diagonal (V_m) igual a 0.594 MPa con un coeficiente de variación del 20.68%. La resistencia de diseño fue de 0.392 MPa. El módulo de corte (G) resultó ser de 1,965.58 MPa con un coeficiente de variación de 25.16%. La curva de esfuerzo cortante (τ) – Deformación angular (γ) se muestra en la Figura 7Figura *5***.**

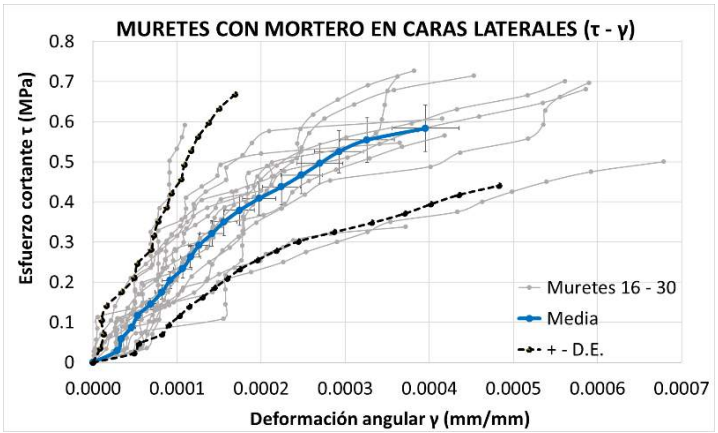


Figura 7. Curva τ – γ de los muretes con la colocación del mortero en área de caras laterales.

Los resultados de estos especímenes respecto a las fallas fueron dados en los siguientes porcentajes: a) Adherencia: 47.06%; b) Combinada: 29.41% y c) Deslizamiento: 17.65%. Siendo la falla de adherencia la predominante para este tipo de colocación de mortero. Una de las causas que explican esta tendencia es debido a la relación de área mortero con respecto a área de los bloques (Área neta = área pequeña).

Comparando las fallas obtenidas en ambos tipos de colocación del mortero, se obtuvo que la falla predominante cuando el mortero se coloca en área neta es la combinada, y cuando se coloca en caras laterales es la falla por adherencia. Cada una de las fallas analizadas se caracteriza por los diferentes esfuerzos distribuidos que provoca el tipo de falla. La falla combinada se caracteriza por la contribución simultánea del bloque y el mortero a la oposición de falla cortante. La falla por adherencia se caracteriza únicamente por los esfuerzos tomados por el mortero. Debido a lo anterior, para fines de diseño en mampostería de bloques huecos de concreto se desea que la colocación del mortero sea sobre el área neta, frente a cargas laterales.

Tercera fase: Análisis estadístico

La fase tres consta del análisis estadístico. Este se ejecutó en el software de IBM SPSS Statistics 27 con el objetivo de llevar a cabo una comparación entre los resultados experimentales de los muretes con los dos tipos de colocación del mortero. La confiabilidad se consideró con un porcentaje mínimo del 95%.

El análisis de distribución normal de Kolmogórov-Smirnov se aplicó a los resultados de resistencia a compresión diagonal y módulo cortante tanto en la colocación de área neta como áreas laterales. Ambos tipos de colocación del mortero cumplen con la hipótesis nula (Ho), la cual es que estos valores se ajustan a una distribución normal.

Otra de las pruebas que se realizaron, fue la prueba de homocedasticidad de varianzas, (test de Levene), esta consiste en evaluar la igualdad de las varianzas entre dos o más grupos, de esta manera se determina si la varianza se mantiene constante en cada uno de los factores. Como resultados se obtuvo que en ambos parámetros mecánicos analizados las varianzas no tienen diferencias significativas entre ambas formas de colocación del mortero. La última prueba estadística realizada fue una comparación de medias, en específico se empleó la prueba de T – Student. Como resultado ambos no presentaron diferencias significativas entre sus medias.

En términos generales los resultados experimentales sobre la obtención del comportamiento a corte en la mampostería indican que no existen diferencias significativas respecto a las dos metodologías de colocación del mortero empleadas. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico de los ensayos

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES				
Tipo de prueba	Parámetro			
	Resistencia a compresión diagonal (τ)		**Módulo a cortante (G)**	
	Área neta	Área lateral	Área neta	Área lateral
Distribución normal	0.056 > 0.05 (se ajusta)	0.125 > 0.05 (se ajusta)	0.2 > 0.05 (se ajusta)	0.093 > 0.05 (se ajusta)
Homocedasticidad (Levene)	0.796 > 0.05 (hay igualdad de varianzas)		0.976 > 0.05 (hay igualdad de varianzas)	
Medias (T - Student)	0.506 > 0.05 (hay igualdad de medias)		0.49 > 0.05 (hay igualdad de medias)	

La gráfica que se muestra en la Figura 8 corrobora los resultados del análisis estadístico, dado que se observa el comportamiento a corte únicamente de los valores medios en ambas formas de colocación del mortero, siendo estas muy similares.

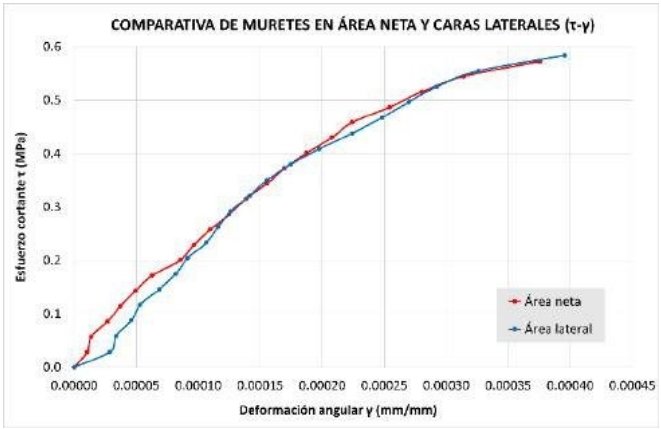


Figura 8. Curva τ – γ de la comparativa de los valores medios de los dos diferentes tipos de colocación del mortero.

CONCLUSIONES

Con la finalización del presenta trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- La pieza cumple con la resistencia mínima individual especificada en la normativa NMX-C- 404 y también con la resistencia a la compresión mínima de diseño que marca la norma.
- El mortero por su parte entra en la clasificación de mortero tipo I, siendo un 10.91% mayor que el valor mínimo de resistencia de diseño a compresión que rige la norma.
- La diferencia en el comportamiento a corte de la mampostería entre ambas variaciones de colocación del mortero (Área neta y área lateral) presentan valores similares.
- Los errores relativos obtenidos tomando como valor patrón la colocación de mortero en área neta fueron: 5.04% en la resistencia a compresión diagonal; 3.76% en la resistencia de diseño a compresión diagonal y 7.38% en el módulo a cortante.
- Con base al análisis estadístico no hubo diferencias significativas en el comportamiento general a corte de la mampostería con bloques huecos de concreto.
- Aunque no se haya obtenido diferencias significativas en el análisis estadístico, si se presentaron diferencias fundamentales en cuanto a los tipos de falla en ambos tipos de colocación del mortero. Cuando el mortero se coloca en área neta, la tendencia predominante es la falla combinada. Sin embargo, cuando se emplea el mortero en caras laterales, predomina la falla por adherencia.
- Con base al análisis de las fallas, es recomendable para fines de diseño frente a cargas

laterales emplear el mortero en área neta para la mampostería de boques huecos de concreto.

BIBLIOGRAFÍA

Lemos, J.V. and V. Sarhosis *Discrete Element Bonded-Block Models for Detailed Analysis of Masonry*. Infrastructures, 2022. 7, DOI: 10.3390/infrastructures7030031.

Pavía, S., *Compressive, flexural and bond strength of brick/lime mortar masonry*. 2009.

González del Solar, G., et al., *Modeling of Structural Masonry*. 2022.

Meli, R., *SEGURIDAD SÍSMICA DE LA VIVIENDA ECONÓMICA*. 2014, Secretaría de Gobernación.

Álvarez-Pérez, J., et al., *Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks.* Construction and Building Materials, 2020. 241: p. 118002.

Balandrano-Vázquez, R., *Análisis multifactorial del comportamiento a compresión axial de pilas de mampostería elaboradas con bloques huecos de concreto*, in *Facultad de Ingeniería Civil*. 2019, Universidad Autónoma de Nuevo León. p. 150.

Álvarez-Pérez, J.M.-L., Milena; Chávez-Gómez, Jorge H.:Fajardo-San Miguel Gerardo *Experimental investigation on tensile strenght of hollow concrete blocks.* Materials and Structures, 2021.

Alcocer, S.M., *COMPORTAMIENTO SíSMICO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERíA: UNA REVISIÓN.* Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C, 1997.

Gkournelos, P.D., T.C. Triantafillou, and D.A. Bournas, *Seismic upgrading of existing masonry structures: A state-of-the-art review.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022. 161: p. 107428.

K, M., et al., *Studies on shear strength and stiffness of brick masonry walls.* Materials Today: Proceedings, 2023.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-036-ONNCCE-2013, Mampostería – Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines – Método de Ensayo*. 03 de julio de 2013 México, D.F.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-037-ONNCCE-2013, Mampostería Determinación de la Absorción Total y la Absorción Inicial de Agua en Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones – Método de Ensayo* 31 de enero de 2014 México, D.F.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-038-ONNCCE-2013, Determinación de las Dimensiones de los Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Método de Ensayo*. 2014: México, D. F.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-061-ONNCCE-2010, Cementos Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos* 29 de Noviembre del 2010: México, D.F.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-404-ONNCCE-2012, Mampostería - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso Estructural - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. 13 de Diciembre de 2012: México, D. F.

ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX - C- 414 - ONNCCE - 1999, Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba*. 22 de Abril de 1999: México, D.F.

MÉXICO, G.O.D.L.C.D., *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA*. 2023: Ciudad de México, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., *NMX-C-464-ONNCCE-2010, MAMPOSTERÍA - Mampostería - Determinación de la Resistencia a Compresión Diagonal y Módulo de Cortante de Muretes, así como Determinación de la Resistencia*

a Compresión y Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Arcilla o de Concreto - Métodos de Ensayo. 24 de Junio de 2011: México, D.F.
Tatheer Zahra, J.T.a.M.A., *Compressive Strength and Deformation Characteristics of Concrete Block Masonry made with Different Mortars, Blocks and Mortar Beddings Types.* Building Engineering, 2021: p. 29.
Khan, N.A., et al., *Experimental characterization and empirical strength prediction of Pakistani brick masonry walls.* Journal of Building Engineering, 2023: p. 106451.
ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-109-ONNCCE-2013, Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. 2013: D.F., México.
ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S.C., *NMX-C-083-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes – Método de Ensayo*. 2014: México, D.F.
Materials, A.S.f.T.a., *ASTM C39 - Compressive strength of concrete cylinders.* 2002. 04.02
Materiales, A.S.f.T.a., *ASTM C307 - Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacings*. 2012, ASTM International.

INVESTIGACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MAPAS DE PRESIÓN PARA EL DISEÑO DE UN COJÍN ERGONÓMICO A TRAVÉS DE LA INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA: ESTUDIO PRELIMINAR

Luis Fernando de Jesús Barajas-Patlán, Israel Miguel-Andrés[2], Jorge Armando Ramos-Frutos[3], Francisco Javier Díaz-Sánchez.[4]

Biomecánica, CIATEC A.C., Omega 201, León, Gto., 37545, México.
lbarajas.estudiantepicyt@ciatec.mx[1]; imiguel@ciatec.mx[2]; jramos.estudiantepicyt@ciatec.mx[3]; fdiaz@ciatec.mx[4]

RESUMEN

Los efectos negativos del sedentarismo en trabajadores de oficina, como la opresión glútea, contracción muscular y riesgos circulatorios afectan a las personas cuando se encuentran en posición de sedestación por un lapso prolongado de tiempo. En el mercado existen diferentes almohadillas que presentan soluciones ergonómicas, abordando criterios como comodidad, presión, postura y antropometría, para mejorar la calidad de vida laboral y la salud de la población. Sin embargo, la falta de personalización y métodos cuantitativos para medir la eficiencia de las almohadillas disponibles en el mercado actualmente subraya la necesidad de esta investigación, donde se ofrece una metodología novedosa para la construcción de un cojín ergonómico basado en la antropometría de una población mexicana. El objetivo de la investigación es realizar un análisis de la distribución de los mapas de presión para el desarrollo de un diseño de almohadilla ergonómica que distribuya de manera uniforme la presión en la superficie del asiento. Dentro de la metodología propuesta para el diseño de la almohadilla se realizó un análisis de distribución de la presión de un conjunto de 5 participantes con características específicas: adultos de 24.2 ± 3.05 años en promedio, con jornadas laborales superiores a 6 horas y un índice de masa corporal de $23.05 \pm 3.85\ kg/m^2$. De los resultados que se obtienen en el análisis de las presiones utilizando CONFORMat System, se ha encontrado en primera instancia, que los niveles de presión más altos se encuentran en la zona de las tuberosidades isquiotibiales, donde arrojan un valor promedio de $12.34 \pm 2.01\ kPa$, con un área de contacto promedio de $267.30\ cm^2$ y $266.90\ cm^2$ para cada región isquiotibial. Como trabajo futuro se busca proponer el diseño de una almohadilla utilizando un Sistema de Diseño Asistido por Computadora para reducir la presión en las tuberosidades isquiotibiales, que son las que tienen picos de presión y donde se puede generar una alteración musculoesquelética.

INTRODUCCIÓN

La interacción del hombre con las herramientas, equipo y ambiente de trabajo es objeto de estudio de la ergonomía (Wilson, 2000). En la actualidad, se ha dado lugar a un estilo de vida sedentario en el que numerosos individuos se ven en la necesidad de permanecer largos periodos de tiempo sentados. La ausencia de movimiento y actividad física puede acarrear una serie de dificultades para la salud, como dolor de espalda, cuello, hombros e inclusive trastornos en la circulación sanguínea de las extremidades inferiores (Dattoli et al., 2018). Para diseñar y construir herramientas, máquinas y lugares de trabajo que se adapten al trabajador, se requiere del conocimiento de las medidas y de los movimientos de las partes del cuerpo que son decisivas para la realización de un trabajo en particular (Baca et al., 2014). Se deben tomar en consideración los movimientos e inclinación o rotación que debe hacer el trabajador en su plano de trabajo. En este contexto, la ergonomía se ha convertido en un campo de estudio y desarrollo de soluciones para hacer que la vida de las personas sea más cómoda y segura.

Este proyecto tiene como objetivo analizar los mapas de presión que genere un grupo de 5 individuos que pasan largos periodos de tiempo sentados en actividades laborales de oficina, se espera que este análisis contribuya en un futuro al desarrollo de propuestas de diseño para una almohadilla ergonómica que distribuya de manera uniforme la presión generada en las tuberosidades isquiotibiales.

TEORÍA

Según datos de la ENOE (Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo) la población ocupada que tiene un trabajo de carácter administrativo es de más de 13 mil personas, en el municipio de león Guanajuato (INEGI, 2021), este tipo de trabajo requieren ser realizado en escritorio y con una computadora donde una jornada laboral puede ser de mínimo 6 horas diarias, en estado de sedestación.

El sedentarismo, según (Luo et al., 2017), conlleva repercusiones negativas para la salud humana, como úlceras por presión, irritabilidad en la zona lumbar y enfermedades vasculares, entre otras, derivadas de una sedestación inadecuada. La anatomía de la cadera humana se caracteriza por un tejido blando multicapa, que abarca desde la piel hasta el glúteo mayor, incorporando las terminaciones nerviosas y capilares en su interior (Farfán, 2020), En la posición de sedestación, la interacción entre la cadera y la superficie del asiento se manifiesta principalmente a través de la presión y el esfuerzo cortante, provenientes de diversas direcciones, convergen predominantemente en la zona de las tuberosidades isquiotibiales (Sugimura & Wada, 2004).

La adecuación de los cojines ergonómicos puede ayudar a distribuir la presión ejercida en el área de contacto, estos pueden variar según diseño, marca y necesidades individuales, siendo algunos inapropiados por falta de opciones de personalización, diseño inadecuado, materiales de baja calidad o respaldo científico insuficiente (Sae-Lee et al., 2023).

En el mercado de almohadillas, se encuentran dos tipos: activas y pasivas. Las pasivas redistribuyen las presiones sin afectar la posición del paciente, dispersando tensiones en los tejidos. Las activas, alimentadas por energía eléctrica y respaldadas por baterías, influyen en el posicionamiento del paciente mediante ciclos de inflado y desinflado en las regiones bajo él, según señala (Katz & Gefen, 2023). A diferencia de las pasivas estáticas, las activas transfieren las presiones de interfaz bajo diferentes áreas de contacto.

Frecuentemente, se recurre a los mapas de presión del asiento para evaluar la comodidad de los usuarios (Yao et al., 2023). Durante la sedestación, el cuerpo humano establece un contacto directo con el asiento o cojín. La interfaz entre el cuerpo y el asiento, representada por el perfil de presión, puede ser visualizada a través de un mapa de presión mediante el uso de una matriz de sensores de presión (Anjani et al., 2021).

Moon y colaboradores, mencionan que la falta de consenso en la utilización de medidas de mapas de presión en relación con el confort o malestar percibido impulsa la necesidad de dividir el área de análisis (Moon et al., 2020). La división de la región de estudio en un mapa de presión impacta la visualización de datos. Por ejemplo, Lantoine y colaboradores utilizan el punto de la entrepierna para dividir el cuadro delimitador en cuatro regiones en el análisis de presiones de contacto (Lantoine et al., 2022). Yao y colaboradores sugieren dividir el mapa de presión de glúteos y muslos en seis regiones para obtener información adicional, aislando áreas específicas como las tuberosidades isquiotibiales (Yao et al., 2023),

Cuando dos objetos flexibles entran en contacto, la presión de interacción entre ellos se vuelve equivalente, y las superficies distorsionadas de la región de contacto se superponen, según señalan (Zhang & Ren, 2023). Para gestionar eficazmente la presión generada en esta área, la ergonomía desempeña un papel crucial. Enfocada en mejorar la comodidad y postura en entornos de trabajo, especialmente en situaciones sedentarias, la ergonomía ha impulsado la creciente popularidad de las almohadillas ergonómicas como solución para optimizar la experiencia de estar sentado durante largos periodos (Wilson, 2000).

Sonenblum sugiere evaluar múltiples configuraciones de almohadilla, incluyendo ajustes como modificar o añadir almohadillas, inflados y soportes para espalda, adaptándose a las necesidades posturales cambiantes de los clientes. Los ajustes en la silla buscan distribuir el peso corporal,

reducir la presión, mejorar la postura y aumentar la funcionalidad. Sin embargo, deben considerarse las necesidades específicas y objetivos individuales, así como las limitaciones financieras (Sonenblum et al., 2023).

Los métodos tradicionales para evaluar la comodidad del asiento, como los cuestionarios, son subjetivos y varían entre individuos. Bermamet y colaboradores proponen un enfoque innovador utilizando el Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus siglas en inglés) para modelar individuos con diversas antropometrías y asientos de diferentes diseños con distintos cojines. Este método, evaluando la presión de contacto mediante el Análisis de Elementos Finitos (FEA) en las fases iniciales del diseño, permite una evaluación precisa y eficiente de la comodidad sin la necesidad de prototipos físicos. Y concluyen que existe una correlación del 98% entre los enfoques numéricos y experimentales cualitativos, mejorando las métricas de evaluación de la comodidad y optimizando el proceso de diseño (Bermamet et al., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

Una perspectiva general de la metodología se puede ver en la Figura . Donde se muestra un diagrama de flujo en el que se describe a detalle el proceso de obtención y manejo de datos, donde posterior a la búsqueda de la literatura científica relacionada con el estudio y la fabricación de almohadillas ergonómicas, se realizó el reclutamiento de un grupo de 5 personas (jóvenes adultos), de entre 20 y 30 años que pasen al menos 6 horas sentados en una oficina.

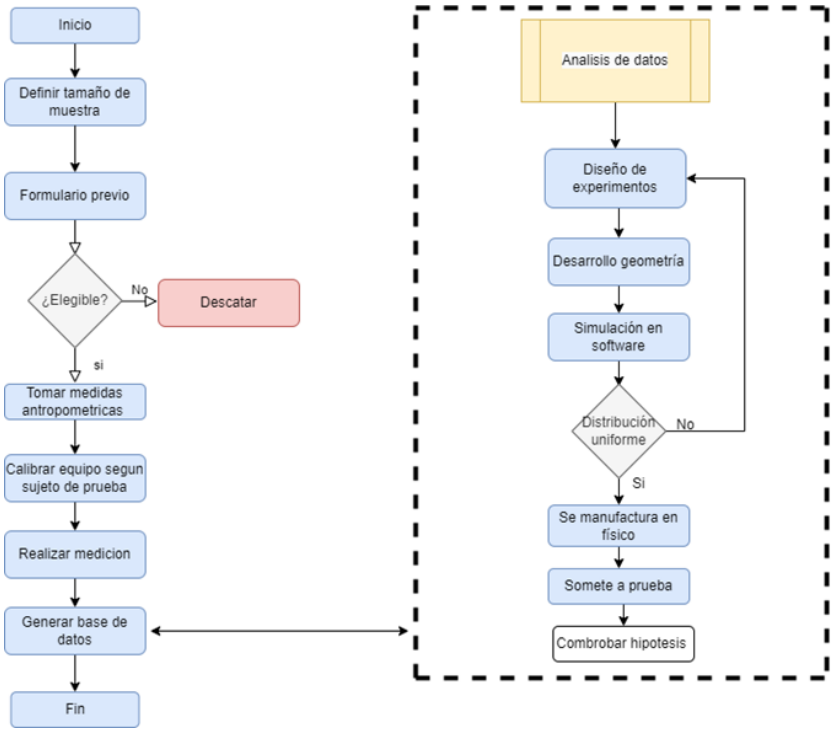


Figura 1. Metodología para la adquisición de los mapas de presión y desarrollo del modelo de la almohadilla ergonómica.

La metodología comienza con el establecimiento de un grupo muestral, integrado por hombres que residen en la ciudad de León, Guanajuato. La población de estudio está conformada por 5 personas con un índice de masa corporal normal o sobrepeso $(18.5 - 29.9\ \mathrm{kg}/m^2)$ y una edad comprendida

entre 20 y 30 años, que cuenten con una actividad laboral mínimo de 6 horas diarias y que, además reúnan los criterios de inclusión establecidos en el protocolo de investigación.

A partir de este punto el proceso, la medición del mapa de presión es individual por lo tanto, cuando un participante llega a las instalaciones donde se realizan las prueba, en primer lugar se le da a leer y firmar la carta de consentimiento informado, posteriormente llena un cuestionario donde debe señalar la información personal que es de su conocimiento (altura, peso, fecha de nacimiento, nombre, actividad, etc.), después del llenado de la información personal se decide si el participante es elegible según los criterios de inclusión y exclusión.

Si el sujeto no es elegible se descarta su participación, en caso contrario se procede a tomar sus medidas antropométricas de la forma que se muestra a continuación en la Figura , donde se toma la medida de la circunferencia horizontal del tronco a un nivel medio entre las costillas inferiores y la cresta ilíaca superior (International Organization for Standardization, 2017), y para medir la circunferencia de la cadera, se toma la distancia de alrededor de la parte horizontal más prominente de los glúteos, sin comprimir la piel.

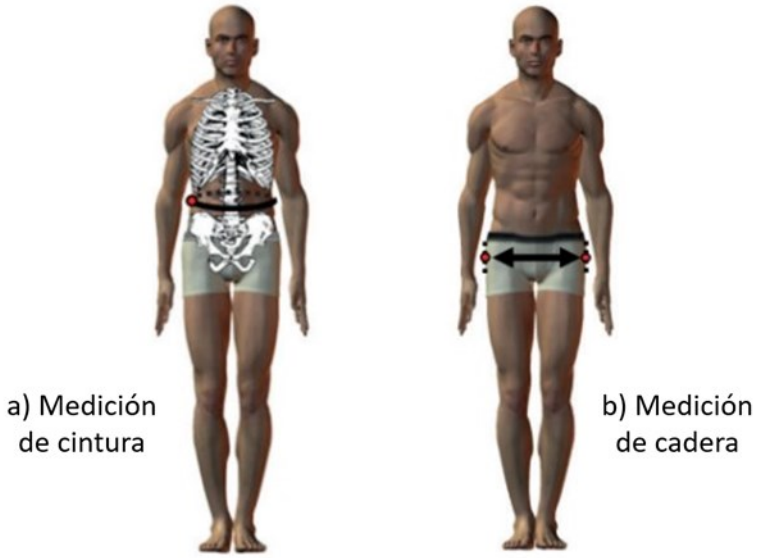


Figura 2. Toma de medidas antropométricas: a) cintura y b) cadera (International Organization for Standardization, 2017).

Otro de los datos que se espera capturar es la circunferencia de los muslos de la población, mientras el sujeto esta erguido. La medida se toma pasando la cinta horizontalmente alrededor del muslo en su circunferencia máxima, generalmente justo debajo del pliegue del glúteo Figura**3**.

Figura 3. Medida de la circunferencia del muslo.

Por último, en base a lo que se menciona en la ISO 7250-1, se toma las medidas del tren inferior acotadas en la *Figura* **4**, esto con la finalidad de tener una noción de las proporciones antropométricas que tiene el sujeto a analizar.

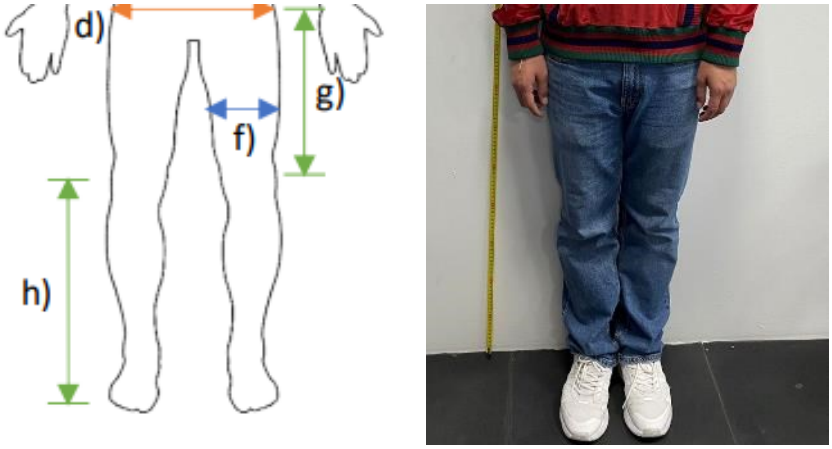


Figura 4. Media de tren inferior: d) Circunferencia de cadera, f) circunferencia de muslo, g) longitud de muslo y h) longitud de pierna.

Con las medias antropométricas conocidas se comienza con el análisis, para esto se prepara una silla adaptada con una placa de EVA en el asiento para asegurar la uniformidad de la superficie y sobre esta se coloca la matriz de sensores (COMFORMat System) con la cual se realizan las pruebas *Figura***5**.

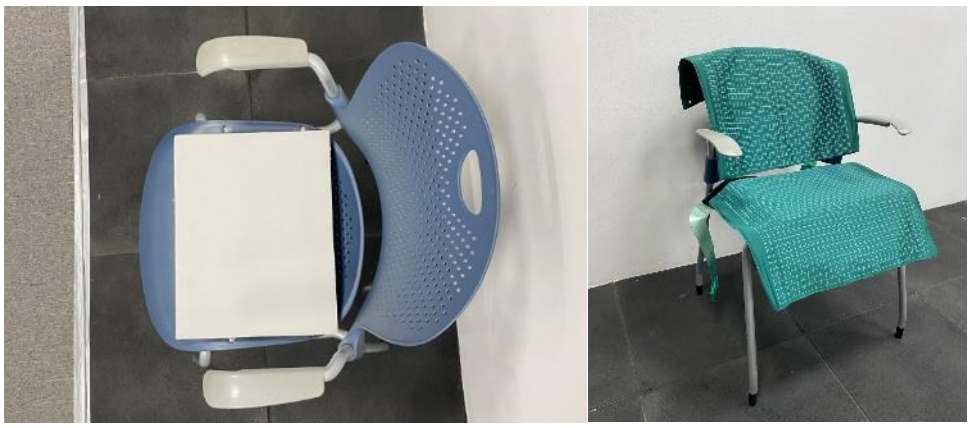


Figura 5. Silla con placa de EVA vista superior (izquierda), Silla con matriz de sensores (derecha).

Una vez instalada la matriz de sensores en el programa se captura la información proporcionada por el sujeto para después calibrar el equipo de medición de acuerdo con el manual de usuario y prepararlo para realizar el estudio en la silla acondicionada con la matriz censora (*Figura***6**), este paso es importante porque se debe acondicionar por cada sujeto el sensor, es decir cada medición es personalizada con respecto a su altura y peso.

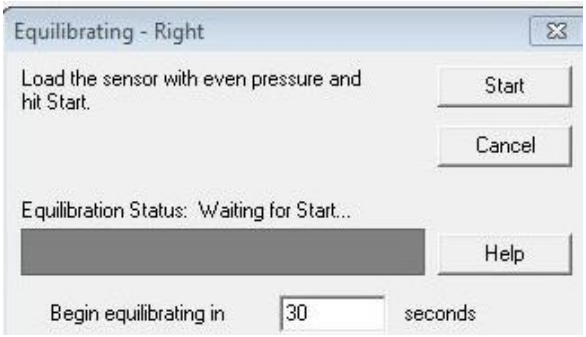


Figura 6. Calibración de matriz censora.

Una vez calibrado el equipo el participante debe colocarse en tres distintas posiciones como se muestra en la *Figura* **7**.

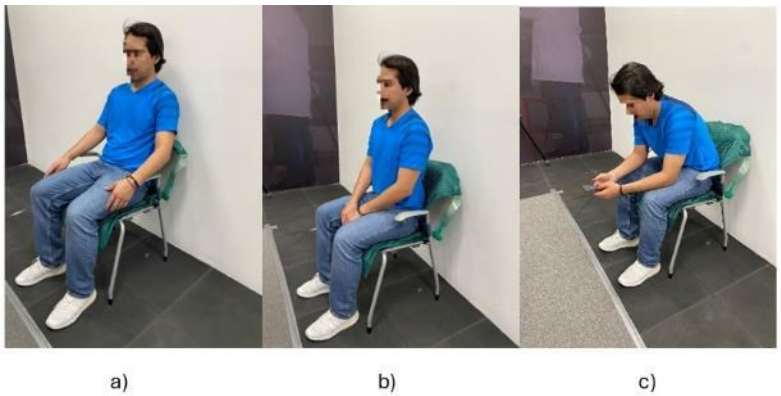


Figura 7 Posiciones a evaluar: a) Posición recta con espalda apoyada a respaldo, b) Posición recta sin apoyo y c) Posición relajada.

La captura de las distintas posiciones arroja un mapa de presión como el que se puede apreciar en la *Figura***8**.

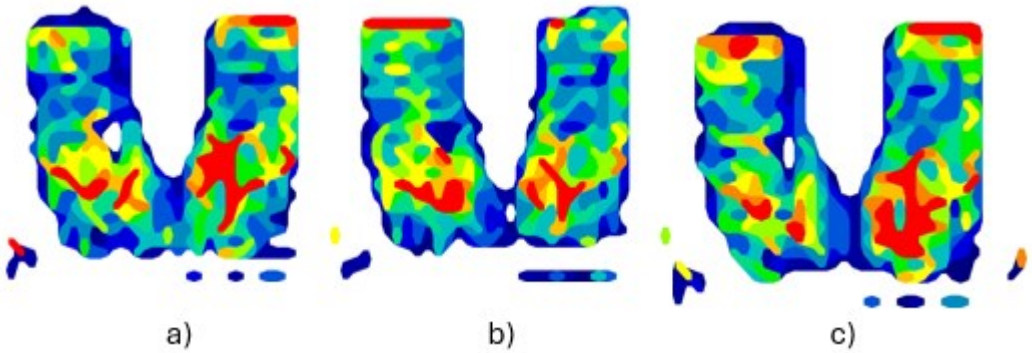


Figura 8. Ejemplos de mapas de presión: a) en postura recta con espalda apoyada a respaldo, b) en posición recta sin apoyo y c) posición relajada.

Como se muestra en la Figura **8** después de obtener los mapas de presión de todos los participantes, se analiza la información recabada que sirve como referencia para que a través de un modelo de experimentos se propongan diversas configuraciones de geometrías en base a la distribución de presión promedio en la superficie de contacto y de materiales con relación al pico de presión promedio, así como el grosor de la almohadilla.

RESULTADOS

A continuación, se presenta un concentrado de los promedios y la desviación estándar de los datos que representan las mediciones antropométricas realizadas a los 5 participantes, la media de los participantes es de 24.2 ± 3.05 años y una altura de $1.72\, m^2$, el índice de masa corporal de los participantes entra de lo considerado normal con $23.05 \pm 3.85\, kg/m^2$, otros datos antropométricos de interés se pueden apreciar en la *Tabla 1***1**.

Tabla 1. Datos antropométricos.

	Edad (años)	Altura (cm)	Peso (kg)	IMC (kg/m^2)	Cintura (cm)	Cadera (cm)	Muslo (cm)	Cadera-Rodilla (cm)
Promedio	24.2	1.72	68.36	23.05	79.40	90.30	50.98	46.14
Desv. Est	±3.05	±0.037	±11.19	±3.85	±10.44	±13.75	±4.75	±3.22

El voluntario adopta las posturas de medición como se muestra en la *Figura***9**.

a) b)

Figura 9. Ejemplo de posiciones adoptadas: a) Posición recta sin pegarse al respaldo, b) posición relajada usando el móvil).

Entre los datos obtenidos resultado de las mediciones de los 5 participantes se encuentra que la concentración de presión más alta en promedio se encuentra en la posición de sedestación recta con un valor de $12.34 \pm 2.01\, kPa$, esta posición ocupa más superficie que la posición recta sin pegarse al respaldo (como si se usara la computadora) ya que esta posición ocupa $75.528\, cm^2$ y $79.43\, cm^2$ en la zona que comprende el fémur de ambas piernas. En la zona de los glúteos, encontramos que solo ocupa $244.37\, cm^2$ y $234.82\, cm^2$ una cifra menor que lo que se puede ver en la posición recta; promedios y desviación estándar en los picos de presión, y superficie de contacto se pueden apreciar en la *Tabla* **2**.

Tabla 2. Resultados promedio de las mediciones a 5 participantes.

	Posición	Superficie de contacto (cm^2)				Presión Promedio kPa	Pico Presión kPa (zonas isquiotibiales)	
		Fémur izquierdo	Fémur derecho	Glúteo izquierdo	Glúteo derecho		Izquierdo	Derecho
Promedio	Recto	72.924	72.922	267.384	266.95	12.34	71.4	59.26
	Escritorio	75.528	79.432	244.376	234.828	12.06	54.82	63.9
	Celular	77.698	82.906	223.106	223.07	11.62	47.74	41
Desv. Est	Recto	±18.24	±7.34	±44.57	±48.32	±2.01	±25.91	±17.70
	Escritorio	±17.33	±15.20	±58.87	±44.32	±1.40	±12.19	±18.26
	Celular	±20.38	±17.65	±46.96	±42.91	±2.16	±23.55	±15.06

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante al análisis de los mapas de presión muestran que la región de mayor presión son los isquiotibiales. Este patrón de presión no se ve modificado drásticamente cuando las personas cambian su postura o posición de la columna vertebral y el apoyo con el respaldo del asiento. El análisis de la distribución de los mapas de presión puede contribuir para el diseño y desarrollo de almohadillas ergonómicas que reduzcan los excesos de presión en la piel.

BIBLIOGRAFÍA

Anjani, S., Kühne, M., Naddeo, A., Frohriep, S., Mansfield, N., Song, Y., & Vink, P. (2021). PCQ: Preferred Comfort Questionnaires for product design. *Work*, *68*, 19–28. https://doi.org/10.3233/WOR-208002

Baca, G., Cruz, M., Cristobal, M., Baca, G., Gutiérrez, J., Pacheco, A., Rivera, Á., Rivera, I., & Obregón, M. (2014). *Introducción a la ingeniería industrial*.

Bermamet, H., Syed, S., & Amer, S. (2023). Investigating the Effect of Seat Features and Cushion Material on Seat Comfort using Finite Element Analysis. *IEOM Society International*, 1633–1640. https://doi.org/10.46254/eu05.20220315

Dattoli, S., Colucci, M., Soave, M. G., De Santis, R., Segaletti, L., Corsi, C., Tofani, M., Valente, D., & Galeoto, G. (2018). Evaluation of pelvis postural systems in spinal cord injury patients: Outcome research. *National Library of Medicine*, *43*(2), 185–192. https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1456768

Farfán, E. (2020). *Bases morfológicas de los músculos isquiotibiales para la comprensión de sus lesiones intrínsecas*. https://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/ns000545/customproxy.php?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.671373&amp%0Alang=pt-pt&site=eds-live&scope=site

INEGI. (2021). Comunicado De Prensa Núm . 115 / 21 Resultados De La Encuesta Nacional De Ocupación Y Empleo . *Resultados De La Encuesta Nacional De Ocupación Y Empleo .*, *COMUNICADO*, 1–3.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 7250-1 Basic human body measurements for technological design-Part 1: Body measurement definitions and landmarks*. *2017*, 1–52. www.iso.org

Katz, T., & Gefen, A. (2023). The biomechanical efficacy of a hybrid support surface in protecting supine patients from sacral pressure ulcers. *International Wound Journal*, *20*(8), 1–9. https://doi.org/10.1111/iwj.14192

Lantoine, P., Lecocq, M., Bougard, C., Dousset, E., Marqueste, T., Bourdin, C., Allègre, J. M.,

Bauvineau, L., & Mesure, S. (2022). Influence of car seat firmness on seat pressure profiles and perceived discomfort during prolonged simulated driving. *Applied Ergonomics*, *100*, 103666. https://doi.org/10.1016/J.APERGO.2021.103666

Li, W., Mo, R., Yu, S., Chu, J., Hu, Y., & Wang, L. (2020). The effects of the seat cushion contour and the sitting posture on surface pressure distribution and comfort during seated work. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, *33*(5), 675–689. https://doi.org/10.13075/IJOMEH.1896.01582

Luo, S., Wang, Y., Gong, Y., Shu, G., & Xiong, N. (2017). A preliminary study of smart seat cushion design. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *10291 LNCS*, 427–443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58697-7_32/FIGURES/12

Moon, J., Sinha, T. K., Kwak, S. B., Ha, J. U., & Oh, J. S. (2020). Study on Seating Comfort of Polyurethane Multilayer Seat Cushions. *International Journal of Automotive Technology*, *21*(5), 1089–1095. https://doi.org/10.1007/S12239-020-0102-Z/METRICS

Sae-Lee, W., Intolo, P., & Kongprasert, N. (2023). Development of seat cushion to improve Lumbo-pelvic posture and pain in office workers. *AIP Conference Proceedings*, *2*(1), 1–109. https://doi.org/10.1063/5.0112582/2888779

Sonenblum, S. E., McDonald, A., Maurer, C. L., Bass, A., Watson, M., & Zellner, H. (2023). Reducing pressure with the goal of improving outcomes: a retrospective chart review of cushion evaluations and recommendations at one seating clinic. *Https://Doi.Org/10.1080/17483107.2023.2212012*. https://doi.org/10.1080/17483107.2023.2212012

Sugimura, Y., & Wada, C. (2004). An analysis of the force and angle necessary to develop a standing-up assistive device. *SICE 2004 Annual Conference*. https://doi.org/10.11499/SICEP.2004.0_52_4

Wilson, J. R. (2000). Fundamentals of ergonomics in theory and practice. *Applied Ergonomics*, *31*(6), 557–567. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00034-X

Yao, X., He, Y., Udomboonyanupap, S., Hessenberger, N., Song, Y., & Vink, P. (2023). Measuring pressure distribution under the seat cushion and dividing the pressure map in six regions might be beneficial for comfort studies of aircraft seats. *Ergonomics*, *66*(10), 1594–1607. https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2157495

Zhang, T., & Ren, J. (2023). A design method for contact contour based on the distribution of target contact pressure. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 1–17. https://doi.org/10.1007/S10999-023-09674-5/METRICS

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE ZNS OBTENIDAS POR EL METODO DE PRECIPITACIÓN QUÍMICA, PARA SU POSIBLE APLICACIÓN COMO MATERIAL LUMINISCENTE

Diana Landaverde Espinoza[1], María de los Ángeles Vargas Hernández[1], Alejandro Iván Cuesta Balderas[2,3]

[1]TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec,
[2]ESIQIE - Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas – IPN-
[3]Polímeros y Compositos, S.A. de C.V.
dianalanadaverde@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo describe la preparación de partículas de sulfuro de zinc (ZnS) mediante el método de precipitación química. Para la síntesis de las partículas de ZnS se utilizaron como reactivos el $ZnSO_4$ y Na_2S el precipitado obtenido (ZnS) se lavó, filtró y secó a 60°C. Para evaluar los cambios estructurales y morfológicos del ZnS obtenido, se sometió a un tratamiento térmico bajo atmósfera de vacío a diferentes temperaturas: 300°C, 500°C y 800°C. Las muestras fueron caracterizadas mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) adaptado con un detector de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Los resultados experimentales muestran un efecto de la temperatura sobre la estructura del ZnS sintetizado. Las muestras secadas a 60°C y a 300°C presentan una estructura cristalina romboédrica de ZnS y una morfología irregular con dos zonas identificables, una con aglomerados y la otra con partículas aisladas. La muestra de ZnS tratada a 500°C consiste en partículas semiesféricas uniformemente distribuidas, con una mezcla de fases cristalinas que corresponden a la esfalerita y wurzita. En la muestra tratada térmicamente a 800°C las partículas tienen una morfología prismática rectangular, las cuales presentan una mezcla de tres fases cristalinas, la esfalerita y wurzita del ZnS y la fase correspondiente al ZnO. Esta muestra exhibió el fenómeno de fotoluminiscencia en presencia de luz ultravioleta.

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de reducir la gran cantidad de emisiones de CO_2 causado por la generación de energía eléctrica, se han desarrollado nuevos dispositivos en estado sólido luminiscentes (ML) que no producen gases de invernadero. Un caso especial, son las partículas de sulfuro de zinc (ZnS) conocidas por sus extraordinarias propiedades luminiscentes y gran resolución, características que son aprovechadas para las diferentes aplicaciones comerciales [1], por ejemplo; celdas solares, dispositivos optoelectrónicos (láseres), sensores, pantallas de televisión de plasma, emisores de luz, diodos blancos (LED), lámparas fluorescentes, biosensores etc [2]. Los sistemas con luz blanca LED, reducen el consumo de energía eléctrica en un 20-40%, presentan vida útil larga en comparación a las bombillas y lámparas fluorescentes convencionales y son respetuosas con el medio ambiente, ya que la tecnología LED blanca no incluye el uso de Hg en la generación de radiación UV [3].

Las partículas de sulfuro de zinc (ZnS) presentan distintas estructuras cristalinas, pueden mezclarse con otros elementos o compuestos, resultando una emisión de luz de diversos colores basada en la especie adicionada. Actualmente, se investigan nanocristales semiconductores como convertidores de longitud de onda. Estos nanocristales semiconductores llamados puntos cuánticos presentan varias ventajas, como la relación directa entre la longitud de onda de emisión y el tamaño de partícula, espectro de emisión estrecho y alta eficiencia de fluorescencia.

Por otro lado, se conoce que el ZnS pertenece a la familia II-VI de los materiales semiconductores, puede cristalizar en dos formas alotrópicas: una forma cúbica (c-ZnS) con estructura de esfalerita

y la otra es hexagonal (h-ZnS) con estructura de wurtzita. La temperatura de transición de fase normal es de 1020 °C, pero ambas estructuras pueden estar presentes a temperatura ambiente [4]

Los métodos para la síntesis de nanopartículas de ZnS semiconductoras pueden clasificarse en dos grupos; [5]. En los métodos físicos se encuentran, la evaporación térmica, evaporación por haz de electrones, pulverización catódica y deposición química en fase vapor de metal orgánicos microondas. En los métodos químicos engloban la precipitación química, procesos hidrotérmicos, micro emulsión, el método de micelas inversas, entre otros. Cada método de síntesis produce partículas de ZnS con características particulares como; tamaño de partícula, cristalinidad, morfología, etc.[6]. El objetivo de este trabajo es la síntesis de ZnS con propiedades de fotoluminiscencia utilizando el método de precipitación química, ya que es un proceso sencillo y económicamente viable. El método consiste en una mezcla de disoluciones en proporciones estequiométricas de los precursores, sulfato de zinc ($ZnSO_4$) y sulfuro de sodio (Na_2S). En la síntesis se tuvieron las siguientes condiciones de reacción; solubilidad, pH del sistema reaccionante y tiempo de reacción. La reacción se realizó a temperatura ambiente a una velocidad de agitación de 300 rpm. El ZnS obtenido se caracterizó con las técnicas de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido (EDS). Finalmente, se determinó el efecto que tiene las condiciones de reacción y procesamiento térmico del ZnS sobre las propiedades del material, es decir, tamaño de partícula, distribución de fases (esfalerita, wurzita y romboédrica), cristalinidad y evaluación de fotoluminiscencia bajo condiciones de luz ultravioleta.

TEORÍA

“El proceso de electroluminiscencia se define como la generación no térmica de luz mediante la aplicación de un campo eléctrico a la muestra” [7]. “El fundamento de la electroluminiscencia (EL) es la formación de excitones que se desactivan mediante la emisión de energía en forma de luz. A través del material se aplica un potencial eléctrico mediante la inyección de electrones y huecos (vacantes de electrones) desde el cátodo y el ánodo, respectivamente. Bajo la influencia del campo aplicado, los electrones y los huecos migran a través del dispositivo y se produce la recombinación de cargas opuestas formando un estado excitado, llamado excitón. El sulfuro de zinc (ZnS) presenta fotoluminiscencia (PL) y electroluminiscencia (EL), además, los fósforos basados en ZnS exhiben excelentes eficiencias de conversión de electrones a pares de huecos. El sulfuro de zinc es uno de los mejores semiconductores para dispositivos con EL” [8].

“Un semiconductor es un material que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo del campo eléctrico en el que se encuentre. Para que un semiconductor conduzca electricidad es necesario que el material tenga electrones que no estén unidos a un enlace determinado y sean capaces de moverse a través del material [9]. El semiconductor está compuesto de tres capas. Una capa *n* con excedente de electrones, una capa *p* con excedente de huecos positivos, es decir con déficit de electrones, y una capa activa que se encuentra entre las capas *p* y *n*, hacia la cual son impulsados los electrones y los huecos positivos cuando se aplica una diferencia de potencial (tensión eléctrica) al semiconductor”. “Cuando los electrones y los huecos se recombinan, se genera emisión de luz, cuya longitud de onda depende del material semiconductor. La emisión de luz es entonces generada por el proceso de electroluminiscencia” [10] , Figura 1.

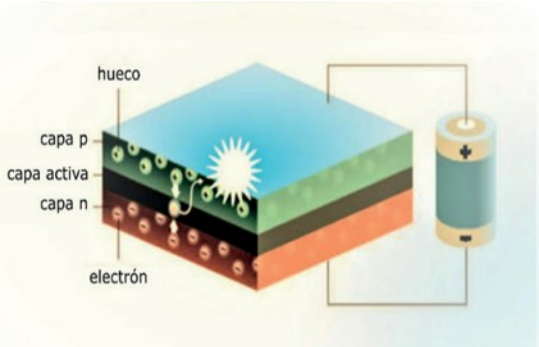


Figura 1. Diagrama esquemático de un LED semiconductor [10]

"Las bandas de energía asociadas son: banda de valencia, banda de conducción y banda prohibida. La banda de valencia es el nivel en donde se realizan las combinaciones de electrones, formando iones o incluso moléculas cunado se comparten con varios átomos. La banda de conducción en donde los electrones se comparten a través de un sólido, es decir los electrones se encuentran prácticamente libres en el material. La banda prohibida es la diferencia de energía de las anteriores, es la energía necesaria (Eg) para que un electrón pase de una banda de valencia a la banda de conducción" [9], Figura 2.

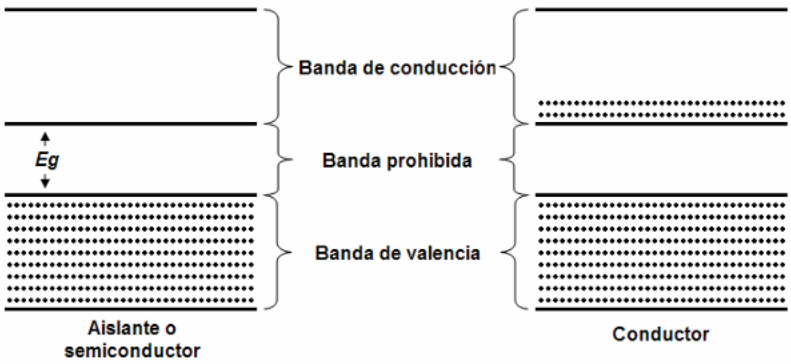


Figura 2 bandas de energía de los materiales [9]

"Un semiconductor que no tiene ningún tipo de impureza se conoce como semiconductor intrínseco, posee una banda prohibida lo suficiente grande como para que los electrones no pasen de la banda de valencia a la banda de conducción, comportándose como un aislante. Si al semiconductor se le aplican impurezas puede comportarse como un material conductor que tiene portadores de cargas positivas o huecos y portadores de cargas negativas o electrones, dependiendo del material con que sea dopado o "contaminado", a este material se conoce como semiconductor extrínseco tipo p o tipo n, respectivamente. Con este dopado, el material tiene portadores que pueden ir de la banda de valencia a la banda de conducción siempre y cuando se le administre energía suficiente como para superar la energía de la banda prohibida. Esta energía puede ser térmica, eléctrica, luminosa, etc" [9].

"El LED es un transductor, convierte la energía eléctrica en energía luminosa en el espectro visible, a través del proceso de electroluminiscencia. Al aplicar un voltaje de polaridad directa a la unión p-n, los electrones mayoritarios de la región *n* son desplazados a la región *p*, lo que hace que se conviertan en potadores minoritarios en exceso". "Los huecos mayoritarios de la región *p* se convierten en minoritarios cuando son inyectados en la región *n*" [11]. La figura 1 muestra el proceso de electroluminiscencia.

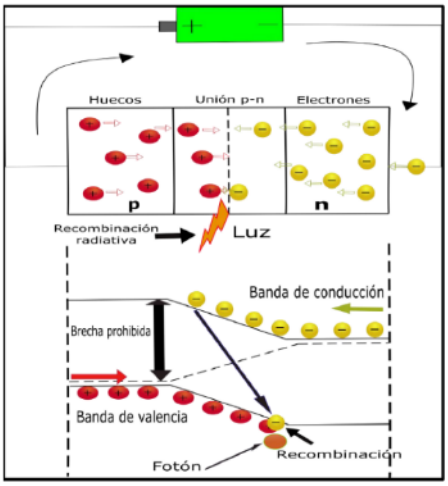


Figura 3 Proceso de un sistema LED [11]

"Los LEDs de homounión son dispositivos semicondutores compuestos por el mismo material con diferentes concentraciones, en un lado posee una región tipo n y en el otro lado una región tipo p. Al aplicar un voltaje de polaridad directa, los electrones son suministrados a la región del tipo p y éstos se mueven a la región del tipo n, la recombinación de electrones y huecos en la región de agotamiento da como resultado la generación de luz" [11]. "Este tipo de LED presenta un uso limitado en aplicaciones industriales de la iluminación por su eficiencia. La eficiencia del LED es la relación de la cantidad de fotones que pueden emitir para generar luz en relación de los pares electrón-hueco que se recombinaron en total, la eficiencia depende de varios factores que son: Absorción, refracción, reflexión y rendimiento externo" [9].

PARTE EXPERIMENTAL

La síntesis de ZnS consistió principalmente en tres etapas: en la primera etapa se sintetizó las partículas de ZnS por el método de precipitación química, esto permite tener un buen control de la morfología y estructura del producto sin la necesidad del uso de equipos sofisticados, además de que se pueden emplear reactivos químicos de bajo costo.
La segunda etapa consistió en un tratamiento térmico a diferentes temperaturas bajo una atmósfera controlada en un horno tubular con sistema de vacío. Las temperaturas a las que se sometieron las muestras fueron 60°C, 300 °C, 500 °C y 800 °C
Finalmente, la tercera etapa consistió en la caracterización estructural, morfológica y elemental de las muestras mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) con un detector de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS).

En la síntesis de las partículas de sulfuro de zinc se utilizaron disoluciones de $ZnSO_4$ y Na_2S con una relación molar de 1:2. El $ZnSO_4$ se agregó a la disolución de Na_2S gota a gota con agitación magnética vigorosa a temperatura ambiente durante una hora de reacción. El precipitado obtenido se filtró y lavó con agua destilada varias veces y posteriormente, se secó a 60°C por 2h en un horno de convección.

El precipitado de ZnS se sometió a un tratamiento térmico en un horno tubular (CVD), a una velocidad de calentamiento de 15°C/min, desde la temperatura ambiente hasta 300 °C, 500 °C o 800 °C durante 60 minutos bajo una atmósfera controlada de vacío.

El enfriamiento se realizó a velocidad de 5°C/min hasta la temperatura ambiente.

Las técnicas de caracterización utilizadas fueron las siguientes:

Difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X (DRX) fue utilizada para identificar las fases presentes en las muestras, así como para obtener información acerca de su cristalinidad. Para el análisis de DRX se utilizó un difractómetro de marca Bruker-AXS, modelo D8-Advance con una fuente de Cu Kα mono cromada, utilizando las siguientes condiciones de análisis: una velocidad de barrido de 2°/min en un intervalo de 2θ= 20°- 80°. La difracción de rayos X es una técnica no destructiva, utilizada para la caracterización estructural de los materiales, la cual consiste en hacer incidir un haz de rayos X, monocromático en el material de estudio, dicho haz se desvía de su dirección original por su interacción con el material irradiado.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Las partículas de ZnS obtenidas se analizaron por microscopia electrónica de barrido en un equipo de marca JEOL field emisión SEM-6701F acoplada con un detector de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS).

Condiciones de equipo:

- Voltaje de aceleración 1000 volts por segundo.
- Acercamientos del lente a 5000 px, 20000 px, 50000 px.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) (o SEM) permite la caracterización morfológica, estructural y de composición de superficies sólidas mediante imágenes con diferente grado de resolución.

Caracterización estructural, morfológica y elemental

El estudio de las propiedades físicas, químicas y eléctricas de un material es esencial en ingeniería, ya que esto permite evaluar si el material es adecuado para la aplicación deseada, se realizó mediante microscopia electrónica de barrido (MEB). La caracterización elemental es la técnica que permite determinar el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presentes en las muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas, se realizó mediante espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Estas técnicas serán usadas para la caracterización de las partículas de ZnS obtenidas en este trabajo.

RESULTADOS

Las muestras obtenidas se nombraron de la siguiente manera: Muestra de ZnS secada a 60 °C, sin tratamiento térmico S-60; muestras de ZnS secadas a 60 °C y sometidas a tratamiento térmico de 300 °C, 500 °C y 800 °C, corresponden a T-300, T-500 y T-500, respectivamente.

La caracterización estructural de las muestras se llevó a cabo mediante la técnica de difracción de rayos X. Los patrones de DRX fueron analizados para identificar y cuantificar las fases presentes en las muestras, se utilizó el software highscore plus.

La Figura 4 muestra el patrón de difracción de rayos X de la muestra S-60. El difractograma presenta tres picos principales, la posición en 2Θ de los cinco picos coincide con los

correspondientes al compuesto ZnS con estructura cristalina romboédrica (se utilizaron cartas de referencia JCPDF (01-083-1700) para comparar el producto obtenido con una referencia HS Pristine. Los resultados comprueban que el producto obtenido por precipitación química corresponde a ZnS sin impurezas.

Por otro lado, la forma ancha de los picos puede atribuirse a un tamaño de cristal muy pequeño o a una baja cristalinidad del compuesto. El patrón de DRX de la muestra T-300 (Figura 4) presenta picos en las mismas posiciones en 2Θ que los de la muestra a 60°C, como se mencionó anteriormente, estos corresponden al ZnS. Además, esta muestra presenta una estructura romboédrica, misma estructura que S-60. El resultado indica que la estructura cristalina del ZnS se mantiene, incluso a temperatura de 300 °C. Sin embargo, los picos de T-300 son más intensos y mejor definidos que S-60, lo que sugiere un aumento en la cristalinidad de esta muestra producto del reordenamiento atómico favorecido por el incremento de la temperatura.

En el patrón de DRX de la muestra T-500 (Figura 4) presenta 14 picos principales en posición 2Θ, asociados a dos fases cristalinas diferentes. Por un lado, hay picos que coinciden con la estructura cristalina cúbica llamada esfalerita del ZnS, y los otros picos coinciden con la estructura cristalina hexagonal llamada wurzita del ZnS. Estos resultados fueron comparados con las cartas de referencia JCPDF 98-007-7082 y JCPDF 01-079-2204, obtenidas de la base de datos del programa OriginLab y tomando como referencia a la HS-Pristine.

Los resultados indican que la estructura romboédrica que presentaron las muestras a 60 °C y 300°C se transformaron a esfalerita y wurzita, las cuales coexisten en la muestra T-500. Los picos correspondientes a ambas fases son muy intensos y están bien definidos, indicando alta cristalinidad del material. El patrón de DRX de la muestra T-800, Figura 4 presenta picos correspondientes a las fases esfalerita y wurzita del ZnS al igual que la muestra T-500, pero se exhiben picos adicionales que corresponden al óxido de zinc (ZnO) con estructura cristalina hexagonal, estas señales se definieron con base a la carta de referencia JCPDF 01-079- 0207. Así, que para la temperatura de 800 °C coexisten tres fases; las fases esfalerita y wurzita de ZnS y la fase hexagonal del ZnO. La formación del ZnO se explica por medio de la siguiente reacción: $2\,ZnS + 3O_2 \rightarrow 2\,ZnO + 2\,SO_2$. El ZnS reacciona con el oxígeno de la atmósfera a temperaturas altas produciendo ZnO sólido y SO_2 en forma de gas.

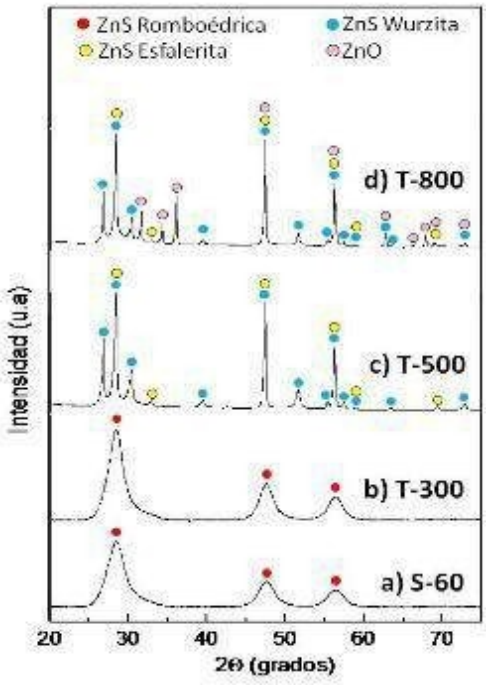


Figura 4 Comparación de los patrones de DRX de las muestras a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

Análisis morfológico

La morfología de las muestras, así como el tamaño y distribución de las partículas de ZnS fueron determinadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). La Figura 5 presenta las micrografías con 5000 aumentos de las muestras; a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800, mientras que los insertos corresponden a micrografías a 50 000 aumentos de cada muestra.

Se observa que los sistemas a) S-60 y b) T-300 presentan morfologías similares, ambos sistemas presentan una estructura irregular con tendencia a ser esféricas, con aglomerados y partículas aisladas de diferentes tamaños. La similitud entre estas dos muestras podría deberse a que ambas tienen una estructura cristalina romboédrica, y su morfología irregular podría estar relacionada con la baja cristalinidad como se comentó en los resultados de DRX.

La muestra T- 500 presenta un cambio significativo en la morfología con respecto a las muestras anteriores, ya que en este caso existe una menor cantidad de aglomerados. En contraste con las muestras anteriores, se tiene principalmente partículas individuales, con morfología semiesférica y con superficie lisa. Los resultados sugieren que a la temperatura de 500 °C no solo existe un cambio de las fases cristalinas de romboédrica a esfalerita y wurzita, como se observó en los resultados de DRX, sino que también existe un cambio apreciable en la morfología.

En la muestra T-800 se observa un cambio en la morfología con respecto a la muestra T-500, en este caso las partículas tienden a formar una estructura prismática rectangular y existen zonas con partículas aglomeradas de formas irregulares.

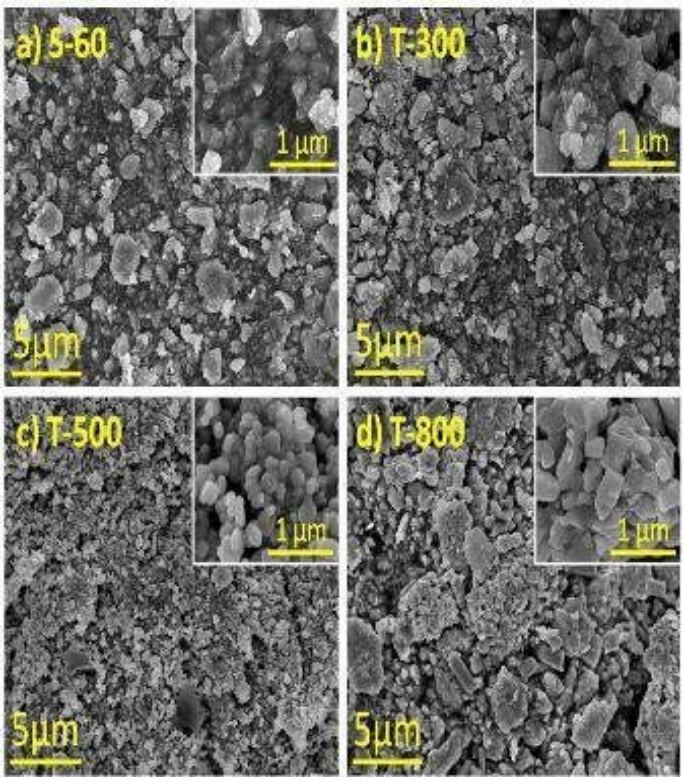


Figura 5 Micrografías de MEB de las muestras a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

Evaluación de tamaño de partícula

Se usó un microscopio AMSCOP (Microscopio de zoom estéreo trinocular simul-foca) con un software que permite medir el tamaño de partícula promedio. La Figura 6 muestra los histogramas de la distribución del tamaño de partículas de las muestras; a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

El Tamaño de partícula promedio (TP_{prom}) de las muestras se encuentra en la escala de nanómetros. Las muestras S-60 y T-300 son las que presentan mayor tamaño de partícula (TP_{prom} de 454.93 nm y 511.90 nm, respectivamente), esto se relaciona a la cantidad de aglomerados que existen en estos sistemas, tal como se mostró en las micrografías MEB. En contraste, la muestra T-500 tiene un tamaño promedio de partícula, TP_{prom} de 370 nm. Como se comentó anteriormente, la imagen de MEB ara esta muestra presenta pocas partículas aglomeradas.

Finalmente, la muestra T-800 tiene un tamaño de partícula, TP_{prom} de 407 nm. El ligero incremento del tamaño de partícula en comparación a la muestra T-500 se puede deber a la presencia de ZnO, tal como se señaló en los resultados de DRX.

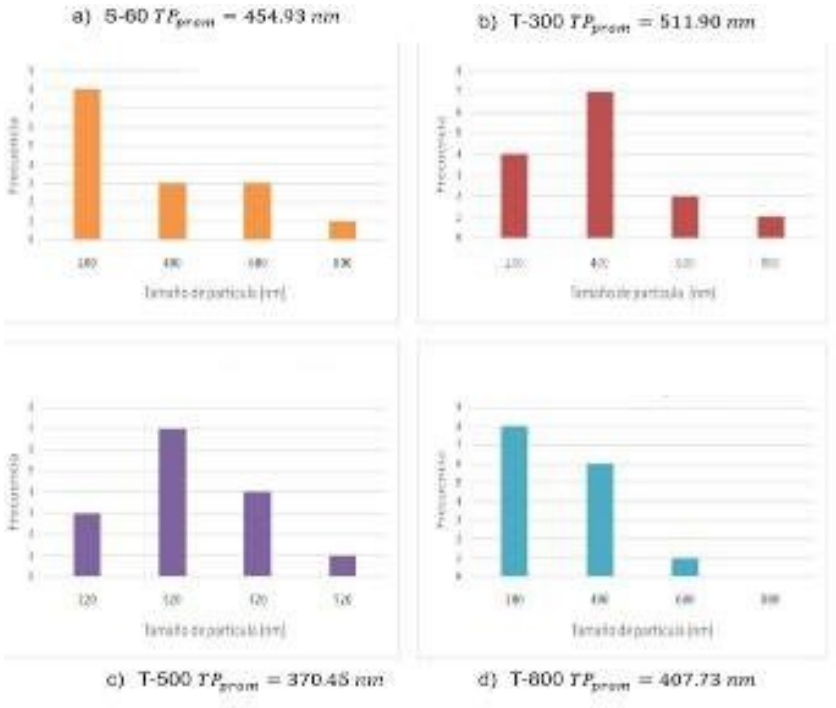


Figura 6 Histogramas de la distribución del tamaño de partículas de las muestras a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

Análisis de composición elemental

La composición y distribución de los elementos en las partículas de ZnS sintetizadas se realizó mediante espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). La Figura 7 presenta los espectros obtenidos por EDS de las muestras; a) S-60, b) T- 300, c) T-500 y d) T-800. Todas las muestras presentan únicamente los picos correspondientes a los elementos Zn, S y O.

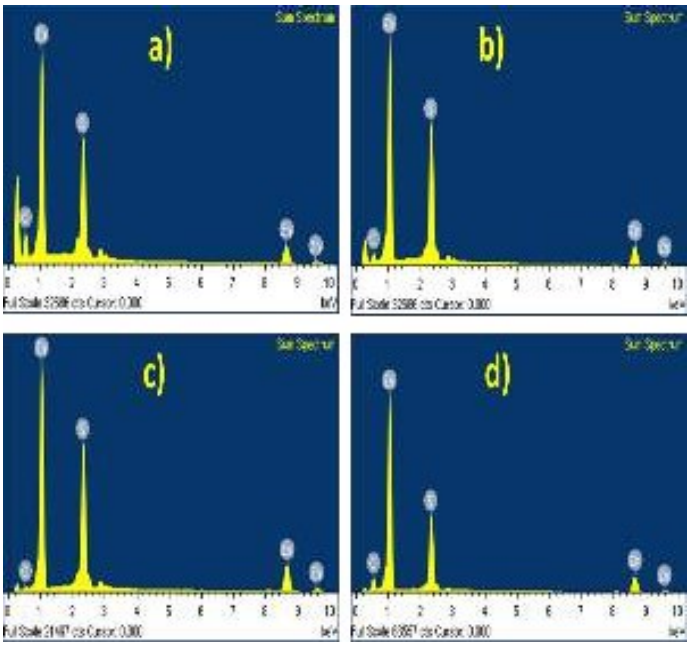


Figura 7 Espectros obtenidos por EDS de las muestras a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

La tabla 1 se generó a partir de los datos obtenidos en el análisis elemental, los valores se dan en porcentajes masa y atómico del Zn, S y O. La muestra S-60 contiene 39.33 % atómico de oxígeno, el valor alto puede deberse a la presencia de humedad en la muestra, ya que a la temperatura de secado de 60 °C, es posible que no se eliminó el exceso de agua. La presencia de oxígeno en las muestras T-300 y T-500 se asocia a la ligera oxidación de ZnS, produciendo ZnO. Finalmente, la muestra T-800 contiene 26.28 % de oxígeno atómico, el resultado es consistente con los comentado anteriormente en el análisis de DRX. En la muestra hay presencia de ZnO, producto de la oxidación de ZnS a temperatura alta.

Tabla 1 Composición elemental en % en masa y % atómico de las muestras;
a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

Muestra	**Elemento**					
	Zn		***S***		***O***	
	% ATM	% W	**% ATM**	% W	**% ATM**	% W
60°C	**33.24**	59.03	**27.42**	23.88	**39.33**	17.09
300°C	**41.85**	63.32	**40.71**	30.22	**17.44**	6.46
500°C	**46.05**	64.96	**47.36**	32.77	**6.58**	2.27
800°C	**45.61**	69.29	**28.1**	20.94	**26.28**	9.77

*W= %Masa *ATM=%Atómico

La Figura 8 muestra los mapeos EDS (energía dispersiva) de los elementos Zn, S y O de las muestras; a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800. Se puede observar una distribución uniforme del zinc en las zonas examinadas. El resultado sugiere que el Zn y S están presentes en las muestras, S-60, T-300 y T-500.

En el caso de la muestra T-800 se observa zonas con la presencia de azufre y ausencia de oxígeno y viceversa (Figura 8). Las muestras T-500 y T-800 contienen, además de Zn y S, oxigeno. Como se comentó anteriormente, la presencia de ZnO se debe a la oxidación del ZnS durante el tratamiento térmico a temperatura de 800 °C.

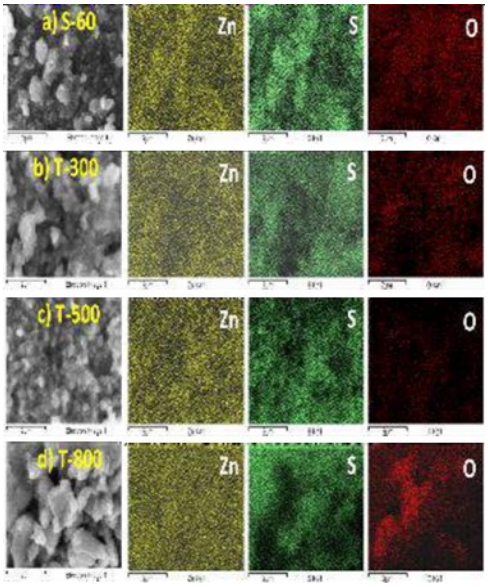


Figura 8 Mapeo EDS de los elementos Zn, S y O de las muestras a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800.

Evaluación de luminiscencia

El efecto fotoluminiscente se evaluó cualitativamente en cada muestra, se utilizó una cámara de visualización, que cuenta con luz natural y una lámpara de luz ultravioleta.

Las muestras; a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800 analizadas en la cámara con luz natural, presentaron los siguientes resultados (Figura 9): La muestra S-60 mostró una tonalidad blanca con tamaño de partículas relativamente homogénea a simple vista. La muestra T- 300 presenta una tonalidad café-dorado, esta característica resalta en comparación con las otras muestras, así como su apariencia en forma de gránulos. La muestra T-500 tiene una tonalidad blanca con partículas en forma de gránulos. Finalmente, la muestra T-800 presenta una tonalidad blanca-amarillenta con tendencia a ser verdosa, con partículas en forma granular.

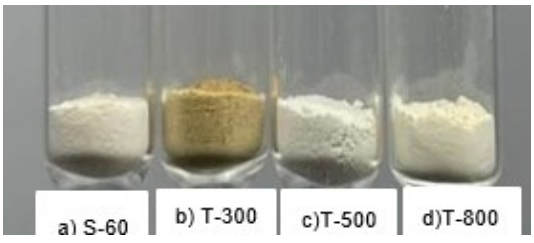


Figura 9 Fotografía de las muestras bajo lámpara de luz de día.

La figura 10 muestra las fotografías de las muestras; a) S-60, b) T-300, c) T-500 y d) T-800 observadas en la cámara con luz ultravioleta. En la muestra S-60 se aprecia un tono blanco y a la vez un tono morado opaco, el cual se le atribuye al reflejo de la luz UV. La muestra T-300 presenta

una tonalidad café-obscura sin mostrar ningún efecto con la luz UV. Mientras que la muestra T-500 presentó una tonalidad blanca. Al igual que la muestra S-60 se observa un ligero reflejo de la luz UV.
En la muestra T-800 se observa una tonalidad verde fosforescente muy intensa. Esta muestra presenta el fenómeno de fotoluminiscencia, relacionado con la presencia de las fases esfalerita y wurzita de ZnS y ZnO.

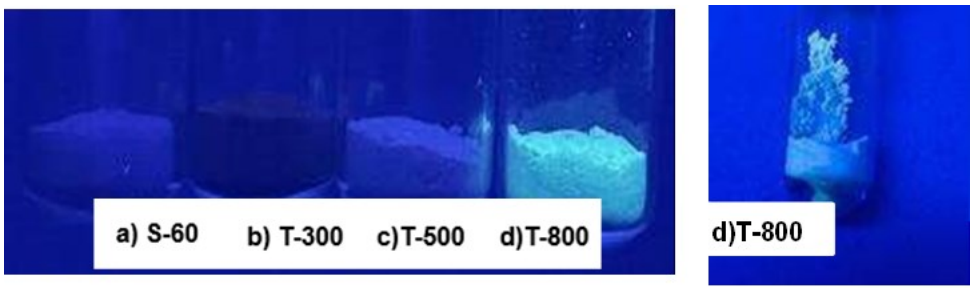


Figura 10 Fotografías de las muestras bajo lámpara de luz UV

CONCLUSIONES

El ZnS se obtuvo por el método de precipitación química a partir de disoluciones de $ZnSO_4$ y Na_2S con una relación molar de 1:2 bajo rigurosa y constante agitación a temperatura ambiente. El precipitado producido se secó a 60 °C y se sometió a un tratamiento térmico a diferentes temperaturas; 300 °C, 500 °C y 800 °C. Estas muestras fueron analizadas por los métodos de rayos X (DRX) y microscopia electrónica de barrido (MEB) para poder establecer el efecto de la temperatura sobre la formación de las fases cristalinas, morfología, tamaño de partícula y fenómeno de fotoluminiscencia.

Los resultados obtenidos con la técnica de difracción de rayos X muestran que bajo un tratamiento térmico a temperatura alta de 500 y 800 °C disminuye el tamaño de partícula. Los picos mostrados en el patrón de DRX corresponden a la estructura de wurzita y esfalerita tomando como referencia a la HS-Pristine. La muestra T-800 presentó, además de las estruturas wurzita y esfalerita del ZnS, una fase adicional correspondiente al ZnO con estructura cristalina hexagonal. El óxido de zinc es producto de la oxidación del sulfuro de zinc. Con base a este resultado, proponer un tratamiento térmico mayor a 800 °C, podría favorecer la formación de ZnO.

El patrón de DRX de las muestras S-60 y T-300 presenta picos en las posiciones en 2°θ en 27, 46.5 y 55, que corresponden a la estructura romboédrica del ZnS.

El fenómeno de fotoluminiscencia evaluado cualitativamente en este trabajo, se observó únicamente en la muestra T-800. Con base a la evidencia experimental, la fotoluminiscencia está relacionada con la coexistencia de dos fases en el ZnS (wurzita y esfalerita) y una tercera fase correspondiente a la estructura hexagonal del ZnO, al tamaño de partículas (nanómetros) y a su distribución uniforme en la muestra. Estas características son favorecidas por el tratamiento térmico a temperatura de 800 °C. El método de precipitación química para la síntesis de ZnS, cumple con el objetivo del trabajo, se obtuvieron partículas puras, a través de un método sencillo y de bajo costo.

BIBLIOGRAFÍA

1) D. A. Chávez, J. Frada, F. Luis, M. G. Cubillo, C. E. Rodríguez, “Comparación de materiales luminiscentes: inorgánicos vs orgánicos “,”, Tecnológico Nacional de México-CIIDET.T., Tlahuizcalli, 2019”, No. 14.
2). S. Arayanaswamy, “Synthesis of ZnS nanoparticles from pyridne adducts of zinc (II) dithiocarbamate”,” India, 2014”, pp. 7.
3) K. Cartwrigh, “Efectos piezoeléctricos estimulados ópticamente en las nanopartículas de ZnO sintetizadas electroquímicamente”, Semicond. Sci. Technol, 2006, pp. 717.
4) V. S. Ganesha Krishna, M. G. Mahesha, “ZnS and excellent material in photonics; A review based on Z-scan study” Physica B, 2022, pp. 41,36,28.
5) M. F. J. Gil, “Triboluminescence of new uranyl salts. Journal of Chemical”, 1978, pp.340.
6) B. R. Amrit Regmi, “Sinthesis, and microscopic study of zinc sulfide nanoparticles”, International Conferece on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp.2-4.
7) Z. Adam, S. Svitlana, K. Wiktor, B. Darius, M. P. Katarzyna, “Zinc sulphide (ZnS) nanoparticles for advanced application”, Technical transactions chemistry, China 10.4467/2353737XCT, 2016, pp. 16,53,15.
8) G. Ahmad, “Effect of calcination temperature on the structural and morphological properties of zinc sulphide”, Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, 2020, pp. 863.
9) D.A. Valdez Almirudis “Caracterización de tiempos de respuestas de un OLED” Tesis Universidad de Sonora 2008.
10) U. Caldiño García, “El LED blanco un verdadero hito en la historia de la tecnología de la iluminación”, Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa, 131, 2023.
11) J. C. A Huitron, “Obtención de películas delgadas de NiO: Li y su aplicación a diodos emisores de luz (LED’s) por la técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico” tesis doctoral, Instituto de investigaciones en materiales, 2023.

PRECIPITACIÓN DE CARBUROS EN UN ACERO RESISTENTE AL CALOR TRATADO TÉRMICAMENTE A 400 Y 500 °C

Omar Ali Flores López, Víctor Manuel López Hirata, Maribel Leticia Saucedo Muñoz, Karla Cristina Mora Barrera

Escuela Superior de Ingenieríqa Química e Industrias Extractiva, IPN
omar.floresa01@gmail.com, vlopezhi@prodigy.net.mx, msaucedom@ipn.mx, karlamoraba@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó la precipitación en un acero resistente al calor 0.1C-5Cr-0.5Mo después de ser sometido a dos tratamientos térmicos de envejecido. Este acero pasa por un proceso de normalizado y revenido y es utilizado en plantas de generación de energía formando parte de componentes de calentadores, intercambiadores de calor y tuberías de transporte de vapor. Los componentes están sometidos a temperaturas de entre 450 y 500 °C y se espera que duren en servicio más de 200 000 horas por lo que es importante estudiar la precipitación de los carburos en el acero. Se calcularon las fases en equilibrio presentes a diferentes temperaturas y su composición usando el programa de simulación numérica Thermo-Calc. Se determinó el diagrama TTP (Temperatura-Tiempo-Precipitación) obteniéndose la secuencia de precipitación del acero usando el módulo TC-Prisma. Los diagramas TTT (Temperatura-Tiempo-Transformación) y CCT (Diagramas de Enfriamiento Continuo) se calcularon usando el software J. Los tratamientos térmicos de envejecido se realizaron a 400 y 500 °C respectivamente durante 100, 500 y 1000 horas. Las muestras iniciales y tratadas se caracterizaron microestructuralmente por microscopía óptica y electrónica y se les midió la microdureza Vickers. La microestructura observada tanto en la muestra sin tratamiento como en las muestras tratadas fue de una matriz ferrítica, bainita y partículas de carburos. Esto concuerda con lo predicho por el diagrama CCT y TTT. La microdureza de las muestras tratadas no cambió significativamente respecto a la muestra inicial debido a que la distribución y tipo de carburos no cambió con el tiempo y temperatura del tratamiento. Se encontró que el carburo $M_{23}C_6$ es el principal precipitado presente en el acero, corroborando lo mostrado en el diagrama de equilibrio de fases y el diagrama TTP donde el carburo M_7C_3 transforma a $M_{23}C_6$.

INTRODUCCIÓN

Los aceros Cr-Mo pertenecientes a la familia de los aceros resistentes al calor son utilizados en la fabricación de tuberías para transporte de fluidos, piezas de calentadores, intercambiadores de calor, rotores o piezas de cubierta, teniendo temperaturas normales de operación en plantas de generación de energía de entre 450 y 600°C y presiones de entre 15-35 MPa. Estos componentes tienen un tiempo de vida estimado de más de 30 años (más de 250 000 h en servicio) con elongaciones menores al 2% a lo largo de su vida útil. [1-3].

La resistencia mecánica de los aceros ferríticos proviene principalmente de tres fuentes: a la presencia de carburos de Cr, Mo, Ti, W o Nb que obstaculizan el movimiento de dislocaciones, a la formación de bainita o martensita en la microestructura y al endurecimiento por solución sólida por la presencia de elementos de aleación como el W o el Mo [3].

Se han realizado varios estudios sobre la precipitación en estas aleaciones encontrándose la presencia de carburos del tipo M_2C, M_3C, $M_{23}C_6$, M_7C_3, M_6C, ε, Fe_3C, χ, así como fases intermetálicas. Los estudios han revelado que estas fases después de una larga exposición a temperaturas de entre 400 y 600°C tienden a disolverse y crecer en los límites de grano del material además de transformar al carburo de equilibrio $M_{23}C_6$, reduciendo en general su resistencia mecánica a alta temperatura [4-6].

Los programas de simulación numérica han probado ser muy útiles en el cálculo de propiedades, transformaciones y en el control de procesos ayudando a ahorrar recursos y tiempo. Estos

programas realizan cálculos basados en algoritmos utilizando bases de datos y las condiciones de trabajo para generar resultados. Uno de estos programas de simulación es Thermo-Calc que utiliza la metodología CALPHAD que parte de bases de datos para predecir propiedades termodinámicas, cinéticas y otras en sistemas multicomponente. Thermo-Calc trabaja a partir de módulos que contienen información y algoritmos específicos para determinar diferentes cosas. Uno de estos módulos es TC-Prisma, utilizado para modelar la cinética de precipitación en sistemas multicomponentes o multifásicos [7]. El programa de cómputo J Software trabaja en base a un modelo computacional llamado ANN (Artificial Neuronal Network por sus siglas en inglés) conocido también como redes neuronales que consiste en diversos elementos de procesamiento que reciben información de entrada (inputs) y entregan información de salida (outputs) basada en sus funciones de activación predefinidas. Es un modelo inspirado en la biología que se asemeja a cómo ocurre la actividad eléctrica del cerebro y el sistema nervioso. El programa usa este modelo para relacionar conceptos, propiedades y límites que aparentemente podrían no tener relación directa para entregar información relacionada con el material en cuestión como propiedades mecánicas, térmicas, de fatiga o termofluencia, así como generar diagramas termodinámicos [8].

TEORÍA

El creep o termofluencia es una condición de los materiales que se manifiesta como una deformación plástica progresiva de los componentes o piezas sometidos a cargas por debajo de su límite de cedencia. Desde el punto de vista de la seguridad, los componentes de acero para uso en aplicaciones ingenieriles expuestos a altas temperaturas y a cargas necesitan tener una alta resistencia a la termofluencia. Es por esto que los aceros resistentes al calor han atraído especial atención a los sectores científicos y tecnológicos desde hace décadas [9].

Los aceros resistentes al calor son muy importantes para el sector energético, particularmente para las plantas de generación de energía y la industria petrolera. Las plantas de energía están compuestas básicamente por un calentador y una turbina, **Figura 1**. En el calentador se quema un combustible (comúnmente carbón) que genera vapor a muy alta presión para después pasar a una turbina que transforma el movimiento en energía eléctrica, **Figura 2**.

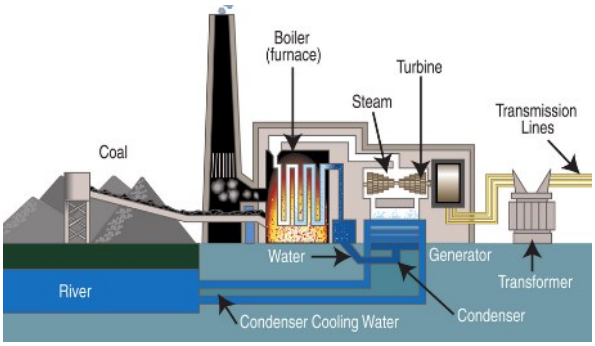


Figura 1. Partes de una planta de generación de energía a partir de vapor.

Figura 2. Turbina de vapor para generación de energía.

Los rangos de temperatura y presión de operación en las plantas de generación de energía han ido incrementando a lo largo de la historia con el objetivo de aumentar la eficiencia de generación de energía y reducir las emisiones de CO_2.

Las plantas en el pasado, entre 1955 y 1970, operaban en la condición subcrítica, temperatura máxima de operación de 538 °C y 16.6 MPa de presión, que causaba una eficiencia máxima del proceso del 39%. Bajo la condición supercrítica, temperatura máxima de operación de 560 °C y 24.1 MPa de presión, la eficiencia de generación de energía pudo incrementarse hasta un 41% en el periodo de 1970 a 1995. Cuando se trabaja en la condición ultra-supercrítica, temperatura máxima de operación de 600 °C y 25.1 MPa de presión, la eficiencia que se puede alcanzar es de hasta el 43%, siendo éstas las condiciones de operación desde 1995 hasta la fecha. Hasta el año 2020 el 50% de las plantas de generación de energía operaban en la condición ultra-supercrítica y el resto bajo condiciones subcríticas y supercríticas. El desarrollo tecnológico busca implementar la operación de plantas de alta eficiencia bajo condiciones ultra-supercríticas avanzadas con temperaturas de operación de 700 °C y 35 MPa que permitirían una eficiencia en el proceso de hasta el 47% en el futuro [10].

La eficiencia energética de las centrales termoeléctricas puede ser mejorada mediante la reducción del calor liberado por los gases de escape y minimizando las pérdidas durante la transferencia de calor. Estas pérdidas suelen ocurrir principalmente en los condensadores, usados para enfriar el vapor que sale de la turbina y del calentador. La reducción de las pérdidas de calor durante la transferencia puede lograrse mediante el incremento de la presión y temperatura de vapor. La capacidad de aumentar estos parámetros depende casi completamente de los materiales utilizados en la fabricación de los componentes en contacto con el agua y el vapor.

Hay una gran variedad de aceros resistentes al calor y hay varias formas de clasificarlos; de acuerdo con su contenido de elementos aleantes, por su microestructura o por la norma ASTM que los cubra. De acuerdo con su microestructura se pueden dividir en tres grandes grupos; ferríticos, austeníticos y martensíticos. Los aceros ferríticos/martensíticos son la base de los sistemas de transporte de vapor actuales, principalmente por ser relativamente baratos de producir y en general son reciclables. Los componentes ingenieriles que operan a menos de 570 °C son aceros principalmente CrMoV, NiCrMoV, además de aquellos que tienen menos del 5% de cromo [11].

Los grados de acero resistentes al calor de baja aleación normalmente reciben la clasificación de aceros ferríticos; sin embargo, estos grados rara vez contienen cantidades de ferrita (α). Se les llama así porque al enfriarse desde la temperatura de austenización transforman a una estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc), en donde también están incluidas las estructuras bainíticas [12]. Los aceros ferríticos poseen una alta conductividad térmica y un bajo coeficiente de expansión térmica. Para plantas de energía con controles de presión capaces de responder a cambios en la demanda de energía o plantas con ciclos de paro y marcha frecuentes, se prefiere usar aceros ferríticos para componentes de pared gruesa y reducir con esto los esfuerzos térmicos.

A temperaturas de operación de entre 500-620 °C, los aceros martensíticos resistentes al calor son una buena opción debido a su excelente resistencia a la termofluencia y su baja tendencia a sufrir fatiga térmica originada por su bajo coeficiente de expansión térmica. Sin embargo, si las temperaturas de operación exceden los 650 °C, los aceros martensíticos experimentan una degradación microestructural significativa [12,13], incluso algunos tipos de acero pueden comenzar su degradación microestructural alrededor de las 5000 horas [14]

Los aceros austeníticos resistentes al calor podrían ser de interés ya que poseen una alta resistencia a la termofluencia hasta temperaturas de 700 °C. Sin embargo, su coeficiente de expansión térmica y costo limitan su uso si se les compara con los aceros martensíticos.

Los aceros 5Cr-0.5Mo pertenece a los aceros del tipo ferríticos y son ampliamente utilizados en la industria petroquímica ya que tienen buena resistencia mecánica y son capaces de resistir la exposición a aceites y crudos que contienen sulfuro de hidrógeno y otros agentes corrosivos. Se encuentran en tuberías de transporte de agua, humo, tubos supercalentadores, tubos de precalentamiento de aire, piezas de calentadores, tubos en los intercambiadores de calor, tubos condensadores y para catalizadores.

Estos aceros se someten a un tratamiento térmico de austenizado en un rango de temperatura de entre 925 a 970 °C, seguido de un enfriamiento al aire o en el horno, para después revenirse en un rango de entre 650 a 700 °C [15].

PARTE EXPERIMENTAL

Se partió de una placa de acero resistente al calor 0.1C-5Cr-0.5Mo la cual fue cortada en muestras más pequeñas de 1 cm x 1 cm x 1 cm. Una de las muestras se seleccionó para servir como material inicial y se apartó del resto de muestras. Se dividieron las muestras restantes en dos grupos, el primero de ellos fue sometido a tratamiento térmico de envejecido a 400 °C y el otro grupo a 500 °C durante 100, 500 y 1000 horas respectivamente. Posterior a los tratamientos térmicos se caracterizaron las muestras mediante microscopía óptica, electrónica de barrido y electrónica de transmisión. Adicionalmente la muestra original se caracterizó mediante la técnica de difracción de rayos X. La metodología experimental antes descrita se resume en la **Figura 3**.

Además del trabajo experimental también se realizaron simulaciones utilizando programas de simulación numérica. Thermo-Calc se utilizó para calcular el diagrama de fases en equilibrio, TC-Prisma se usó para obtener el diagrama de Tiempo-Temperatura-Precipitación (TTP) y un programa de uso libre se usó para calcular los diagramas de Tiempo-Temperatura-Transformación (TTT) y el diagrama de enfriamiento continuo del acero. Las simulaciones se hicieron con el objetivo de comparar y validar lo observado experimentalmente con lo predicho por las simulaciones usando datos termodinámicos. La metodología numérica antes descrita se resume en la **Figura 4.**

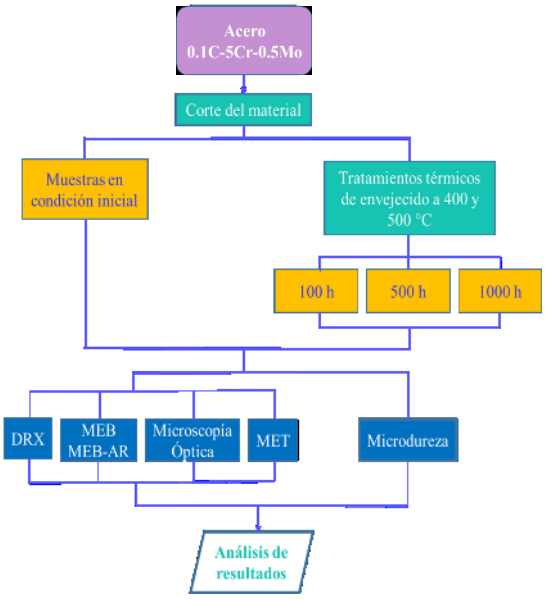


Figura 3. Diagrama de bloques de la metodología experimental seguida en este trabajo.

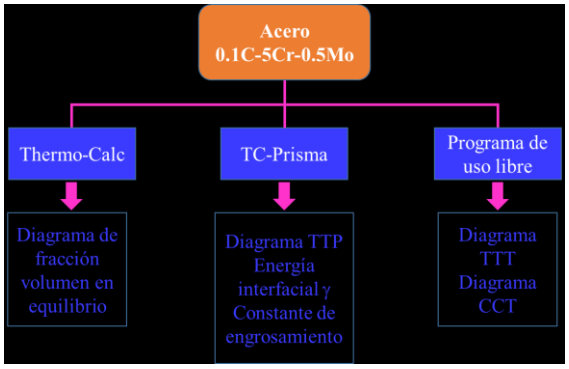


Figura 4. Diagrama de bloques de la metodología numérica seguida en este trabajo.

RESULTADOS

La Figura 5 muestra la gráfica de la fracción volumen de las fases en equilibrio en función de la temperatura. Aquí se puede observar que la fase en equilibrio, por arriba de los 1500 °C es el líquido. Conforme disminuye la temperatura se forma la ferrita delta y esta transforma a austenita por debajo de los 1500 °C y se mantiene en equilibrio hasta aproximadamente los 850 °C, a partir de esta temperatura se da la transformación a ferrita y precipita el carburo de equilibrio $M_{23}C_6$. Finalmente, alrededor de los 400°C, también se tiene la fase laves que no es fácil de distinguir.

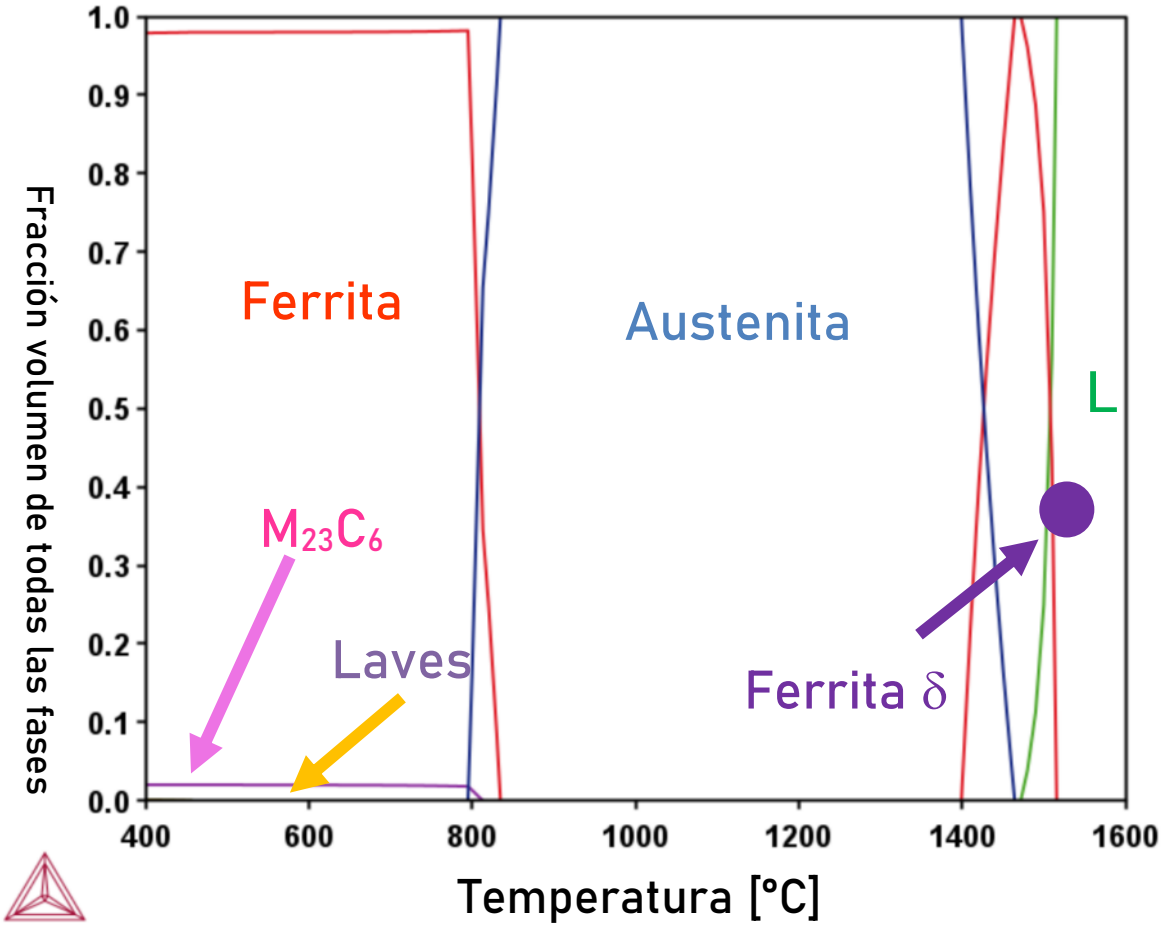


Figura 5. Diagrama de fracción volumen de todas las fases vs temperatura del acero ASTM A387 Grado 5 Clase 2.

La Figura 6 muestra el diagrama calculado de Tiempo-Temperatura-Precipitación en un rango de temperatura de 400 a 800 °C. El diagrama muestra la secuencia de precipitación intragranular del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo, según el cual el carburo M_7C_3 precipita primero, para después disolverse tras un corto periodo de tiempo y precipitar el carburo $M_{23}C_6$.

La secuencia de precipitación de carburos en el acero 0.1C-5Cr-0.5Mo según [16] podría ser de la forma presentada en la reacción (1).

$$\boldsymbol{\alpha \rightarrow \alpha + M_3C \rightarrow \alpha + M_7C_3 \rightarrow \alpha + M_{23}C_6} \quad \text{... (1)}$$

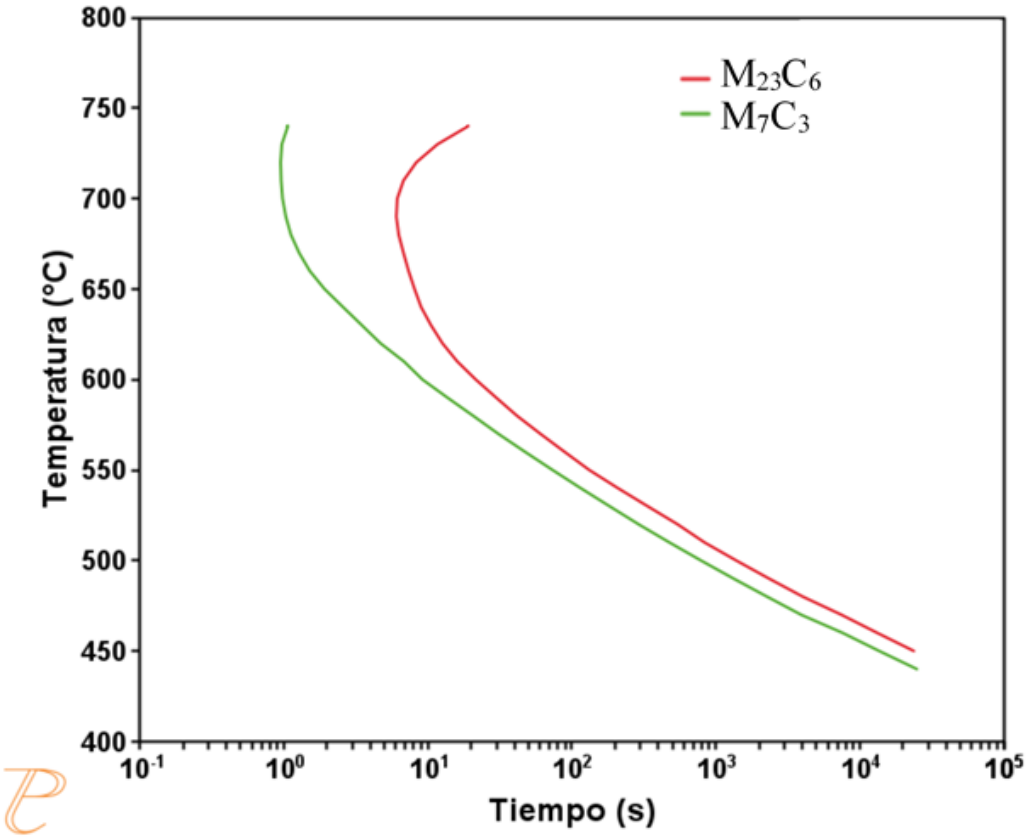


Figura 6. Diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo calculado con el programa TC-Prisma.

La Figura 7 (a-c) muestra las microestructuras obtenidas por microscopía óptica del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo en su estado inicial y su evolución después del envejecido. En la muestra inicial, Figura 7 (a), se observan con mayor detalle los granos de ferrita, la bainita y precipitados finos que se distribuyen uniformemente dentro los granos y en los límites de grano. Estos precipitados provienen del normalizado, posterior al revenido del acero. La mayoría de estos carburos se espera que sean del tipo $M_{23}C_6$, con presencia de M_7C_3, lo cual concuerda con los cálculos de TC-Prisma, Figura 6. El tamaño de grano inicial de la ferrita fue de 21 μm aproximadamente.

Después de 1000 horas de tratamiento térmico de envejecido a 500 °C, Figura 7 (c), el acero casi duplicó su tamaño de grano inicial, pasando de 21.05 μm a 40.5 μm; para el caso de las muestras sometidas a tratamiento térmico a 400 °C, Figura 7 (b), el efecto de crecimiento de grano fue menos marcado, pero aumentando casi 16 μm después de 1000 horas de envejecido. Los carburos sí parecen disminuir ligeramente después de 1000 h. En ambas temperaturas de tratamiento se tiene una ligera reducción en la cantidad de precipitados distribuidos en la matriz.

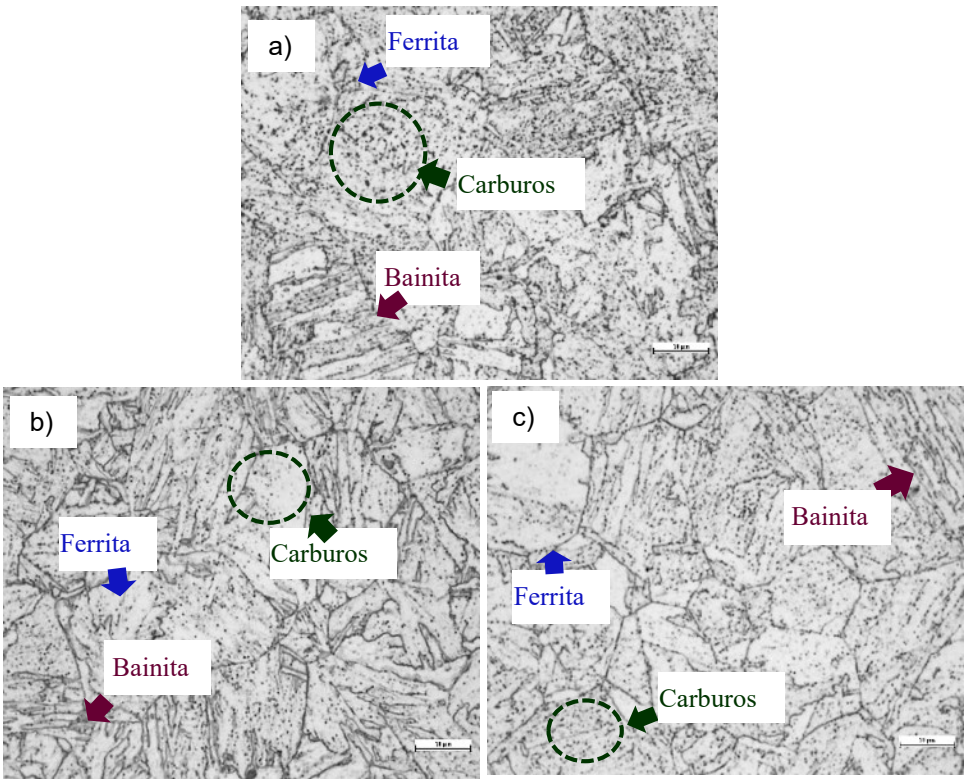


Figura 7. Diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo calculado con el programa TC-Prisma.

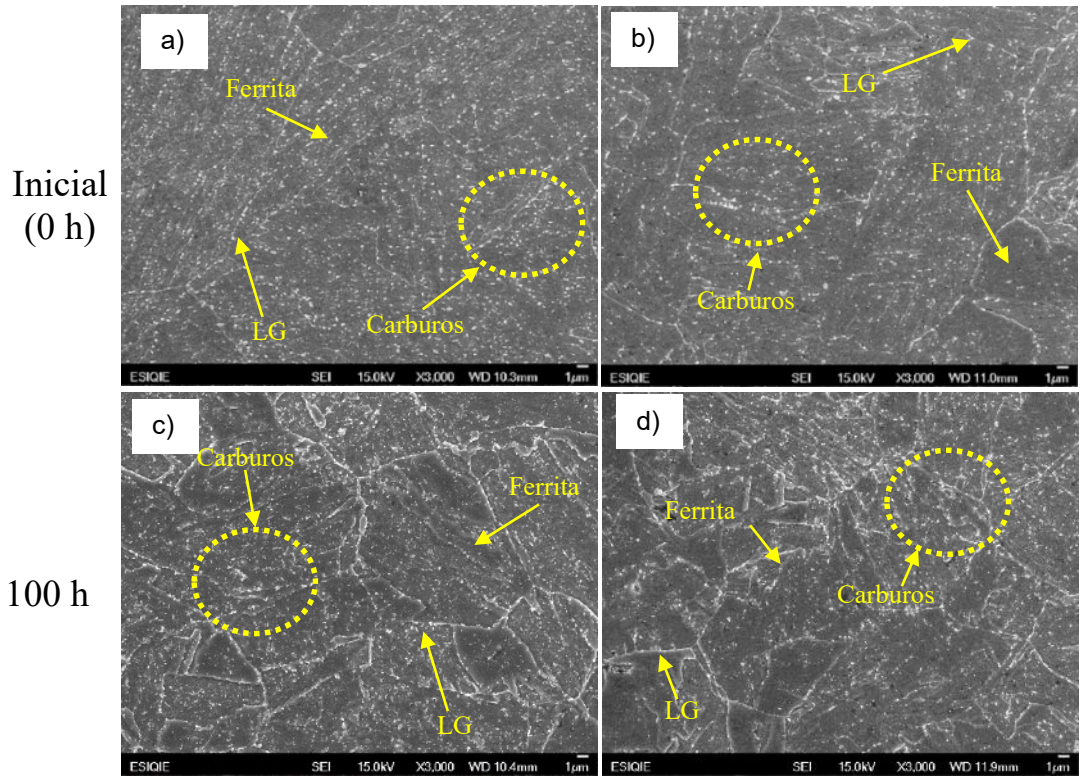
Con el objetivo de poder ver con mayor claridad la distribución, cantidad y forma de los precipitados presentes en el acero de estudio se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido de alta resolución. Las Figuras 8 (a-h) muestran las microestructuras de MEB del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo después de un envejecido a 400 °C y 500 °C durante 100, 500 y 1000 horas obtenidas por MEB-AR a 3000X.

En la micrografía del acero en estado inicial, Figura 8 (a) y (b), se observa la microestructura consiste en granos equiaxiales con la presencia de carburos muy finos en toda la matriz.

Para el caso de las muestras sometidas a envejecido durante 100 horas, Figura 8 (c) y (d), la microestructura no parece cambiar notablemente. Los carburos siguen estando presentes en todo el material y el tamaño de grano no parece tener una variación perceptible a simple vista. La morfología

de los carburos también parece cambiar pasando de partículas esféricas y rectangulares a solo rectangulares. El tamaño de los granos también parece aumentar ligeramente.

La Figura 8 muestra las microestructuras de MEB del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo después de un envejecido a 400 °C y 500 °C durante 100, 500 y 1000 horas obtenidas por MEB a 15 000X ya que los precipitados se observan con mucha mayor claridad. La disminución de los carburos parece ocurrir desde las 100 horas de tratamiento incluso a 400 °C, Figura 8 (c), pero parece ser más marcada a 500 °C, Figura 8 (d). La morfología de los carburos también parece cambiar de los observados en la muestra inicial, Figura 8 (a) y (b), teniendo precipitados más redondeados, a partículas más anguladas y rectangulares después de 1000 horas de envejecido, Figuras 8 (g) y (h), en contraste con las formas más redondeadas de los precipitados en el tiempo cero.



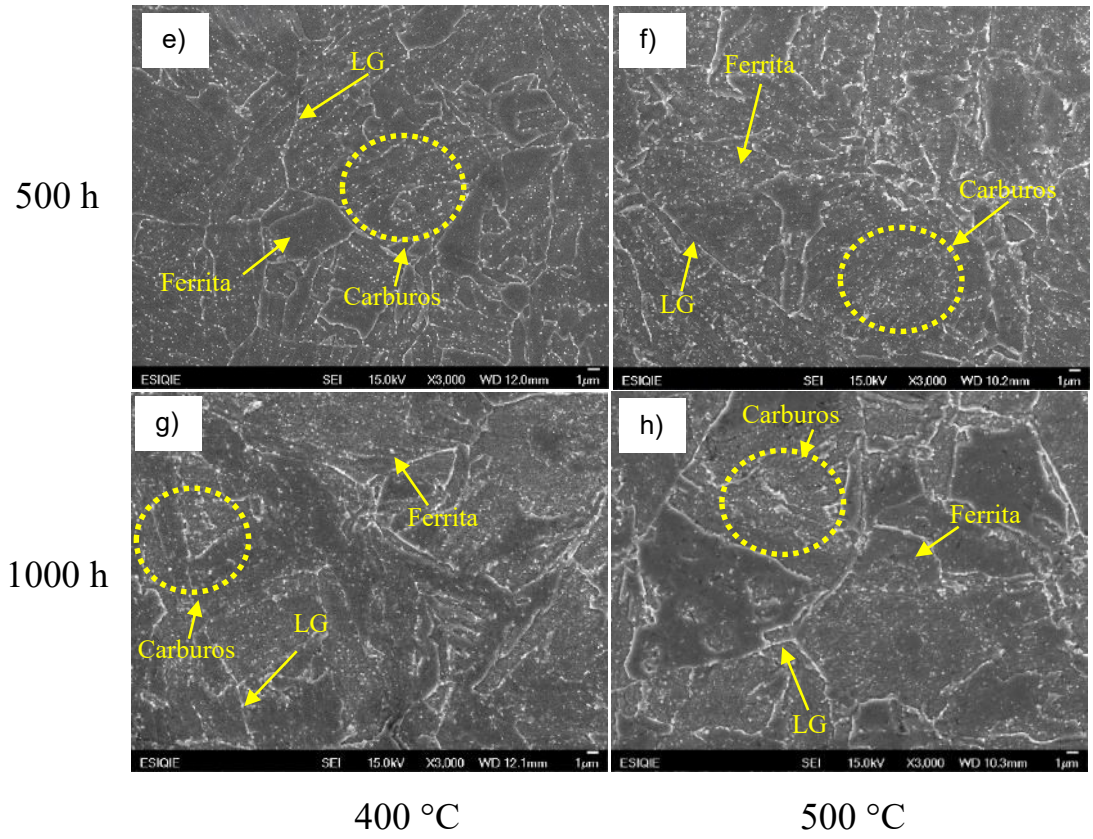


Figura 8. Micrografías a 3000X obtenidas con MEB-AR del acero 0.1C-5Cr-0.5Mo.

CONCLUSIONES

1. Los microconstituyentes presentes en el acero 0.1C-5Cr.0.5Mo en estado inicial consiste en ferrita, bainita y carburos ricos en molibdeno.

2. Los precipitados encontrados en el material son del tipo $M_{23}C_6$ y M_7C_3 según lo predicho por TC-Prisma.

3. La cantidad de carburos disminuyó después de 1000 horas de envejecido y este efecto es más marcado a 500 °C que a 400 °C.

4. El material no sufrió cambios microestructurales drásticos después de los tratamientos ya que la de temperatura de trabajo del material industrialmente es de máximo 565 °C.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hu, Z.-F. (2012). “Heat-Resistant Steels: Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants”. InTech, páginas 195-226.
2. Bhadeshia, H. K. D. H., Strang, A. & Gooch, D. J. (1998). “Ferritic power plant steels: remanent life assessment and approach to equilibrium”, International Materials Reviews, Vol. 43, No. 2, páginas 45-69.
3. Abe, F., Torsten-Ulf, K. & Viswanathan, R. (2008). “Creep-resistant Steels”, CRC Press, páginas 539-546.
4. Yagi, K., Merckling, G. & Kern, T.-U. (2004). “Landolt-Börnstein New Series VIII/2B: Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys”. Springer, páginas 87-89.
5. Hilkes, J. & Gross, V. (2013). “Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications - past, present and future”. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa No. 2, páginas 12-22.
6. Wang, M., Chiu, Y., Jones, I., Rowlands, N., Holland, J., Zhang, Z. & Flahaut, D. (2014). “Microstructural characterization and microanalysis of creep resistant steels”. Journal of Physics: Conference Series, Vol. (522), No. 1, páginas 012034.
7. Thermo-Calc software (2023). **“**Thermo-Calc: Thermodynamic Software” [recuperado el día 24 de abril de 2023]. URL: *https://thermocalc.com/products/thermo-calc/*.
8. Walczak, S. & Cerpa, N. (2003). Artificial Neural Networks en R. A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of Physical Science and Technology (3ª ed., páginas 631-645). Academic Press.
9. Yagi, K., Abe, F. & Banerjee, M. K. (2018). “Creep-Resistant Steels”. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering”. Elsevier, páginas 1840-1845.
10. H. K. D. H. Bhadeshia (2000). “Design of Ferritic Creep-resistant Steels”. ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 6, página 626.
11. Hawk, J.A. & Jablonski, P.D. (2017). “Heat Resistant 9% Cr Steels: Microstructural Stability & Creep Analysis”. U.S. Department of Energy: National Energy Technology Laboratory, página 6.
12. Robertson, D. G. (2014). “4-Traditional low alloy steels in power plant design” en Shibli, A. (Ed.), “Coal Power Plant Materials and Life Assessment”, Woodhead Publishing, página 108.
13. Masuyama, F. (2001). “History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels”. ISIJ International, Vol. (41), No. 6, páginas 612–625.
14. Lu, Q., Toda, Y., Harada, N., Xu, W. & van der Zwaag, S. (2015). “The impact of intended service temperature on the optimal composition of Laves and M23C6 precipitate strengthened ferritic creep resistant steels”. Computational Materials Science, Vol. (107), páginas 110-115.
15. Zimina, L.N. (1972). “Niobium in heat resistant steels and alloys”. Met Sci Heat Treat 14, páginas 896–902.
16. Abe, F. (2022). “Creep of Power Plant Steels“. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Elsevier, páginas 485-493.

DEGRADACIÓN DEL COLORANTE NARANJA DE METILO EN SOLUCIÓN ACUOSA APLICANDO PROCESOS HETEROGÉNEOS Y HOMOGENEOS DE OXIDACIÓN

Bethsabet Jaramillo Sierra[1], Antonio Mercado Cabrera[2], Mario Ibañez Olvera[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-La Marquesa km 22, Santiago Tianguistenco, Estado de México, C.P. 52650, México, [2]Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México-Toluca S/N, Ocoyoacac, Estado de México C.P. 52750, México.

bethsabet.jaramillo@test.edu.mx

RESUMEN

Los contaminantes emergentes son aquellos que se encuentran a bajas concentraciones en los cuerpos de agua, su vertido y disposición final no está regulado, no obstante, se ha demostrado que son bioacumulables afectando adversamente a los seres vivos. Entre los contaminantes emergentes más importantes son destacados los fertilizantes, productos de higiene personal, fármacos y colorantes, siendo este último el objeto de estudio de esta investigación, específicamente el naranja de metilo, el cual es utilizado en la industria textil y química, encontrándose en efluentes de desecho por lo que requiere un tratamiento para su remoción, sin embargo, se ha comprobado que los métodos convencionales de tratamiento no son totalmente efectivos, por esa razón es de importancia la aplicación de métodos alternativos, como lo son los Procesos de Oxidación Avanzada (*AOPs*), los cuales se llevan a cabo a temperatura y presión ambiente, generando especies químicas activas principalmente radicales OH, logrando la mineralización de los contaminantes. En esta investigación se utilizaron procesos homogéneos (H_2O_2, O_3, H_2O_2/O_3) y heterogéneos (H_2O_2/UV, O_3/UV, H_2O_2/O_3/UV) para la oxidación de naranja de metilo; el reactor de tratamiento utilizado fue de recirculación con una configuración cilíndrica de acero inoxidable, de 30 cm de longitud y un diámetro de 5 cm, en la parte central se encuentra una lámpara ultravioleta que emiten a una longitud de onda de 254 nm, la cual está dentro de un tubo de cuarzo; la solución es recolectada en un depósito donde es impulsada al interior del reactor mediante una bomba sumergible. Para la generación del ozono se utilizó un generador comercial que utiliza aire atmosférico. El ozono fue suministrado en forma de micro burbujas al interior del depósito para garantizar un mayor contacto con la solución. La concentración inicial del contaminante fue de 30 mg/L, en un volumen de 500 mL y un tiempo de tratamiento de 60 minutos. La caracterización de las muestras se efectuó utilizando un espectrómetro UV-visible VE-5100UV. Se obtuvieron eficiencias de hasta 99% cuando fue utilizado UV/O_3. Los resultados son atribuidos a diversos mecanismos químicos de los agentes oxidantes que conllevan a la generación de radicales hidroxilo (OH) caracterizados por tener un alto potencial de oxidación.

INTRODUCCIÓN

Los colorantes son ampliamente utilizando en los diversos procesos de la transformación de la materia, estos pueden ser de origen natural o sintético, son utilizados en la industria textil, cosmética, alimenticia y médica, por lo que es inevitable su presencia en los cuerpos de agua, contribuyendo a la problemática de la contaminación. Se caracterizan por poseer estructuras moleculares complejas con diversos grupos funcionales, son xenobióticos, recalcitrantes y bioacumulables, por tanto, son resistentes a los métodos de tratamiento convencionales, es decir, aun después de pasar por el tren de tratamiento pueden estar presentes en los efluentes [1-2].

El naranja de metilo es un colorante orgánico azoico que posee enlaces –N=N- que unen anillos aromáticos, también puede contener grupos ácido sinfónicos, es utilizado en el sector industrial y como un indicados ácido-base. Al ingresar a los cuerpos de agua es considerado un contaminante emergente, dañando adversamente a los seres vivos ya que es tóxico, mutagénico, carcinogénico e induce la eutrofización de los cuerpos de agua [3-4]. Debido a sus efectos, es de importancia su

tratamiento antes de ser vertido a los diversos sistemas de alcantarillado, además considerando la efectividad de los métodos de tratamiento convencionales, es importante la implementación de tecnologías alternativas que conlleven a la obtención de altas eficiencias y que estas sean de fácil operación.

Los Procesos de Oxidación Avanzada (*AOPs*, por sus siglas en ingles), son una alternativa de tratamiento, caracterizados por la generación de especies químicas activas, principalmente radicales hidroxilo (OH). Los *AOPs* utilizan agentes oxidantes y/o catalizadores, también emplean fuentes luminosas con el objetivo de acelerar los procesos químicos deseados ya sea de emisiones naturales (radiación solar) o artificiales (lámparas que emiten en la longitud ultravioleta), estos pueden ser clasificados en (a) procesos homogéneos como H_2O_2, O_3 y su combinación; (b) heterogéneos los cuales emplean radiación ultravioleta (UV), y catalizadores sólidos como el TiO_2, Fe_3O_4, Al-ZnO, $FeNbO_4$, α-Fe_2O_3 por mencionar algunos [5-9].

Estos métodos presentan diversas ventajas entre las cuales pueden ser destacada: su operación a temperatura y presión ambiente, son de fácil operación, la generación de las especies químicas son *in situ,* lo que garantiza la interrelación con el contaminante y favorecer el mecanismo cinético deseado, después del tratamiento no son generados lodos, por lo que no requiere un tratamiento posterior, la efectividad de la degradación que se alcanza el elevada e incluso puede lograrse la mineralización, por lo que a altos niveles de oxidación no son generados subproductos tóxicos [1-6].

Los *AOPs* han sido utilizados y validados para el tratamiento de diversos contaminantes en agua, sin embargo, la importancia actual es su optimización, para la obtención de altas eficiencias con sistemas simples, reduciendo el tiempo de tratamiento. En esta investigación se evaluaron diversos Procesos de Oxidación Avanzada para determinar el efecto de los parámetros experimentales como el agente utilizado, tiempo de tratamiento, variación de color y determinación de CO_2, con el objetivo de determinar las mejores eficiencias relativas a la eficiencia de degradación.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 1 se observa el dispositivo experimental utilizado, el cual está constituido por (1) un reactor de tratamiento de configuración cilíndrica de acero inoxidable con una longitud de 30 cm y diámetro de 5 cm, en la parte central tiene una lámpara de 25 W que emite en el espectro ultravioleta de 25 cm de longitud la cual está protegida por un tubo de cuarzo, (2) un generador de ozono, el cual fue inyectado en el (3) depósito de la solución mediante un difusor para garantizar un mayor contacto con la solución, (4) un espectrómetro UV-visible para la caracterización de las muestras y (5) un medidor multiparametros.

Se realizaron soluciones sintéticas de naranja de metilo grado analítico con una concentración inicial de 30 mg/L en un volumen inicial de 500 mL. La solución se ingresó por la parte superior del reactor y fue recolectada en el depósito donde es recirculada utilizando una bomba sumergible. Cuando fue utilizado ozono, este se inyectó generando microburbujas en el depósito de la solución utilizando un difusor. Cuando se empleó peróxido de hidrógeno, se adicionó directamente en el depósito con un volumen inicial de 2 mL. El tiempo de tratamiento fue de 60 minutos, analizando el líquido residual antes de su tratamiento y cada 10 minutos utilizando un espectrómetro UV-Visible. Previamente, se determinó la máxima longitud de onda del contaminante, identificando una λ=466 nm y fue efectuada una curva de calibración a concentraciones conocidas, con el objetivo de determinar la concentración.

Al final del tratamiento se realizó la medición del color utilizando colorímetro *HI-727 de Hanna Instruments*, así mismo, se determinó la presencia de CO_2 soluble utilizando un *kit HI-3818 de Hanna Instruments.*

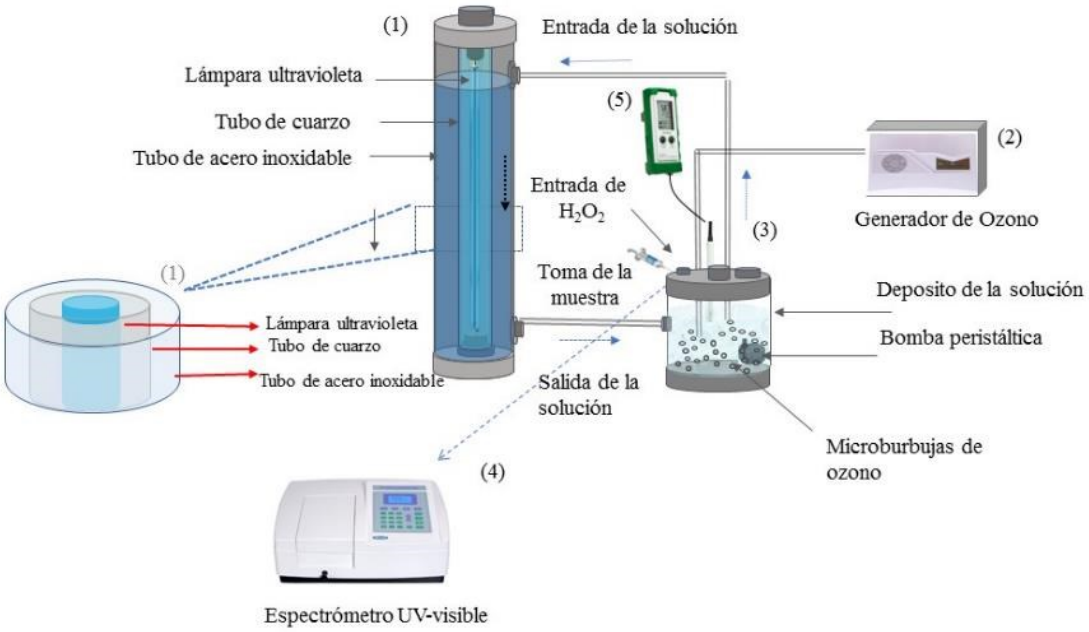


Figura 1. Dispositivo experimental

RESULTADOS

APLICACIÓN DE MÉTODOS HOMOGÉNEOS DE OXIDACIÓN

En la figura 2 se observan los resultados obtenidos de la degradación de naranja de metilo utilizando métodos homogéneos de oxidación específicamente: 2 mL de H_2O_2, O_3, y 2 mL de H_2O_2/O_3.

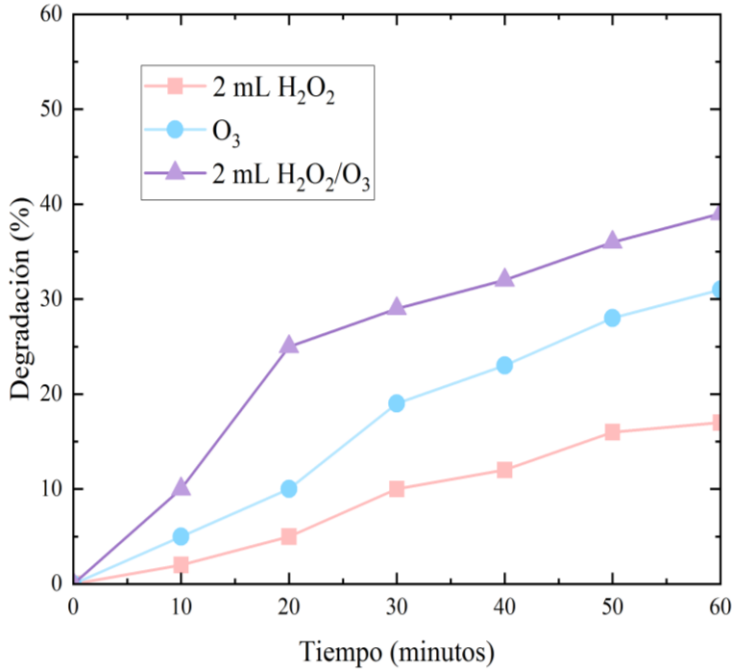


Figura 2. Resultados de la degradación de naranja de metilo aplicando procesos homogéneos de oxidación.

En la figura 2 se observa para todos los casos de estudios un incremento en el tiempo de tratamiento tiene un efecto positivo en la obtención de mejores eficiencias. Para el tratamiento únicamente con 2 mL de H_2O_2 se obtuvieron eficiencias de hasta 17% después de 60 minutos, esto es atribuido principalmente a la disociación del agente químico, generando radicales OH los cuales colisionan con el contaminante llevando a cabo su degradación, este mecanismo se efectúa mediante la reacción 1 [10].

$$H_2O_2 \rightarrow OH + HO \qquad \text{(reacción 1)}$$

Para el caso específico del O_3 se obtuvieron eficiencias de degradación de hasta 31%, el ozono se caracteriza por ser un agente oxidante fuerte, no obstante, es selectivo lo que contribuye directamente a la efectividad del proceso dependiente de las propiedades químicas del contaminante. El mecanismo cinético de oxidación se lleva acabo cuando el O_3 colisiona directamente con el analito de estudio (reacción 2) o mediante su disociación generando radicales OH y otras especies químicas que también poseen un poder de oxidación y por tanto promueven el proceso oxidativo (reacciones 3-5) [11-13].

$$O_3 + \text{naranja de metilo} \rightarrow \text{Productos} \qquad \text{(reacción 2)}$$
$$O_3 + H_2O \rightarrow OH + OH + O_2 \qquad \text{(reacción 3)}$$
$$O_3 + H_2O \rightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad \text{(reacción 4)}$$
$$OH + \text{naranja de metilo} \rightarrow \text{Productos} \qquad \text{(reacción 5)}$$

Por otra parte en la figura 2 también se observa el efecto sinérgico de ambos agentes oxidante, en donde se incrementó la eficiencia de degradación en comparación a los resultados presentados con anterioridad, ya que se obtuvieron eficiencias de hasta 39%. Para el método combinado de H_2O_2/O_3, además de llevarse a cabo los mecanismos cinéticos de las reacciones 1-5 es posible la generación de una mayor cantidad de radicales OH (reacciones 6-7) [11-13], lo que favorece el proceso de degradación.

$$H_2O_2 + O_3 \rightarrow OH + HO_2 + O_2 \qquad \text{(reacción 6)}$$
$$O_3 + HO_2 \rightarrow OH + O_2 + O_2 \qquad \text{(reacción 7)}$$

APLICACIÓN DE MÉTODOS HETEROGÉNEOS DE OXIDACIÓN

En la figura 3 se observan los resultados de la degradación del colorante naranja de metilo utilizando métodos heterogéneos. Al igual que la figura 2 se obtuvieron mejores resultados cuando se incrementó el tiempo de tratamiento, este mismo efecto se observó al adicionar la emisión de radiación UV, la cual promueve la disociación de especies químicas, en este caso la formación de radicales OH. Se obtuvieron eficiencias de hasta 51% para el método de 2 mL de H_2O_2/UV después de 60 minutos de tratamiento, en donde se promovió la generación de las especies químicas principalmente mediante la reacción 8. Por otra parte, para el método de UV/O_3 se obtuvieron altas eficiencias de degradación (99%), la presencia de radiación UV conlleva por una parte la fotólisis del agua (reacción 9) y también acelera la disociación del O_3 para la formación de una mayor cantidad de radicales OH (reacciones 10-11) [11-13] y por tanto se beneficia el proceso de degradación.

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow OH + OH \qquad \text{(reacción 8)}$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow OH + H \qquad \text{(reacción 9)}$$
$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O \qquad \text{(reacción 10)}$$
$$H + O_2 + O \rightarrow OH + O_2 \qquad \text{(reacción 11)}$$

Se observa en la figura 3 que para el caso de UV/H_2O_2/O_3 se obtuvieron eficiencias de hasta 92% lo cual representa una disminución en comparación con el caso de estudio anterior (UV/O_3), se ha demostrado que la combinación de diversos agentes y fuentes de energía pueden potencializar la generación de radicales OH y por tanto favorecer la degradación de los contaminantes, no obstante, también se ha determinado que la generación excesiva de estos, conlleva a procesos cinéticos que

contribuyen negativamente al proceso, esto debido a que al existir una mayor cantidad de radicales OH y por sus características no selectivas, colisionan entre sí, promoviendo la generación de nuevas especies y afectando el proceso de degradación, esto es efectuado principalmente por las reacciones 12 y 13 [11-13].

$$OH + OH \rightarrow H_2O_2 \quad \text{(reacción 12)}$$
$$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O \quad \text{(reacción 13)}$$

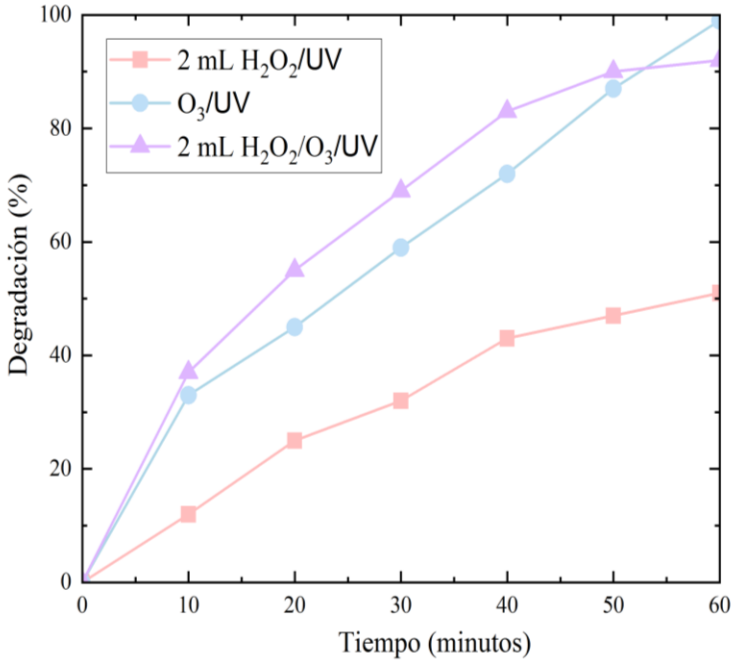


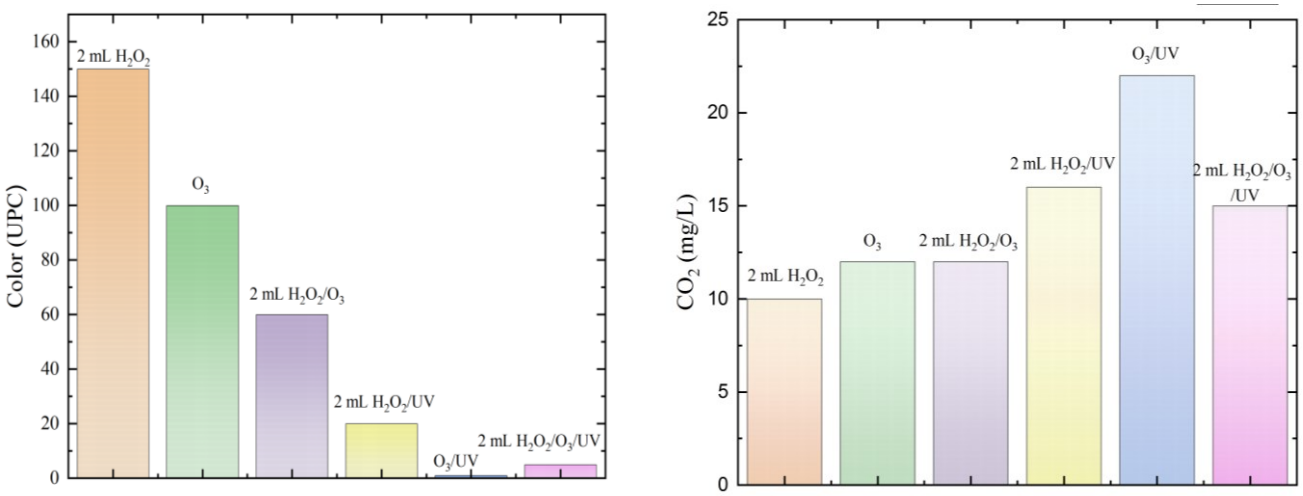
Figura 3. Resultados de la degradación de naranja de metilo aplicando procesos heterogéneos de oxidación.

ANÁLISIS DEL EFLUENTE AL FINAL DEL TRATAMIENTO

En la figura 4 se observan los resultados obtenidos del análisis del líquido residual para (a) medición de color y (b) determinación del CO_2 disuelto. Es importante mencionar que los parámetros iniciales fueron de 500 UPC y 0 mg/L para el color y CO_2 respectivamente. Se observa en la figura (a) que la disminución del color fue en diversos niveles desde 70% para el método de 2 H_2O_2 al 100% cuando fue empleado O_3/UV, lo que indica que el grupo cromóforo (–N=N-) fue disociado de la molécula principal atribuido a la colisión con los radicales OH formados indirectamente al utilizar los diversos agentes oxidantes, así mismo se observa que cuando se emplearon métodos heterogéneos la disminución fue mayor en todos los casos con relación a los métodos homogéneos, esto debido a la implementación de la radiación UV que como se ha mencionado con anterioridad promueve los procesos químicos deseables que contribuyen a la oxidación del naranja de metilo.

Por otra parte, se identificó la generación de CO_2 en el líquido residual (figura 4b), obteniendo una máxima generación para el método de O_3/UV con 22 mg/L. Los Procesos de Oxidación Avanzada se caracterizan por alcanzar la mineralización de los contaminantes de estudio, es decir, la generación de H_2O y CO_2, por lo que al ser identificado este último puede establecerse que un porcentaje del naranja de metilo alcanzo su máxima degradación, por otra parte, se observa que para algunos casos de estudio la concentración de CO_2 es similar, por ejemplo para 2 mLH_2O_2/O_3 y O_3 (12 mg/L), sin embargo, las eficiencias de degradación y decoloración son diferentes, esto es atribuido a que son generados subproductos de la oxidación los cuales también son degradados hasta llegar a la formación de compuestos químicos simples, no obstante, el mecanismo cinético se

efectúa en diversos niveles, algunos autores han establecido que la degradación del naranja de metilo inicia con la disociación del grupo cromóforo, posteriormente, se forman compuestos con anillo bencénicos, los cuales son fraccionados generando ácidos carboxílicos simples, finalizando con la formación de H_2O y CO_2.



(a) Medición de color al final del tratamiento (b) Determinación de CO_2 al final del tratamiento

Figura 4. Análisis del efluente final

En la tabla 1 se observa la energía eléctrica por orden de magnitud (E_{EO}) representando la energía necesaria para degradar un litro de solución con el contaminante, la cual se determinó con la ecuación 1.

$$E_{EO} = \frac{P_{elec}\, x\, t}{V \text{ x } \log(C_0/C_t)} \qquad \text{(ecuación 1)}$$

Donde P_{elec} es la potencia eléctrica total suministrada, la cual depende del método utilizado, *t* es el tiempo de tratamiento el volumen, C_0 la concentración inicial del naranja de metilo y C_t la concentración del contaminante en un tiempo t.

En la tabla 1 se observa que la energía eléctrica consumida para el *AOPs* con mayor degradación obtenida en este trabajo es menor en comparación a los otros métodos utilizados a excepción de 2 mL de H_2O_2/O_3, por lo que representa una alternativa viable para la mitigación de la contaminación del agua ocasionada por el colorante naranja de metilo.

Tabla 1. Energía eléctrica por orden de magnitud (E_{EO}) para los diversos *AOPs* aplicados

***AOPs* aplicado**	***P_{elec}(KW)***	***t (horas)***	***V(L)***	***C_o (mg/L)***	***C (mg/L)***	***E_{EO} (KWh/L)***
2 mL de H_2O_2	0.0035	1	0.5	30	24.9	0.0865
O_3	0.012	1	0.5	30	20.7	0.1489
2 mL de H_2O_2 /O_3	0.0155	1	0.5	30	18.3	0.0144
2 mL de H_2O_2 /UV	0.0285	1	0.5	30	14.7	0.1839
O_3/UV	0.0405	1	0.5	30	0.3	0.0405

2 mL de H_2O_2 /O_3/UV	0.0405	1	0.5	30	2.4	0.0738

CONCLUSIONES

Los *AOPs* son una alternativa para el tratamiento del naranja de metilo en agua, mediante la evaluación de diversos agentes oxidantes y fuente de energía (lámpara que emite en el UV), se determinó una mayor eficiencia de degradación para los métodos heterogéneos ya que se llevan a cabo diversos mecanismos cinéticos que promueven la generación de radicales OH, obteniendo eficiencias de hasta el 99% para el caso de O_3/UV. Se observó una disminución del color entre el 70% al 100% al finalizar el tratamiento y se identificó la generación de CO_2, lo que indica que se alcanzaron diversos niveles de oxidación atribuidos a la formación de subproductos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, por el soporte económico para el desarrollo de la investigación a través de la convocatoria Proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación (20241.24-PD). También se expresa un agradecimiento especial a E. S. Montes y M. J. por el apoyo otorgado.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. Akter, S. Islam, “Effect of additional Fe^{2+} salt on electrocoagulation process for the degradation of methyl orange dye: An optimization and kinetic study”, Heliyon, Vol. 8, 2022, pp. e10176T.
2. R. T. Doumbi, G. B. Noumi, Domga, “Dip coating deposition of manganese oxide nanoparticles on graphite by sol gel technique for the indirect electrochemical oxidation of methyl orange dye: Parameter’s optimization using box-behnken design” Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Vol. 3, 2021, pp. 100068.
3. P. Sriprom, W. Krobthong, P. Assawasaengrat, “Investigation of important parameters for Photo-Fenton degradation of methyl orange over Fe/TiO2 catalyst”, Energy Reports, Vol. 6, 2020, pp. 731–736.
4. R. Al-Mamun, Z. I. Rokon, A. Rahim, I. Hossain, S. Islam, R. Ali, S. Bacchu, H. Waizumi , T. Komeda, Z. H. Khan, “Enhanced photocatalytic activity of Cu and Ni-doped ZnO nanostructures: A comparative study of methyl orange dye degradation in aqueous solution”, Heliyon, Vol. 9, 2023, pp. e16506.
5. M. Sun, Y. Zhao, H. Ge.” Electrocatalytic Degradation of Methyl Orange using NanoFe_3O_4 Supported on Conductive Carbon Black as Particle Electrode”, Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 17, 2022, pp. 1-20.
6. E. H. Khader, S. A. Muslim, N. M. C. Saady, N. S. Ali, I. K. Salih, T. J. Mohammed, Talib M. Albayati, Sohrab Zendehboudi, “Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review”, Desalination and Water Treatment, Vol. 318, 2024, pp. 100384.
7. P. Peerakiatkhajohn, T. Butburee, J. Sul, S. Thaweesak, J. Yun, “Efficient and Rapid Photocatalytic Degradation of Methyl Orange Dye Using Al/ZnO Nanoparticles”, Nanomaterials, Vol. 11, pp. 20211059.
8. H. Bayahia, “Schinus molle extract mediated green synthesis of iron niobate photocatalyst for the degradation of methyl orange dye under visible light”, Journal of Saudi Chemical Society, Vol. 28, 2024, pp. 101876.
9. R. K. Shah, “Efficient photocatalytic degradation of methyl orange dye using facilely synthesized a-Fe_2O_3 nanoparticles”, Arabian Journal of Chemistry, Vol. 16, 2023, pp. 104444.
10. A. L. G. Costa, J. A. Casas, “Intensification strategies for thermal H_2O_2-based advanced oxidation processes: Current trends and future perspectives”, Chemical Engineering Journal Advances, Vol. 9, 2022, pp. 100228.

11. X. Chen, H. Rong, P. Ndagijimana, F. Nkinahamira, A. Kumar, D. Guo, B. Cui, “Towards removal of PPCPs by advanced oxidation processes: A review”, Results in Engineering, Vol. 20, 2023, pp. 101496.
12. E. C. Okpara, O. B. Wojuola, T. W. Quadri, C. E. Banks, “An overview of advanced oxidation processes using copper-based catalytic degradation of organic pollutants in wáter”, Applied Materials Today, Vol. 36, 2024, pp. 102053.
13. P. Kumari, A. Kumar, “ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant”, Results in Surfaces and Interfaces, Vol. 11, 2023, pp. 100122.

BIOGÁS: SUBPRODUCTO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE

Adriana Flores Ramírez[1], Yajaira Concha Sánchez[1,2], Julio César Orantes Ávalos[1]

[1]Posgrado de Ingeniería Civil, UMSNH, [2]Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
yajaira.concha@umich.mx

RESUMEN

Ante el crecimiento de la población y del desarrollo socio económico del país, las actividades de suministro de agua potable, alcantarillado sanitario y tratamiento de las aguas residuales para su reutilización adquieren cada día mayor importancia[1]. Al dar tratamiento a las aguas residuales se generan subproductos, uno de ellos es el biogás que se genera mediante la digestión anaerobia de la materia orgánica que se puede aprovechar en manera de calor o energía eléctrica. Su aprovechamiento también representa beneficios medio ambientales[2] como: reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la combustión del biogás emite una cantidad mínima de contaminantes atmosféricos comparado con los combustibles fósiles mejorando la calidad del aire. Este trabajo tiene como finalidad demostrar el potencial del biogás como un elemento para la generación de energía renovable a partir de su obtención mediante el tratamiento de las aguas residuales con sistemas de digestión anaerobia. Se analiza el proceso de producción de biogás, su composición y los beneficios ambientales y económicos de su aprovechamiento. El estudio se centra en la implementación y optimización de tecnologías de digestión anaeróbica en plantas de tratamiento de aguas residuales, evaluando su eficiencia y viabilidad económica.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en la Tierra. El humano depende de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y continuación de las actividades agrícolas e industriales. En las últimas décadas, la demanda de líquidos ha aumentado significativamente para producir más alimentos y energía y proporcionar agua potable a una población cada vez mayor. Otro tema importante relacionado con el uso potencial del agua es el nivel de contaminación. Si la calidad del agua no es suficiente, el problema de la escasez de agua puede empeorar aún más.

Si bien los problemas del agua se centran principalmente en las necesidades humanas, es importante enfatizar su importancia como elemento clave en el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad. Sin agua los ecosistemas naturales se deterioran, se pierde la biodiversidad y, como resultado, la calidad de los bienes y servicios ambientales que sostienen a la sociedad deja de estar disponible o disminuye.

El tratamiento de aguas residuales tiene dos beneficios. Además de los beneficios para el medio ambiente y la salud, también puede generar ganancias económicas al ser reutilizado en diversas industrias. Sus subproductos, como el biogás y los nutrientes, pueden utilizarse en la agricultura y para la generación de energía. Además, los ingresos adicionales generados por este procedimiento pueden ayudar a cubrir los gastos de operación y mantenimiento de los servicios públicos de agua.

La producción de biogás mediante reactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales urbanas es un tema de creciente interés en la actualidad debido a su potencial para abordar problemas ambientales y energéticos de manera simultánea. Los reactores anaerobios son sistemas biológicos que permiten la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás como producto final. Este biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, puede ser utilizado como fuente de energía renovable y sostenible.

TEORÍA

El líquido esencial que permite la existencia de la vida en nuestro planeta es el agua. Sin embargo, aunque existen millones de seres vivos en la Tierra, los humanos somos los únicos responsables de haber alterado los ciclos hidrológicos de nuestros ecosistemas para satisfacer en la mayoría de las ocasiones nuestras necesidades inmediatas[3], lo que afecta nuestra calidad de vida a largo plazo y la de millones de especies vivas, olvidando por completo el futuro que nos espera.

Es muy contradictorio pensar que el agua es un recurso infinitamente renovable. Aunque la mayor parte de la Tierra está formada por agua, el 98 % de este líquido es salado y se encuentra en los océanos[3]. Solo el 2% restante (40,000 km^3) es agua dulce. Si desglosamos este escaso 2% de líquido potencialmente bebible, descubriremos que 27,760 km^3 (68.9%) del agua dulce disponible en la Tierra está congelado en los polos en forma de glaciares y nieve; 12,112 km^3 (30.8%) es agua subterránea; y solo 128 km^3 (0.3%) es superficial y se encuentra en lagos, lagunas, ríos y humedales.

Aunque es escaso, este líquido vital puede ser suficiente para todos los seres vivos que habitan el planeta, pero si mantenemos las formas actuales de uso irracional de los ecosistemas y el consumo excesivo de agua, esta disponibilidad futura del agua será imposible.

La introducción de algún material en el agua altera la calidad y la composición química del agua se conoce como contaminación hídrica. La Organización Mundial de la Salud afirma que el agua se considera contaminada "cuando su composición ha sido alterada de tal manera que no cumple con las condiciones necesarias para su uso, al que se le hubiera destinado en su estado natural".

Las aguas residuales, están constituidas por una mezcla muy compleja de compuestos y por una cantidad elevada de microorganismos[4]. Se requieren ciertos parámetros para cuantificar la carga contaminante del agua, entre los que destacan:

- DBO5 - Demanda Bioquímica de Oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO5) es un parámetro fundamental en el tratamiento de aguas residuales y juega un papel clave en el modelo de optimización de producción de biogás en reactores anaerobios. Según Wang[5], la DBO5 representa la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación bioquímica de la materia orgánica en un periodo de cinco días a una temperatura específica. Esta medida es crucial para determinar la carga orgánica de las aguas residuales y, por ende, influencia directamente la producción de biogás en los reactores anaerobios.

- DQO - Demanda Química de Oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es otro parámetro fundamental en el tratamiento de aguas residuales y su relación con la producción de biogás en reactores anaerobios es importante mencionar que según Rodríguez[6], la DQO se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua, siendo un indicador clave de la carga contaminante y del potencial de generación de biogás en estos sistemas.

- Sólidos Totales

Los Sólidos Totales (ST) son un parámetro importante a considerar en el tratamiento de aguas residuales y su relación con la producción de biogás en reactores anaerobios es significativa. Según la investigación de Pérez[7], los Sólidos Totales representan la cantidad total de materia suspendida y disuelta en una muestra de agua, incluyendo partículas orgánicas e inorgánicas. Estos sólidos pueden influir en la eficiencia del proceso anaerobio y, por ende, en la producción de biogás.

- Sólidos Totales Suspendidos

Los Sólidos Totales Suspendidos (STS) incluyen la materia sedimentable así como los sólidos que debido a su pequeño tamaño o a la existencia de fuerzas electrostáticas no sedimentan. Se determinan mediante filtración del agua.

- Sólidos Suspendidos Volátiles

No todos los sólidos en suspensión son biodegradables, ya que una parte puede corresponder a sustancias inorgánicas. Los sólidos en suspensión biodegradables son los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), ya que se determinan mediante un proceso de calcinación.

En la actualidad, debido al aumento de la población y a los cambios en el estilo de vida, las aguas residuales generadas son de una variedad amplia y requieren procedimientos más complejos. Actualmente, el tratamiento de aguas residuales implica una variedad de procesos y operaciones unitarios que deben cumplir con normas de calidad específicas antes de que se puedan volver a usar o descargarse en un cuerpo de agua.

Dentro de los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales se pueden subdividir en dos grandes grupos: Aerobios y Anaerobios. En el caso de la producción de biogás se produce en sistemas anaerobios.

La digestión anaeróbica es el proceso de fermentación en el que se degrada el material orgánico y se produce biogás (principalmente metano y dióxido de carbono)[3]. Los procesos de digestión anaerobia se pueden llevar a cabo en cualquier lugar donde haya materia orgánica disponible y haya un bajo potencial redox (en ausencia de oxígeno).

La digestión anaerobia es un sistema ecológico delicadamente equilibrado en el que se llevan a cabo procesos metabólicos complejos que ocurren en etapas secuenciales y dependen de la actividad de al menos tres grupos fisiológicos de microorganismos: bacterias fermentativas (o acidogénicas); bacterias sintróficas (o acetogénicas); y bacterias metanogénicas. Cada grupo microbiano realiza funciones particulares[8]. Las bacterias fermentativas acidogénicas convierten los compuestos orgánicos complejos (como carbohidratos, proteínas y lípidos) en otros compuestos más simples, principalmente ácidos orgánicos e hidrógeno y dióxido de carbono, mediante hidrólisis y fermentación.

Los microorganismos sintróficos acetogénicos transforman compuestos orgánicos intermedios como propionato y butirato en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, el acetato y el hidrógeno que se produjeron en los pasos anteriores se transforman en metano y dióxido de carbono. Un grupo específico de microorganismos, conocido como arqueas metanogénicas, son procariotas completamente anaerobios que realizan esta conversión. La interacción sintrófica ocurre cuando los microorganismos metanogénicos dependen del sustrato proporcionado por las bacterias formadoras de ácidos.

En los ecosistemas anaerobios, los microorganismos metanogénicos cumplen dos funciones fundamentales: primero, producen un gas insoluble (metano), lo que permite la extracción del carbono orgánico contenido en la fase líquida; y segundo, mantienen la presión parcial de hidrógeno del medio en niveles suficientemente bajos, lo que permite que las bacterias fermentativas y formadoras de ácidos produzcan productos más oxidados, como el ácido acétil. Durante la degradación de compuestos orgánicos, cuando los microorganismos metanogénicos ocupan una posición final en el ambiente anaerobio, su baja tasa de crecimiento normalmente es el factor limitante en el proceso total de digestión.

El modelo de digestión anaerobia ADM1 es ampliamente utilizado para simular y optimizar procesos de tratamiento de aguas residuales mediante la tecnología de digestión anaerobia. Según la investigación de Batstone[9], el modelo ADM1 permite una representación detallada de las reacciones bioquímicas y cinéticas que ocurren en un reactor anaerobio, incluyendo la degradación de sustratos, la producción de ácidos grasos volátiles y la generación de biogás.

El sistema de reacción de un digestor anaeróbico es complejo y consta de numerosos pasos secuenciales y paralelos[9]. Las dos categorías principales de estas reacciones son (a) Reacciones bioquímicas que se producen. En la mayoría de los casos, son catalizados por enzimas intra o

extracelulares y actúan sobre una variedad de materiales orgánicos biológicamente accesibles. Los compuestos (como la biomasa muerta) se descomponen en componentes particulados y luego se hidrolizan enzimáticamente en sus monómeros solubles. Los organismos intracelulares median la degradación de materiales solubles, lo que conduce al crecimiento de la biomasa y su posterior descomposición. (b) Reacciones de naturaleza físicoquímica. Estos incluyen la transferencia de gas-líquido y la asociación/disociación de iones y no están mediados biológicamente. La precipitación es una reacción adicional que no se incluye en el ADM1.

Debido a que una parte significativa de la DQO de entrada puede no ser biodegradable anaeróbicamente, es crucial distinguir entre la DQO degradable disponible (sustrato) y la DQO de entrada total. En general, indicamos DQO degradable con "sustrato". Cualquier modelo se basa en las ecuaciones bioquímicas, y solo utilizando estas ecuaciones se puede representar un sistema anaeróbico.

El grupo de trabajo de la Asociación Internacional del Agua (IWA por sus siglas en inglés) acordó un modelo estructurado debido a una serie de ventajas científicas y de aplicación, y los modelos anaeróbicos más recientes incluyen productos intermedios. La filosofía de inclusión de procesos y componentes buscaba maximizar la aplicabilidad al mismo tiempo que mantenía una estructura de modelo bastante simple. Los tres pasos biológicos (celulares) generales (acidogénesis o fermentación, acetogénesis u oxidación anaeróbica de Ácidos Grasos Volátiles y Ácidos Grasos de Cadena Larga y metanogénesis) se incluyen en el modelo, así como un paso de desintegración extracelular (parcialmente no biológico) y un paso de hidrólisis extracelular.

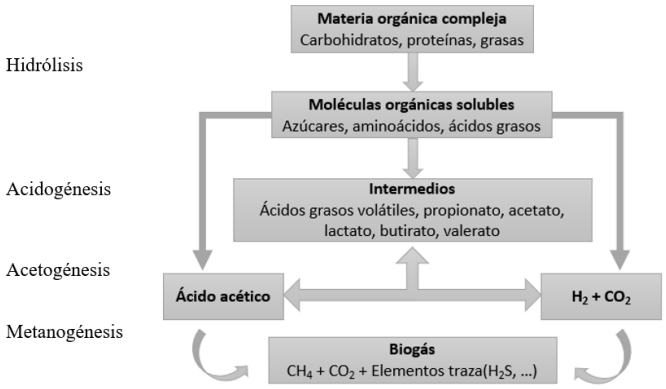


Figura 1 Fases de digestión anaerobia[9]

Los desechos complejos se descomponen primero en sustratos de partículas de carbohidratos, proteínas y lípidos, así como en partículas y materiales inertes solubles. Se cree que un paso de desintegración precede a pasos hidrolíticos más complejos, por lo que se incluyó principalmente para facilitar el modelado de la digestión de lodos activados[10]. La biomasa descompuesta (inactiva) también se deposita en la piscina de desechos de partículas complejas antes de su lisis. Por lo tanto, la etapa de desintegración puede incluir una variedad de procesos, como la lisis, la desintegración no enzimática, la separación de fases y la degradación física.

Los monosacáridos y aminoácidos se descomponen en ácidos orgánicos mixtos, hidrógeno y dióxido de carbono por dos grupos diferentes de acidógenos. Posteriormente, los grupos acetogénicos utilizan Ácidos Grasos de Cadena Larga, butirato, valerato (un grupo para los dos sustratos) y propionato para convertir los ácidos orgánicos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Un grupo metanogénico que utiliza hidrógeno consume el hidrógeno producido por estos organismos y un grupo metanogénico aceticlástico consume el acetato.

El biogás es un subproducto que se genera de la descomposición de la materia orgánica presente en el agua en ausencia de oxígeno, mediante la acción de microrganismos y otros factores esta

mezcla se constituye por metano que oscila entre el 40% y 70%, dióxido de carbono y pequeñas porciones de otros gases como el hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno[11]. Este es considerado como un producto de valor ya que se puede utilizar como combustible o transformarse en energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras.

La conversión de biogás en energía puede lograrse mediante varios procesos y métodos. Un estudio reciente de López[12] detalla algunos de estos enfoques clave, que incluyen la generación de electricidad a través de motores de combustión interna, la producción de biometano para uso como combustible en vehículos y la conversión a calor para aplicaciones de calefacción y refrigeración.

METODOLOGÍA

La metodología descrita en el diagrama es utilizada para los procesos de optimización que fue propuesta por Chong[13].

Esta metodología permite identificar las condiciones óptimas de operación y proporciona modelos precisos para predecir la producción de biogás, facilitando así la implementación eficiente de tecnologías de digestión anaeróbica.

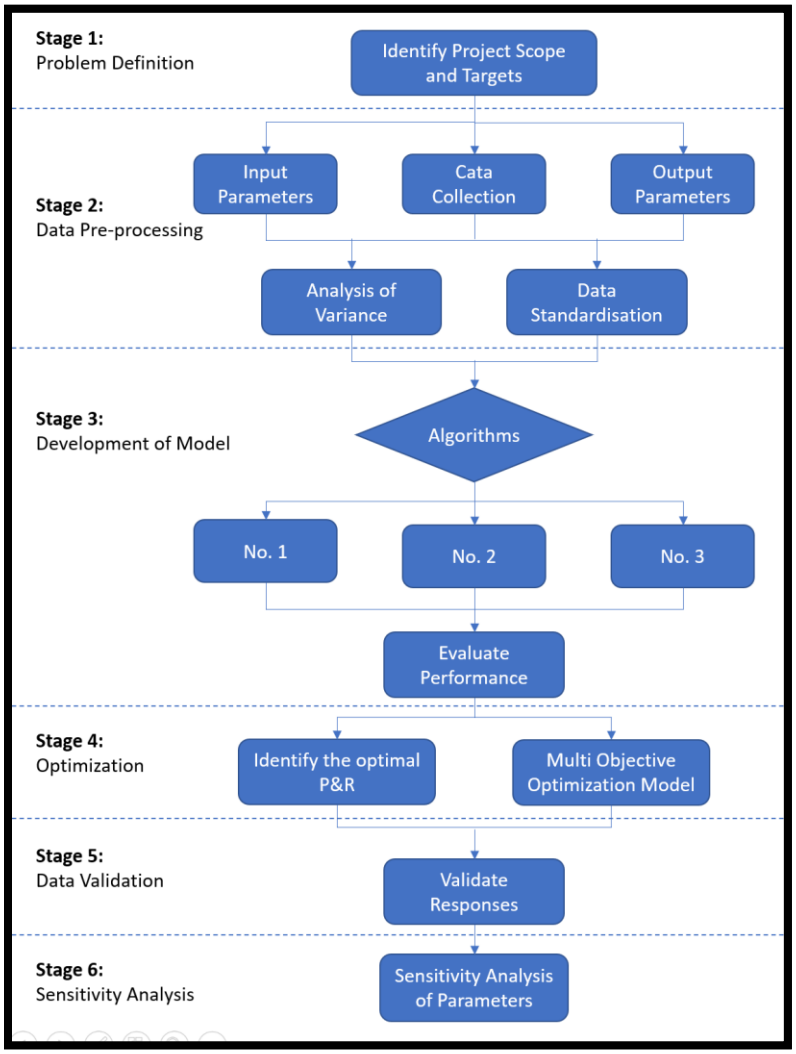


Figura 2. Etapas a seguir[13]

CONCLUSIONES

Ya no debemos de considerar las aguas residuales como un residuo, ahora las debemos de considerar como un recurso, esto considerando el principio de la economía circular, en el cual se tiene como objetivo minimizar los residuos y aprovechar al máximo los recursos. A medida que las poblaciones siguen creciendo, deberán de aplicarse estrategias para el desarrollo urbano que minimicen el consumo de recursos y que se centren en su recuperación.

Si se adoptan los principios de la economía circular para la gestión de las aguas residuales se podrían transformar los servicios de saneamiento, que pasarían de ser costosos a autosustentables y que le agregarían valor a la economía.

Las energías verdes otorgan una alternativa a la dependencia de combustibles fósiles esto permite a los países diversificar sus economías y protegerse de las fluctuaciones en los precios de los combustibles de origen. La adopción de un sistema energético que se base en tecnologías renovables tendrá beneficios a nivel mundial, de acuerdo a las investigaciones realizadas por la Agencia Internacional de Energías Renovables y la Agencia Internacional de Energías se tiene que alcanzar una producción de energía eléctrica de fuentes renovables hasta el 90% a nivel mundial para el año 2030.

La producción de biogás es la manera más efectiva de recuperar energía, el principal componente de este es el metano el cual se puede purificar para producir otro tipo de gas natural que se conoce como biometano. La recuperación de la energía producto de la digestión anaerobia depende de las características del sustrato, la alta digestibilidad de este es fundamental para el éxito. Al optimizar la producción de biogás se mejora la calidad del efluente de las plantas de tratamiento que es su principal objetivo y agregando valor al obtener los subproductos.

BIBLIOGRAFÍA

1. INEGI. (17 de 03 de 2023). INEGI INFORMA. Obtenido de Estadisticas a propósito del día mundial del agua: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_Agua23.pdf
2. Unidas, N. (2023). Naciones Unidas. Obtenido de Acción por el clima: https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy
3. López, C. A., Zambrano, L., Ruíz Ortega , R., Guzmán, M. A., Pérez Espejo, R., Sandoval, R., Caldera, A. (Diciembre de 2017). Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica. El agua en México, Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica : http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/libro/aguaen_mexico.pdf
4. Agua, C. N. (2015). Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. México, D.F.: CONAGUA.
5. Wang, Y., Zhang, L., & & Li, J. (2021). Assessment of biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) for industrial wastewater treatment. Water Science and Technology, 84(9), 2071-2081.
6. Rodríguez, A., López, B., & & García, C. (2023). Evaluación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales industriales para el diseño de sistemas de tratamiento anaerobio. . Ingeniería Ambiental, 45-55.
7. Pérez, M., Gómez, A., & & Martínez, E. (2022). Influencia de los sólidos totales en el rendimiento de reactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales municipales. Ingeniería Ambiental y Sostenibilidad, 25-36.
8. De Lemos Chernicharo, C. A. (2022). Reactores Anaerobios. En C. A. De Lemos Chernicharo, Principios del Tratamiento de Aguas Residuales (págs. 38-47). Nariño: Universidad de Nariño.
9. Elmoutez, S., Abushaban, A., Chaker Necibi, M., Sillanpää, M., Liu, J., Dhiba, D., . . . Taky, M. (2023). Design and operational aspects of anaerobic membrane bioreactor for efficient wastewater treatment and biogas production. Environmental Challenges, 1-13.

10. Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., & y Tait, S. (2019). Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). IWA Publishing.
11. Manufactureros, S. (2022). Realidad, Impacto y Oportunidades de los Biocombustibles en Guatemala (Sector Productivo). Guatemala.
12. López, J., González, M., & Pérez, R. (2024). Methods for biogas conversion to energy: A comprehensive review. Renewable Energy Journal, 56(3), 210-225.
13. Chong, D. J., Chan, Y. J., & Arumugasamy, S. K. (2023). Optimisation and performance evaluation of response surface methodology (RSM), artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in the prediction of biogas production from palm oil mill effluent (POME). Energy.

SISTEMA DE DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LA APLICACIÓN DE PINTURA AUTOMOTRIZ, MEDIANTE EL PROCESO DIGITAL DE IMÁGENES

Mirna Patricia Juárez Varela, Marco Antonio Betanzos Torres, Andrea Aguilar Márquez, Oscar Alcázar García.

División de Sistemas Automotrices, Universidad Tecnológica de Puebla.
mirna.juarez@utpuebla.edu.mx

RESUMEN

En el proceso de pintura automotriz en piezas metálicas, se busca obtener un acabado sin imperfecciones, sin embargo, los defectos suelen aparecer como una inevitable variación de las condiciones óptimas de operación o causadas por polvo, agresiones ocasionales causadas por los propios trabajadores, etc. Los defectos son, en realidad alteraciones en una capa en que crecen y se hacen más visibles conforme se aplican capas adicionales de pintura. Tradicionalmente, los defectos se localizan, marcan y reparan en una etapa posterior al proceso de pintado. En ocasiones, los defectos son claramente visibles y detectables, como es el caso de golpes y rayas, mientras que, en otros casos, los defectos pueden ser en realidad pequeñas partículas muy difíciles de detectar[1]. Con lo antes mencionado se presenta un sistema de detección de defectos, el cual se basa en el procesamiento digital del corpus de imágenes de piezas pintadas, después de la adquisición de las imágenes, la metodología se basa en la extracción de imágenes, conversión al espacio de colores RGB, extracción de patrones, almacenamiento, conversión al dominio de frecuencia y presentación e interpretación gráfica de resultados para determinar si la pieza metálica requiere un repintado o, si cumple con las normas y estándares de calidad del sector automotriz.

Como resultados obtenidos, se presenta la extracción de frecuencias en el espacio de color RGB, tomando un conjunto de entrenamiento de 20 piezas en un total de 60 imágenes, se diseña la arquitectura de la red neuronal con una capa de salida de 2 valores de salida, dando como resultado un clasificador con fronteras no lineales, para posteriormente obtener una clasificación más precisa de los diferentes tipos de defectos que existen en la aplicación de pintura automotriz.

INTRODUCCIÓN

En el sistema de pintura en piezas metálicas automotrices, es importante la correcta clasificación de sus piezas para obtener un producto de excelente calidad. Esta inspección es de forma visual, después de un período de tiempo relativamente corto la agudeza visual se deteriora, incluso en el caso de que la clasificación sea relativamente simple. Por esta razón, se presenta un sistema para determinar si la pieza metálica requiere un reproceso, o su falla en el proceso de aplicación de pintura automotriz es aceptable, mediante el procesamiento digital de imágenes. La metodología propuesta consiste en los siguientes pasos: adquisición de la fotografía, extracción de imágenes, conversión al espacio de colores RGB, extracción de patrones, almacenamiento, conversión al dominio de frecuencia. Este sistema propias de un control de calidad aplicado a la industria de la pintura, pues no implica largas horas de inspección visual, fatiga y cansancio por parte del inspector sino más bien es una herramienta para facilitar su trabajo.

El presente trabajo desarrolla una caracterización de colores en el espacio RGB mediante el análisis de imágenes digitales obtenidas durante dicho proceso. Esto como parte de un sistema de red neuronal que nos permitan clasificar los defectos en la aplicación de pintura, así como incumplimientos a las normas de sustentabilidad, en conjunto con el diseño de una instalación que proporcione un adecuado control de factores como son: iluminación, ventilación, calefacción y filtrado de partículas de pintura, generando un ambiente óptimo para el proceso de pintado automotriz.

TEORÍA

Durante los diez primeros años del siglo XIX aparecieron los primeros vehículos. Desde los comienzos ha evolucionado el proceso de pintura para intentar obtener un proceso más respetuoso con el medio ambiente, de forma que al principio se utilizaban productos naturales y actualmente polímeros de alta tecnología. Durante la fabricación del automóvil se aplican en la carrocería diversos productos de pintura que aseguran el cumplimiento de sus funciones. Cuando es reparado, ya sea porque ha sufrido daños o por el efecto del tiempo, deben reponerse esas capas de pintura, garantizando el máximo nivel de protección y de belleza exterior.

Cuando hablamos de defectos de la pintura nos referimos a las irregularidades que aparecen en la pintura durante y debidas al repintado que estamos realizando. Pese a la gran variedad de defectos de la pintura que nos podemos encontrar en el repintado, podemos decir que estos defectos se deben a cinco motivos, que son:

- Mala preparación de la superficie.
- Empleo inadecuado de los productos a emplear, mala mezcla, mala aplicación y mal secado.
- Mala regulación y mal uso de las pistolas aerográficas, así como el empleo de pistolas inadecuadas.
- Mal mantenimiento de las instalaciones y equipos del área de pintura.
- Condiciones ambientales inapropiadas para la aplicación del producto.

Es así que surge la necesidad de evaluar el área de pintura con el fin de optimizar sus procesos, de manera que, en el control final de sustratos pintados, el número de defectos sea el mínimo y los reprocesos no sean significativos.

PARTE EXPERIMENTAL

La metodología empleada en la aplicación de la pintura consta de los siguientes pasos:

1. Desengrase de la pieza. °
2. Aplicación del fosfato.
3. Aplicación del primer de relleno.
4. Aplicación de la base color.

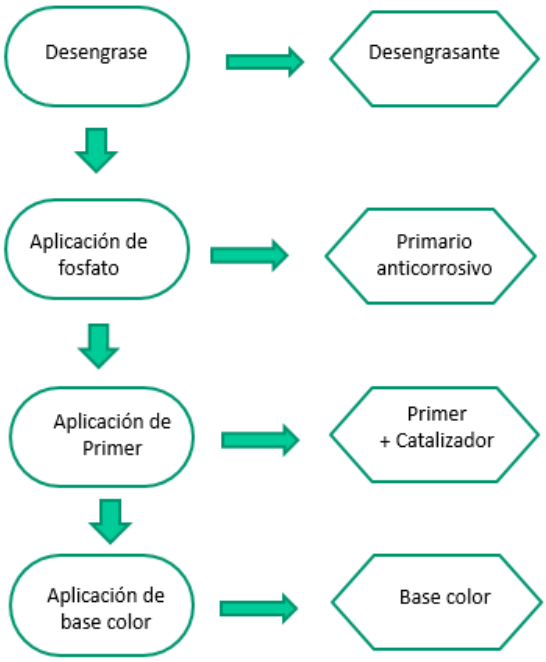


Fig. 1 Diagrama de flujo del procedimiento de la aplicación de la base color.

Cabe resaltar que aplicación del primer de relleno se llevó a cabo con los parámetros que se muestran a continuación:

PARÁMETROS	PRIMER
Temperatura	82° F
Humedad	34 %
Espesor de la pintura	40 µm
Presión de aplicación	2.5 bares
Número de manos	2
Diámetro de la boquilla	1.7 mm

Cuyo resultado de una pieza, se muestra en la siguiente figura.

Fig. 2 Imagen i-ésima.

El método para extraer información de los datos contenidos en las imágenes capturadas consta de los siguientes pasos:

1. Adquisición de las imágenes.
2. Extracción de cada una de las imágenes.
3. Segmentar las capas de color RGB que componen la imagen original.
4. Graficar los resultados.

Para extraer la información se toman las muestran con la cámara elementos del equipo utilizado en el presente estudio en la Fig. 1. La cámara CCD usada para el prototipo fue un smartphone Xaomi modelo Redmi-Note 11S, con un sensor principal de 108 megapíxeles y un sensor de profundidad de 2 megapixeles bits. El sistema cámara-objetivo se instaló en un sistema aislado del ambiente externo y de la luz natural, a una temperatura ambiente. La misma estaba situada a 0.15 metros de altura y con un ángulo de 90 grados.
La iluminación fue con lámpara fluorescente (32 W, 1900 lm), temperatura de color de 6500 K y diámetro de bombilla de (11-9-64) pulgadas. Los parámetros de la cámara se configuraron de la siguiente manera: apertura del diafragma – f/1.9, tiempo de exposición – 1/120 s, sensibilidad del sensor – ISO-50, distancia focal – 3 mm. L

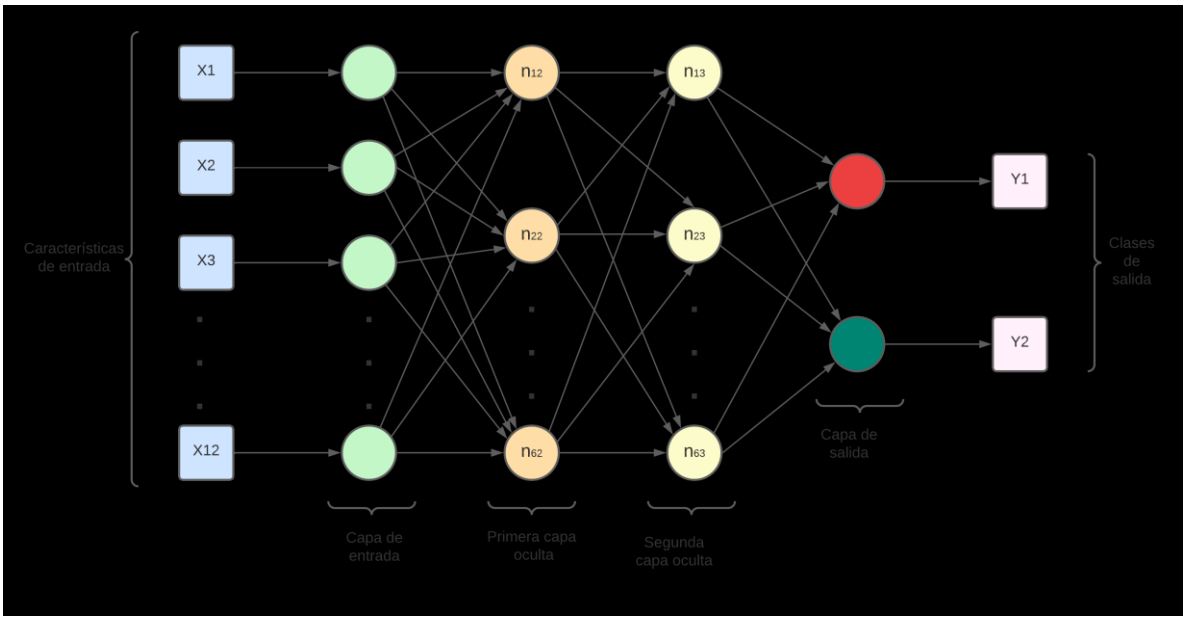


Fig. 3 Arquitectura de las capas de entrenamiento

RESULTADOS

Como resultado se obtienen los espectros frecuencial de la aplicación de pintura automotriz, con un sensor CCD de un conjunto de 60 piezas, tomando un set de entrenamiento de 20 piezas, como nos muestra la gráfica. Como trabajo a futuro se propone analizar fallas y defectos en la aplicación de pintura, así como una clasificación automática de los espectros obtenidos empleando algoritmos de Inteligencia artificial.

.

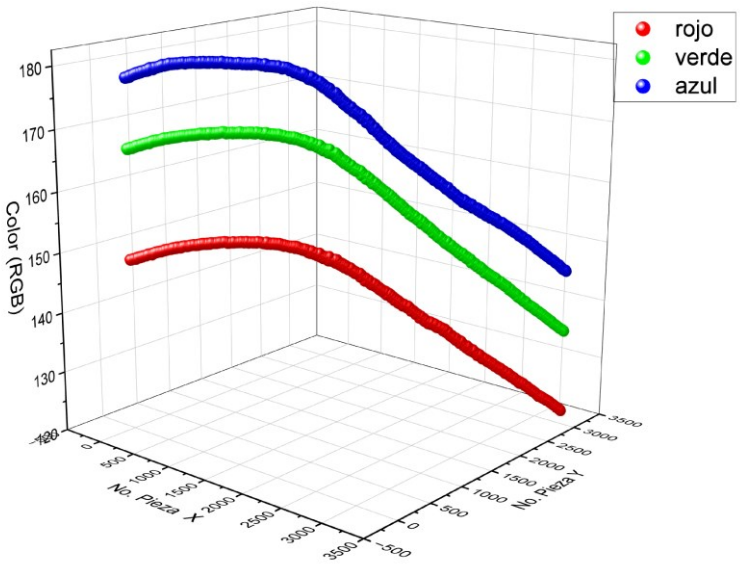


Fig. 4. Espectro frecuencial de la aplicación de pintura de 60 piezas

.

CONCLUSIONES

Como resultados obtenidos, se presenta un método para obtener el espectro frecuencial correspondiente a la aplicación de pintura automotriz, como parte del sistema de clasificación de fallas y defectos en su aplicación. El método consiste en los siguientes pasos: aplicación de pintura automotriz, extracción de imágenes, segmentar las capas de frecuencia RGB, diseñar la red neuronal con la capa de salida con dos posibles resultados, cuyo objetivo de esta investigación a futuro es diseñar e implementar un modelo de red neuronal artificial que pueda predecir cómo resultado una clasificación más precisa de los diferentes tipos de defectos que existen en la aplicación de pintura automotriz.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Tornero, L. Armesto, “Detección de Defectos en Carrocerías de Vehículos Basado en Visión Artificial: Diseño e Implantación”, R. Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 9 (2012), pp. 93-104.
.

ADQUISICIÓN DE DATOS DE TURBOCOMPRESOR Y MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Juan Ignacio Torres Luna, Francisco Gustavo Chávez Razo, José Francisco Ayala García, Vicente Daniel Muñoz Carpio.

Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, Ingeniería en Sistemas Automotrices, Blvd. Cuitzeo de los Naranjos #401, Col. Cuitzeo de los Naranjos, CP. 36976, Abasolo, Guanajuato. francisco.ag@abasolo.tecnm.mx

RESUMEN

El presente proyecto aborda diversos temas relacionados con la ingeniería automotriz, centrándose en la instrumentación de un motor de combustión interna para la adquisición de datos y control de un turbo convencional a fin de mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes. Uno de los inventos más significativos del siglo XX ha sido sin duda el automóvil, ya que gracias a este se han alcanzado grandes avances en nuestra civilización; sin embargo, los primeros prototipos del motor de combustión interna contaban con una eficiencia de tan solo del 3%; hoy en día se han desarrollado distintos tipos de motores que han mejorado considerablemente la eficiencia al realizar la combustión en los motores de ciclo Otto y los motores Diesel.

Una alternativa son los turbocompresores, estos dispositivos son capaces de mejorar la combustión en el motor, suministrando más oxígeno en la cámara de combustión de este modo se obtiene una combustión más rica en oxígeno, lo cual mejora notablemente el desempeño del automóvil. Hoy en día existen diferentes tipos de turbocompresores: el turbo convencional, el cual presenta cierto retardo a la respuesta y el turbo-eléctrico, el cual es capaz de eliminar dicho retraso. Uno de los principales inconvenientes con los turbocompresores eléctricos es su elevado costo, debido a esto se optó por implementar un sistema de control capaz de controlar un turbocompresor convencional el cual está acoplado a un motor de corriente directa, buscando que esta manera sea una alternativa más económica en comparación a las que se encuentran en el mercado.

Este sistema de control cuenta con una serie de sensores colocados en el turbo los cuales permitirán conocer el estado en el que se encuentra el motor, los parámetros que se medirán con dichos sensores son la presión, temperatura y caudal.

Para la medición y registro de dichos valores se utilizó una RASPBERRY PI 3+ la cual permite almacenar los resultados de los sensores, así como de graficar en tiempo real los valores adquiridos por cada uno de los sensores, de este modo es posible monitorear el estado en el que se encuentra el turbo. Al igual que con la RASPBERRY también se utilizó un Arduino UNO el cual cumple con una función muy importante y es la de enlazar una comunicación entre los sensores y la RASPBERRY PI, una vez identificado el estado del dispositivo se procede a hacer uso del control de lazo cerrado de modo que se pueda regular el flujo del fluido (cantidad de oxígeno) suministrado a dicho sistema.

Con la instrumentación de un motor para control y adquisición de datos en la implementación de un controlador ha demostrado ser exitosa en la mejora de la eficiencia (reducción de retardo) y la reducción de emisiones contaminantes. A través de la selección de sensores, la comunicación con dispositivos como Arduino y Raspberry Pi, la calibración, pruebas y ajustes, así como la creación de una interfaz gráfica para visualizar datos en tiempo real, se lograron mediciones precisas y un control más exacto.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han desarrollado distintos tipos de motores como los son: el ciclo otto, Diesel y eléctricos con el propósito de mejorar sus características, hoy en día el motor de gasolina de ciclo Otto tiene una eficiencia de entre el 20% y el 30%, en el mejor de los casos, es ahí donde surge la necesidad de desarrollar el turbo. Existen 2 tipos de turbos el turbo convencional y el turbo eléctrico, el turbo convencional cuenta con un sistema simple pero funcional el cual recibe los gases emitidos por el motor y le permite absorber los gases del medio ambiente (aire) para enriquecer la relación de combustión del motor. El turbo eléctrico a diferencia del turbo convencional cuenta con un sistema

más sofisticado ya que cuenta con un pequeño motor eléctrico lo cual le facilita la absorción de los gases lo que lo vuelve más eficiente y proporciona un impulso inmediato entre otras características. Aunque el turbo supone una mejora significativa aun cuenta con diferentes problemas como lo es su elevado costo y mantenimiento, teniendo esto en cuenta se propuso la idea de mejorar el turbo convencional para mejorar la eficiencia del motor a un menor costo.

TEORÍA

Turbocompresor: Es un dispositivo mecánico que aumenta la presión y la densidad del aire que se suministra a un motor de combustión interna. El turbo funciona mediante el aprovechamiento de la energía de los gases de escape del motor, los cuales hacen girar una turbina. **(Suárez-Llanos Outeiriño, L, 2015)**

Transductor de presión: Un transductor de presión es un dispositivo diseñado para medir y convertir la presión aplicada sobre él en una señal eléctrica o electrónica que pueda ser interpretada y utilizada en sistemas de control, monitoreo o adquisición de datos. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones en la industria, la ingeniería, la investigación y muchos otros campos. **Morcelle del Valle, P. (2018).**

Sensor termopar tipo k: Un termopar tipo K es un sensor de temperatura que se utiliza para medir temperaturas en un rango de -200 a 1350 grados Celsius. Consiste en dos metales diferentes, generalmente aleaciones de níquel-cromo y níquel-aluminio, que están unidos en un extremo para formar una junta de medición. **(RODRÍGUEZ , OCAMPO, & ORTEGA , 2007)**

Arduino: Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto, diseñada para facilitar la creación de prototipos de dispositivos interactivos. Consiste en placas electrónicas con microcontroladores y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite escribir, cargar y ejecutar código en las placas.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la adquisición de datos, se utilizó un conjunto de circuitos y componentes electrónicos para la obtención, tratamiento y visualización de los mismos. Los componentes son los siguientes:

1. Unidad principal y de tratamiento de datos: Raspberry Pi 4. Dado que la Raspberry Pi 4 tiene limitaciones en el tratamiento de señales analógicas, se empleó un Arduino Uno para leer las señales analógicas de los sensores de flujo y el transductor de presión.
2. Circuito de control: Se usó un regulador de voltaje de 110V a 12V para alimentar el módulo controlador del motor con potenciómetro, así como un motor de 12V adaptado al turbo ya existente en las instalaciones del motor.
3. Adquisición de temperatura: Se empleó un termopar tipo K con un módulo de convertidor de señal análoga a digital (MAX6675) conectado directamente a la Raspberry Pi 4.

En la Figura 1 se muestra el diagrama del circuito para la adquisición de datos, se utilizó un conjunto de circuitos y componentes electrónicos para la obtención, tratamiento y visualización de estos. En este diagrama se muestra la estructura general del circuito utilizado para la recopilación de los datos así como su funcionamiento lógico.

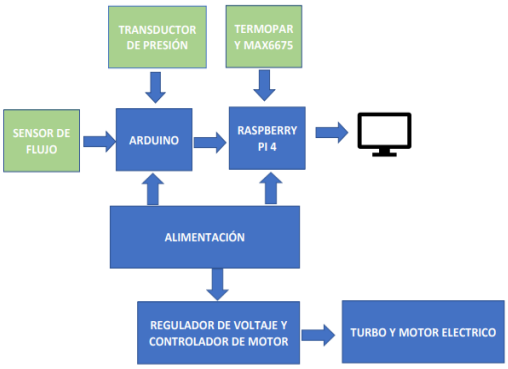


Figura 1. Representación esquemática del circuito.

Pruebas con el sensor termopar.

Para el sensor termopar se utilizó la raspberry pi para observar la visualización de los valores dentro de la interfaz de python, esto se hizo de tal manera que pudiéramos observar el comportamiento del sensor tanto físicamente como digitalmente ya que la Raspberry Pi solo puede leer señales digitales, la forma de que la Raspberry Pi pueda leer los datos del sensor termopar es debido al módulo Max6675 el cual permite la conversión de las señales.

Las conexiones del sensor con la raspberry pi se pueden observar en la Figura 2 en donde se muestra el módulo Max6675 y sus respectivas conexiones hacia el sensor y los Gpio de la Raspberry Pi.

Figura 2. Conexiones del sensor termopar

Una vez realizadas las conexiones se utilizó un código simple el cual nos permitirá conocer las mediciones del sensor de este modo se podrá observar la precisión con la que éste cuenta, las primeras mediciones se realizaron a temperatura ambiente de este modo podemos observar si las mediciones son cercanas, esto se puede observar en la Figura 3, de igual manera se visualizan las mediciones son del rango entre los 29 y los 30 grados centígrados, teniendo en cuenta que al realizar las mediciones la temperatura del exterior era de 30 grados por lo que es posible decir que las mediciones son correctas.

```
Termopar = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,SO)

try:
    while True:
        temp_celsius = Termopar.readTempC()
        temp_fahrenheit = (temp_celsius * 9/5) + 32
        print(f"Temperatura (°C): {temp_celsius:.2f}
```

Shell

```
Temperatura (°C): 29.75, Temperatura (°F): 85.55
Temperatura (°C): 29.75, Temperatura (°F): 85.55
Temperatura (°C): 29.75, Temperatura (°F): 85.55
Temperatura (°C): 29.75, Temperatura (°F): 85.55
Temperatura (°C): 29.75, Temperatura (°F): 85.55
Temperatura (°C): 30.00, Temperatura (°F): 86.00
Temperatura (°C): 29.25, Temperatura (°F): 84.65
Temperatura (°C): 29.25, Temperatura (°F): 84.65
Temperatura (°C): 28.75, Temperatura (°F): 83.75
Temperatura (°C): 29.25, Temperatura (°F): 84.65
Temperatura (°C): 29.25, Temperatura (°F): 84.65
Temperatura (°C): 29.00, Temperatura (°F): 84.20
```

Figura 3. Mediciones a temperatura ambiente.

Después de realizar las primeras mediciones se realizaron mediciones con objetos más fríos con el objetivo de someter al sensor a otro tipo de condiciones con el fin de observar su comportamiento, esto se puede observar en la figura 4 en donde se muestra como la temperatura bajó desde 30 grados centígrados hasta los 22 grados centígrados y bajando.

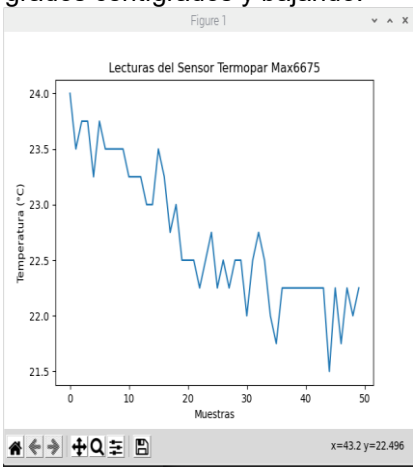


Figura 4 mediciones con temperaturas más bajas.

Pruebas con el transductor de presión.

Para el sensor de presión se realizaron de igual manera algunas mediciones con un codigo sencillo el cual nos permita solo leer los datos del sensor de este modo se puede comprobar su efectividad al medir los datos, con la diferencia de que en este sensor se utilizó la placa de arduino para poder convertir las señales analogicas a digitales, en la figura 5 se muestran las conexiones del transductor de presion hacia el arduino, considerando que el transductor de presion cuneta solo con 3 pines lo cual hace una conexión mas sencilla y practica, para el cable rojo se conecto al voltaje del arduino a 5v, en el caso del cable negro se conecto a la tierra (GND) y para el cable verde se conecto a un pin de señal analogica.

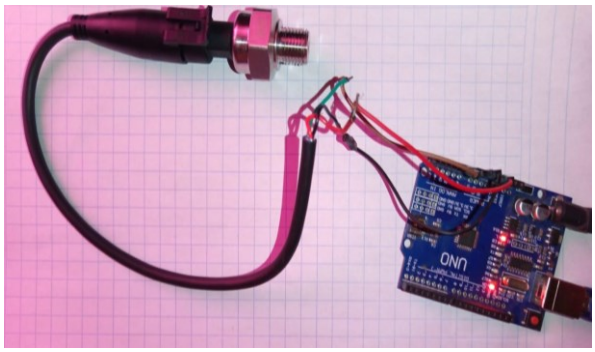


Figura 5. Conexiones del transductor de presión.

Una vez realizadas las conexiones se realizaron las mediciones en donde se medía la presión del entorno, los resultados obtenidos fueron aceptables ya que el sensor contaba con un poco de ruido tras realizar dichas mediciones, aunque este fue el caso el ruido encontrado no es tan significante, es decir no varían muchos los resultados obtenidos con los verdaderos esto se puede observar en la figura 6.

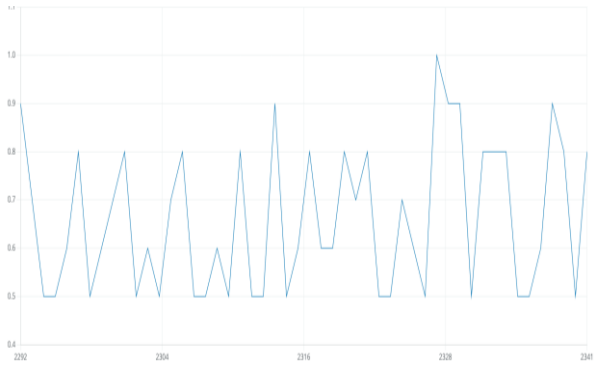


Figura 6. Mediciones del transductor de presión.

Pruebas con el sensor de caudal.

Para el sensor de caudal se le colocaron 2 tubos unos en cada extremo del sensor con el fin de poder suministrar el fluido, el sensor cuenta con 2 extremos uno por donde entra el fluido y otro por donde sale, la forma en que funciona dicho sensor es que al pasar fluido por uno de sus extremos mueve una pequeña turbina que contiene en el interior y dependiendo la cantidad de veces que gire serán las mediciones que se obtengan, en la figura 7 se puede observar el sistema.

Figura 7 conexión del sensor de flujo.

Una vez realizadas las conexiones se realizó un pequeño código para observar su funcionamiento en donde se obtuvieron los resultados de la figura 8, en estos resultados se obtuvo el caudal introducir el fluido al sensor por uno de sus extremos.

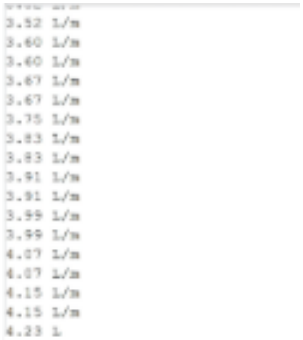


Figura 8 mediciones del sensor de flujo.

Adaptaciones de la estructura de motor.

Para la instrumentación del motor, se realizaron modificaciones en su estructura principal. Estas modificaciones consistieron en la adaptación de un soporte con el propósito de colocar una plataforma que contuviera los circuitos principales: Arduino, Raspberry Pi, un módulo regulador de voltaje y una protoboard. El soporte se fabricó con varilla corrugada de 3/8 de pulgada con longitudes de 7.87 y 19.68 pulgadas, y una plataforma de solera de 3/8 por 5.18 por 1.96 pulgadas. Además, se perforó una tabla de triplay de 28 por 17 cm. En la figura 9 se observa la estructura con la adaptación realizada.

Figura 9. Adaptación de la estructura.

Instalación de circuito en la base del motor.

Conexión del módulo del control

La conexión del circuito no presenta mayores dificultades, ya que la placa tiene claramente indicados los bornes de conexión de alimentación y señal. El módulo de control cuenta con un potenciómetro de 10 kΩ para regular la cantidad de voltios que salen de la placa hacia el motor, permitiendo así controlar la velocidad de giro de la turbina del turbo. Figura 10

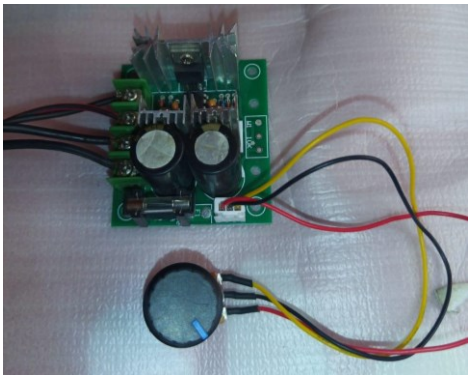


Figura 10. Conexión de circuito de control

En la figura 11 se puede observar la instalación del circuito de control en la base anteriormente mostrada, en este caso se colocó en la parte inferior para tener una mejor organización en cuestión del cableado.

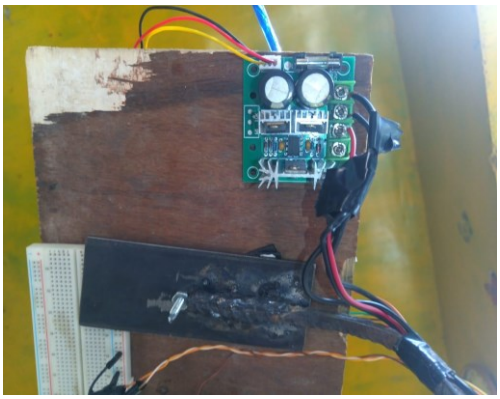


Figura 11. Instalación del circuito de control.

La plataforma que contiene los circuitos y módulos se ubicará en el soporte fabricado para este propósito. Por un lado, se instalarán los circuitos y, por el otro, únicamente se colocará el potenciómetro. En la figura 12 y 13 se puede observar la configuración de esta disposición.

Figura 12. Circuito de control.

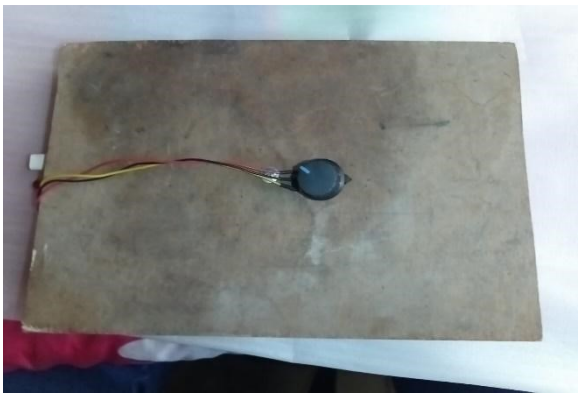


Figura 13. Potenciómetro.

Instalación de sensores en el turbo.
Para la instalación de los sensores en el turbo se colocaron en la tubería que se muestra en la Figura 14, en donde se realizó un pequeño orificio para insertar el sensor termopar para medir la temperatura del flujo de aire, una vez instalado el sensor se selló el contorno del orificio con silicón para evitar pérdidas por fuga.

Figura 14. Instalación del sensor de presión.

Para el sensor de caudal se colocó entre 2 tuberías, la entrada del sensor que va directo al turbo y la salida del sensor está conectada al motor como se observa en la figura 15.

Figura 15. Instalación del sensor de caudal.

Para la instalación del transductor de presión se colocó en la parte superior de la tubería con ayuda de algunos acoples se logró instalar de modo que se evitara la perdida de los gases, como se muestra en la ilustración 16.

Figura 16. Instalación del transductor de presión.

RESULTADOS

La adquisición de datos del turbocompresor eléctrico, mediante la instrumentación adecuada, permitió recopilar información crucial sobre variables de interés, logrando así una mejora significativa en el rendimiento del motor. Para ello, se realizaron numerosas modificaciones en la infraestructura del motor, incluyendo la colocación de calzas de madera para elevar su altura y compensar las modificaciones en la tubería del turbocompresor. Además, se adaptó la estructura para instalar una base de control.

En cuanto al control, se implementó un controlador proporcional operado por un potenciómetro que regula las RPM del turbocompresor eléctrico, mejorando la eficiencia del motor. Durante la observación del proyecto, se notó que, para iniciar el proceso de combustión, el turbocompresor debe estar encendido y funcionando a plena carga, ya que la tubería está conectada directamente a la entrada del carburador, restringiendo el aire del exterior. Al variar la potencia del turbocompresor, se observaron cambios en el motor: cuando el turbocompresor está en ralentí, el motor presenta vibraciones y tiende a apagarse; sin embargo, cuando el turbocompresor está a plena carga, el motor se acelera y mejora su combustión.

En relación con los sensores utilizados, los resultados fueron los siguientes:
Para el sensor termopar se obtuvo que la temperatura disminuyó entre 3 ºC y 4 ºC en comparación con la temperatura ambiental Figura 17.

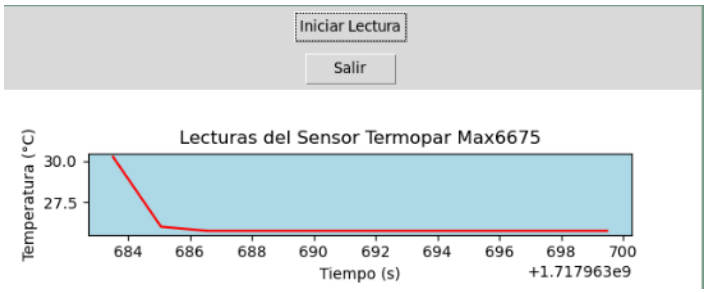


Figura 17. Resultados del sensor termopar.

Sensor de caudal.
En el sensor de caudal las mediciones obtenidas variaron de 0 hasta los 96.44 L/m (0 cuando el motor estaba apagado y 96.44 cuando estaba a plena carga), con estos resultados obtenidos podemos observar la cantidad de flujo de aire que entra al motor. Figura 18.

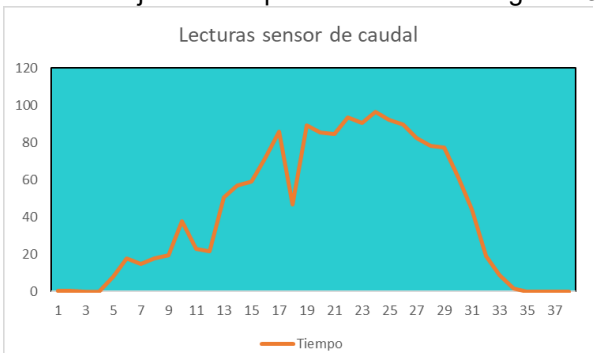


Figura 18. Resultados del sensor de caudal

Transductor de presión:
La presión registrada osciló entre 0 cuando el motor esta apagado y 22 cuando está en plena carga psi como se muestra en la Figura 19.

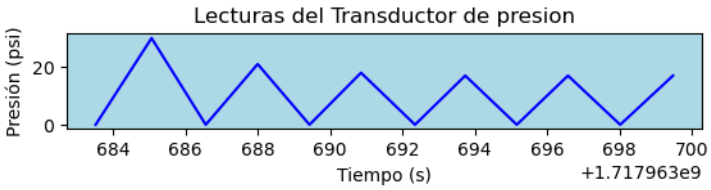


Figura 19. Resultados del sensor de presión.

Estos datos demuestran la efectividad de las modificaciones y el sistema de control implementado en la optimización del rendimiento del motor.

CONCLUSIONES

La adquisición de datos de un motor, específicamente de parámetros como presión, temperatura y caudal, ofrece múltiples ventajas, particularmente en sistemas que integran un turbocompresor eléctrico y un controlador proporcional. Este monitoreo detallado y continuo de las variables críticas del motor y del sistema de sobrealimentación permite una serie de beneficios clave:

Optimización del rendimiento: La recopilación precisa de datos en tiempo real permite ajustar de manera óptima el funcionamiento del motor y el turbocompresor. Con un controlador proporcional, las variaciones en presión, temperatura y caudal se pueden ajustar dinámicamente, asegurando un rendimiento eficiente y máximo en todo momento.

- Mantenimiento predictivo: El monitoreo constante de estos parámetros facilita la detección temprana de posibles fallos o desviaciones de funcionamiento normales. Esto permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo el riesgo de fallas inesperadas y costosos tiempos de inactividad.

- Eficiencia energética: Con datos precisos sobre la presión, temperatura y caudal, se puede optimizar el consumo de combustible y la eficiencia energética del motor. El controlador

proporcional ajusta las operaciones del turbocompresor para mantener la eficiencia óptima, lo que resulta en un menor consumo de energía y una reducción de las emisiones.

- Mejora en la vida útil del motor: El control adecuado de las condiciones operativas del motor contribuye a reducir el desgaste y el estrés en los componentes. La capacidad de mantener las variables dentro de los rangos óptimos asegura que el motor opere bajo condiciones que minimicen la degradación y prolonguen su vida útil.

- Mayor seguridad operativa: La adquisición de datos y el control preciso de las condiciones del motor y del turbocompresor mejoran la seguridad operativa. Al detectar y corregir rápidamente cualquier anomalía, se pueden prevenir situaciones que podrían comprometer la seguridad del sistema y de los operarios.

En conclusión, la adquisición de datos de un motor en relación con la presión, temperatura y caudal, combinada con un turbocompresor eléctrico y un controlador proporcional, ofrece una mejora significativa en el rendimiento, la eficiencia, la fiabilidad y la seguridad del sistema. Estas ventajas no solo optimizan el funcionamiento del motor, sino que también proporcionan beneficios económicos y operativos a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. G. Evans, “Perspectiva on the development of high-toughness ceramics”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, 2, 1990, pp. 187-206.
2. T. Kreis, “Speckle Metrology,” in *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996), Chapter 4, pp. 125-149.
3. José, R. D. A. A., & Marta, M. D. (2015). Motores de combustión interna. Editorial UNED.
4. Gil Alzáte, S., & Bacca Muñoz, A. (2015). Desarrollo e implementación de un turbo-compresor eléctrico para vehículos de mediano cilindraje.
5. Martínez, S. L., Tarifa, E. E., & Núñez, Á. F. (2012). Comparación de desempeño entre controladores fuzzy y controladores proporcionales. Avances en Ciencias e Ingeniería, 3(3), 91-101.
6. RODRÍGUEZ , E. J., OCAMPO, J. W., & ORTEGA , C. A. (Mayo de 2007). *revistaciencia.* Obtenido de MEDICIÓN DE TEMPERATURA: SENSORES
7. HBK company. (3 de Abril de 2023). *HBM.* Obtenido de Definicion de un sensor de presion: https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/#:~:text=Los%20sensores%20de%20presión%20capacitivos,correlacionarse%20con%20la%20presión%20aplicada.

ESTUDIO DEL ROL DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS EN LA CORROSIÓN POR PICADURA EN UN ACERO GRADO TUBERIA API 5L X60

Julio César Velázquez Altamirano [1], Manuela Díaz Cruz [2], Arturo Cervantes Tobón [2], Jorge Jonathan Hernández [2], Noé Eliseo González Arévalo [2].

[1] Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Química Industrial, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Edificio 7, Primer Piso, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.
[2] Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Laboratorios Pesados de Metalurgia, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.
jvelazqueza@ipn.mx

RESUMEN

La forma más económica de transportar hidrocarburos líquidos y gaseosos es mediante ductos. Según varias organizaciones internacionales y compañías petroleras, el uso de combustibles fósiles continuará en las próximas décadas. Por este motivo, es importante seguir estudiando los diferentes mecanismos de corrosión desde sus orígenes. Uno de los mecanismos que provoca pequeñas fugas, afectando la hermeticidad de la tubería, es la corrosión por picaduras. Es bien sabido que la disolución de inclusiones no metálicas puede desencadenar la nucleación de las picaduras. Como la corrosión por picaduras tiene una reconocida naturaleza aleatoria, también es interesante estudiar la naturaleza aleatoria de las inclusiones presentes en el acero API 5L X60. Las distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas para describir las características de la corrosión por picaduras se ajustan adecuadamente para estudiar las características de las inclusiones. El tamaño de las inclusiones juega un papel clave en la nucleación de las picaduras porque las inclusiones pequeñas tienden a generar más defectos, especialmente cuando estas inclusiones son compuestos de MnS y el acero está sumergido en una solución corrosiva. Los resultados de este trabajo de investigación muestran que existe una estrecha relación entre la naturaleza aleatoria de la corrosión por picaduras y las inclusiones.

INTRODUCCIÓN

La importancia de los oleoductos y gasoductos queda indicada por un aumento en su construcción debido a factores como el descubrimiento de reservas en lugares remotos y sin salida al mar, el agotamiento de las reservas cerca de los mercados establecidos, las grandes distancias de las refinerías de petróleo y grandes ciudades [1]. La Agencia Internacional de Energía prevé que el consumo de petróleo se mantendrá por encima de los 85 millones de barriles diarios y la cantidad de gas natural consumida se mantendrá por encima de los 4 billones de metros cúbicos hasta 2050 [2]. Esto significa que los oleoductos seguirán siendo relevantes al menos durante la primera mitad del siglo XXI. Entre otros temas importantes a mencionar cuando se estudian oleoductos y gasoductos son su seguridad y confiabilidad. Por ejemplo, estas estructuras suelen sufrir daños por parte de terceros, corrosión y defectos de construcción, peligros naturales, errores operativos e imperfecciones de los materiales [3,4]. En la actualidad, el envejecimiento de la infraestructura de oleoductos es uno de los principales problemas que enfrenta la industria del petróleo y el gas. Según un estudio presentado por Mojtaba Mahmoodian y Chun Qing Li [5], el 50% de la red de oleoductos y gasoductos de Estados Unidos tiene más de 40 años. En Rusia, el 20% del sistema de petróleo y gas del país está casi al final de su vida útil, y se espera que, a principios de la década de 2030, la mitad de sus oleoductos estén al final de su vida útil. En estas estructuras envejecidas, diferentes mecanismos de corrosión amenazan su integridad mecánica [3,6]. La resistencia de una tubería

puede verse afectada por las reducciones en el espesor de las paredes de la tubería inducidas por la corrosión [7,8]. En el caso específico de los ductos mexicanos, el mecanismo que causa mayor amenaza a la integridad de los ductos es la corrosión por picaduras, provocando un número sustancial de fugas [9]. Para estimar los daños provocados por este mecanismo, se ha modelizado la corrosión por picaduras utilizando técnicas estadísticas como la regresión no lineal y las cadenas de Markov [10,11]. Asimismo, se ha estudiado el impacto del crecimiento de estos defectos de corrosión para determinar la confiabilidad de las tuberías [12]. Existen algunas teorías sobre el origen de la corrosión por picaduras: una es que las picaduras se producen cuando el punto de adsorción de oxígeno en la superficie es reemplazado por iones de haluro (por ejemplo, iones de cloruro); Otra teoría es que el radio de los iones cloruro es pequeño y, por tanto, los iones pueden viajar a través de la película de pasivación. Los iones generados provocan que la membrana mantenga una densidad de corriente en un punto específico, provocando que los cationes se muevan. Cuando el campo eléctrico en la zona de la membrana-solución alcanza un valor crítico, puede ocurrir corrosión por picaduras [13]. Otra posible causa del origen de los defectos de corrosión provocados por el mecanismo de picaduras es la disolución de inclusiones no metálicas [13]. Según Smialowski et al. [13] Las inclusiones de sulfuro son muy efectivas en la nucleación de picaduras. Otros trabajos propusieron el siguiente mecanismo de disolución de inclusiones de MnS en acero [14-16]:

$$MnS + 3H_2O \rightarrow Mn^{2+} + HSO_3^- + 5H^+ + 6e^- \quad (1)$$

$$HSO_3^- + 5H^+ + 4e^- \rightarrow S + 3H_2O \quad (2)$$

El acero con el que se fabrican los oleoductos y gasoductos no sólo tiene altos valores de límite elástico sino también una alta ductilidad [17]. Este es el resultado de su composición química y del proceso de fabricación. Sin embargo, en los aceros para tuberías se pueden encontrar muchos tipos de inclusiones además del MnS, como Al_2O_3, silicatos y óxidos complejos [18,19]. La composición química de las inclusiones está fuertemente asociada con el proceso de fabricación de acero y demuestra un papel clave en el proceso de corrosión localizada. Algunas investigaciones indicaron que la corrosión por picaduras tiende a comenzar cuando se disuelven inclusiones no metálicas [20,21]; otros autores sugirieron que la disolución comenzaba en la matriz del material base alrededor de las inclusiones [22]. Por ejemplo, la Figura 5 de la Referencia [22] se esquematiza este proceso luego de estudios que involucran espectros EDX y FEM. Otros trabajos de investigación han estudiado la forma de las inclusiones porque, en algunos casos, las inclusiones esféricas tienden a generar picaduras [23]. Otra variable que ejerce influencia en la disolución de las inclusiones para generar picaduras es la composición química del ambiente [22-25].

Después de considerar estas observaciones de otros trabajos de investigación, se puede determinar que el mecanismo real de los defectos de corrosión por picaduras causados por la disolución de las inclusiones no se comprende del todo bien. Por esta razón, en el presente estudio, estudiamos la relación entre las características de inclusión y las características de defecto de corrosión por picaduras encontradas en el acero API 5L X60 (en la industria petrolera, el Instituto Americano del Petróleo designa el estándar API 5L [17] para especificaciones de acero para tuberías; en particular, X60 se designa para tuberías de acero que exhiben al menos 60 Ksi de límite elástico) después de haber sido expuesto a pruebas de inmersión. Estas características fueron analizadas mediante técnicas estadísticas para determinar la forma y el tipo de inclusiones predominantes.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental comenzó con la preparación de la muestra de acero API. En primer lugar, a partir de un tubo de acero semicircular se cortaron mecánicamente muestras cúbicas (1 cm x 1 cm x 1 cm = 1 cm3). Luego de este proceso, las muestras fueron montadas en bloques acrílicos. Las muestras se molieron inicialmente con papeles de lija de 240, 320, 400 y 600 y luego se pulieron finamente con una suspensión de alumina. La Figura 1 ilustra este proceso:

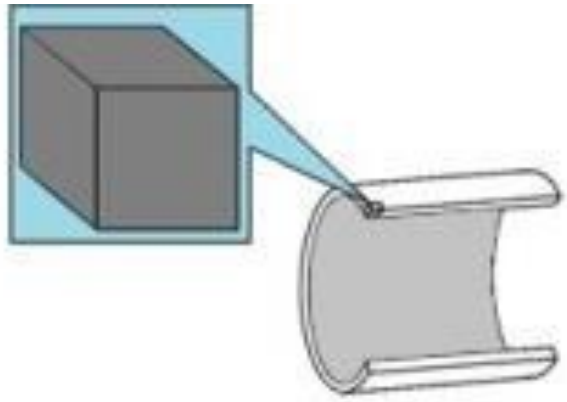


Figura 1. Extracción de muestras de tubería de acero API 5L X60.

En la Tabla 1 se muestra la composición química del acero API 5L X60 utilizado en este trabajo de investigación. La composición química del acero API 5L X60 se obtuvo mediante espectroscopía de emisión atómica.

Tabla 1. Composición del acero utilizado.

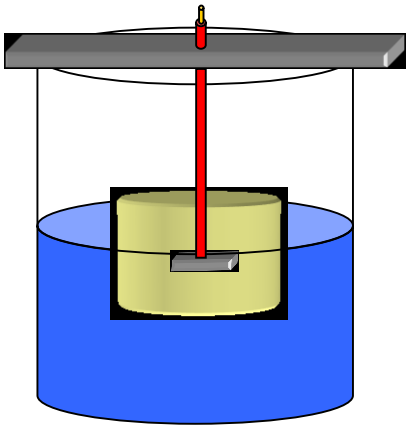
Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
Composición química	0.2	1.22	0.070	0.019	0.021	0.035	0.013	0.011
Especificaciones requeridas en la norma API 5L (máximo permitido) [17]	0.26	1.4	-	0.03	0.03	-	-	-

El análisis cuantitativo de las características microestructurales del acero API 5L X60 se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Características microestructurales del acero utilizado

Ferrita [%]	Pearlita [%]	Tamaño de grano [26]	
		ASTM	μm
76	24	6	40

Se realizaron pruebas de inmersión para estudiar la relación entre las inclusiones no metálicas encontradas en el acero API 5L X60 y la generación y crecimiento de picaduras. Las composiciones químicas de las soluciones utilizadas en las pruebas de inmersión fueron similares a las encontradas en un estudio de corrosividad del suelo en México [26-28]. El contenido químico de la solución química preparada fue de 16.84 ppm del ión SO_4 y 289.5 ppm de cloruros y el pH = 4.35 a temperatura ambiente. Las pruebas de inmersión se realizaron durante dos periodos de tiempo diferentes. Se llevó a cabo una batería de experimentos durante cortos períodos de tiempo (15, 30, 60, 180 y 360 minutos). En la otra serie de experimentos, las pruebas de inmersión se realizaron después de 1, 3 y 7 días. Con fines ilustrativos, la Figura 4 muestra la prueba de inmersión realizada como parte del presente trabajo.



Solución: 16.84ppm SO42- + 289.5ppm Cl- y pH= 4.35

Fase 1
Temperatura: 25 °C
Volumen de solución: 80 ml
Tiempo de exposición: 15, 30, 60, 180 y 360 min.

Fase 2
Temperatura: 25ºC
Volumen de solución: 1000 ml
Tiempo de exposición: 1, 3 y 7 días.

Figura 2. Esquema de las pruebas de inmersión.

Los análisis morfológicos y de ubicación de las inclusiones no metálicas se llevaron a cabo mediante microscopía óptica. De lo contrario, la composición química de las inclusiones se obtuvo mediante el método SEM-EDS. A modo de ilustración, en la Figura 3 se muestra una imagen SEM de una inclusión no metálica y un análisis EDS de la composición química.

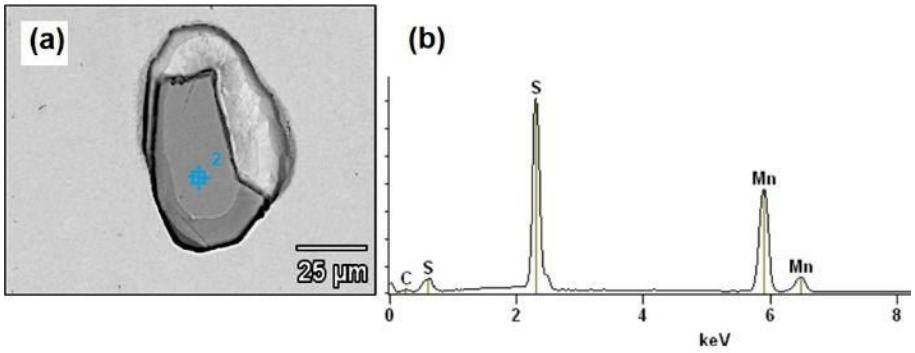


Figura 3. (a) Imagen de inclusión no metálica y (b) composición química de la inclusión obtenida por EDS.

Las inclusiones no metálicas se caracterizaron estadísticamente por tamaño (largo y ancho), factor de forma (ancho/largo), composición química y área. Asimismo, esta información se relacionó con datos obtenidos a través de la caracterización de picaduras generadas luego de la prueba de inmersión en períodos cortos de tiempo (30, 60 y 180 min). Las características de las inclusiones analizadas fueron profundidad y área. Además, caracterizamos las piscinas por su profundidad generada durante las pruebas de inmersión de mediano plazo (1, 3 y 7 días).

RESULTADOS

El primer paso para caracterizar las inclusiones no metálicas fue medir su largo y ancho. Con esta información, se puede calcular el factor de forma (ancho/largo). Estos datos se obtuvieron después de analizar una muestra en tres direcciones (dirección de rodadura (RD), dirección transversal (TD) y dirección normal (ND)).

Las Figuras 4 a 6 muestran los histogramas de largo, ancho y factor de forma, respectivamente. Estos histogramas se obtuvieron después de caracterizar todas las inclusiones de más de 1 µm encontradas en la muestra analizada.

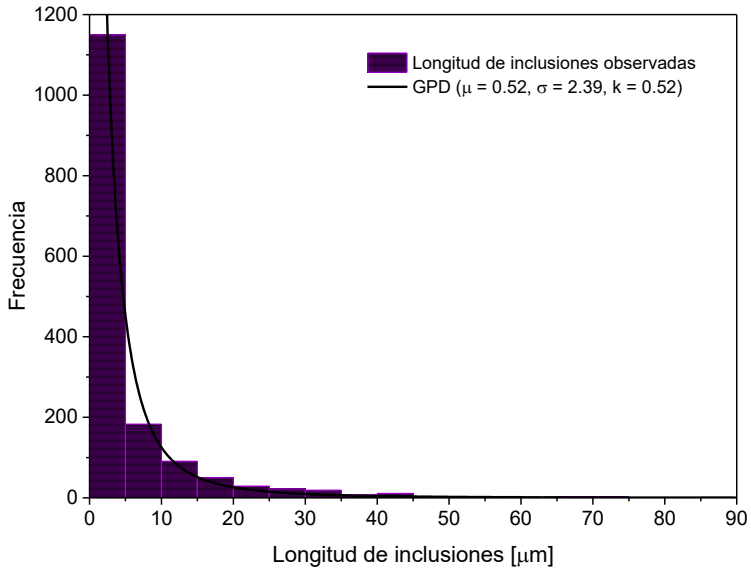


Figura 4. Distribución de las longitudes de inclusiones no metálicas.

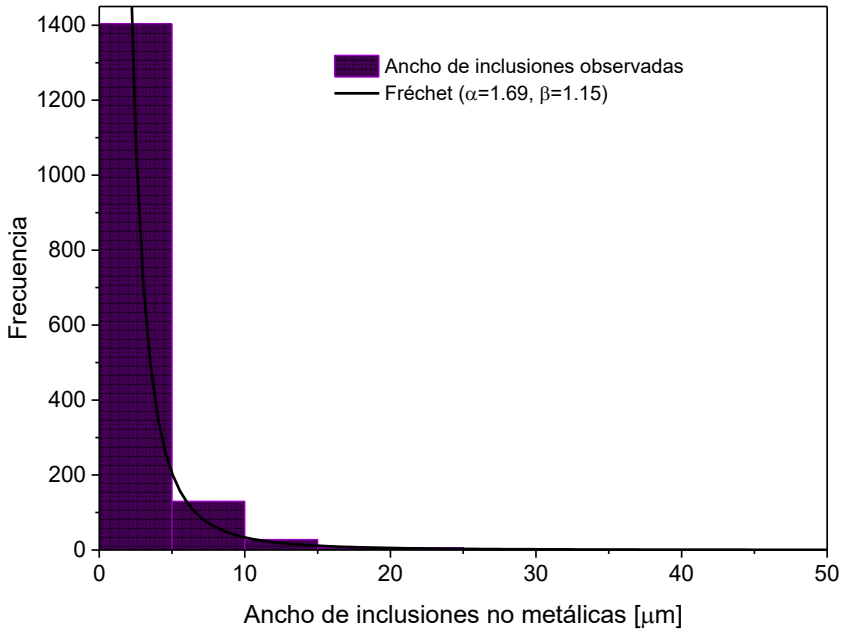


Figura 5. Distribución del ancho de inclusiones no metálicas.

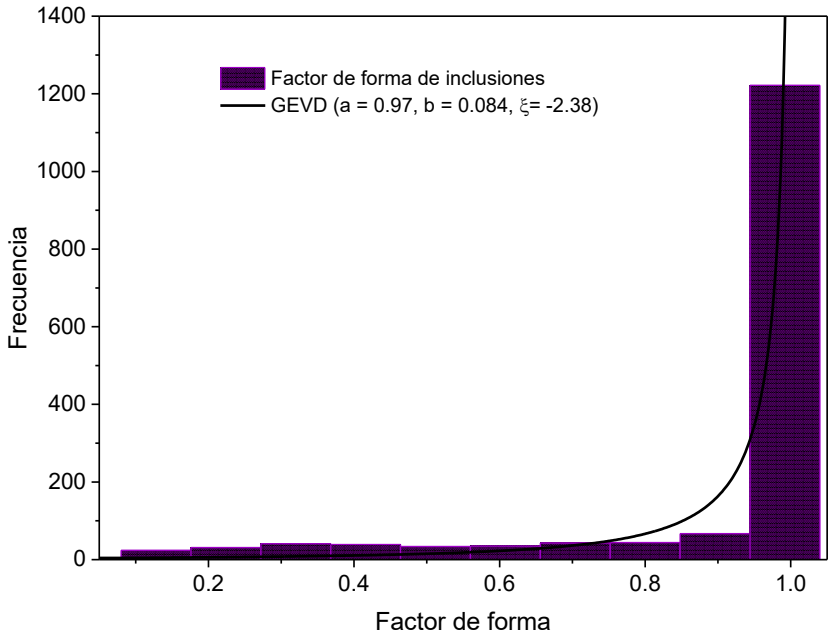


Figura 6. Distribución del factor de forma de las inclusiones no metálicas.

Comparando los resultados con otros obtenidos en la literatura [29-34], se confirma que, en todos los casos, la tendencia es que el tamaño más frecuente de las inclusiones se atribuya a aquellas inclusiones que miden menos de 10 μm de longitud.

Estos tres histogramas se ajustaron a funciones de densidad de probabilidad (PDF). La mejor elección fue la FDP que satisface las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darlin y chi-cuadrado. En cuanto a la variable aleatoria, la duración de la inclusión se ajustó a una distribución

de Pareto Generalizada (GPD). Esta función está representada por la expresión matemática indicada en la Ecuación (3) [35].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma}\left(1 + k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1-1/k} \quad (1)$$

donde μ, σ y k son los parámetros de ubicación, escala y forma, respectivamente. En cuanto al histograma del ancho de inclusión, se ajustó a la distribución de Fréchet, que está representada por la Ecuación (4) [36].

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha+1} \exp\left(-\left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha}\right) \quad (2)$$

donde α y β son los parámetros de forma y escala, respectivamente. El histograma del factor de forma se ajustó a la distribución de valores extremos generalizados (GEVD) expresada por la ecuación (5) [36].

$$f(x) = \frac{1}{b}\mathrm{Exp}\left[-(1+\xi z)^{-1/\xi}\right](1+\xi z)^{-1-1/\xi} \quad (3)$$

donde $z = \frac{x-a}{b}$, a es el parámetro de ubicación, b es el parámetro de escala y ξ es el parámetro de forma.

Luego de este análisis, es factible afirmar que las características de forma de inclusión en acero API pueden estudiarse como variables aleatorias. Esto podría ayudar a estimar las características de la forma de inclusión en las tuberías mediante el uso de teorías como el período de retorno [37]. La densidad media de inclusiones no metálicas es de 160,5 inclusiones por cm^2.

Después del análisis EDS de la composición química de las inclusiones no metálicas estudiadas, se encontró que la gran mayoría de ellas eran compuestos de MnS (alrededor del 74%). Los silicatos fueron el segundo tipo de inclusiones más frecuente (principalmente SiO_2 y $CaOSiO_2$), representando alrededor del 12% del total. Las inclusiones restantes fueron compuestos de Al_2O_3, $3CaO{\cdot}Al_2O_3$, $CaO{\cdot}Al_2O_3$, $CaO{\cdot}2Al_2O_3$, $CaO{\cdot}6Al_2O_3$, FeSiC, FeSiO, AlCaO, AlMgCaO, etc. La Figura 7 muestra las distribuciones de las inclusiones no metálicas encontradas.

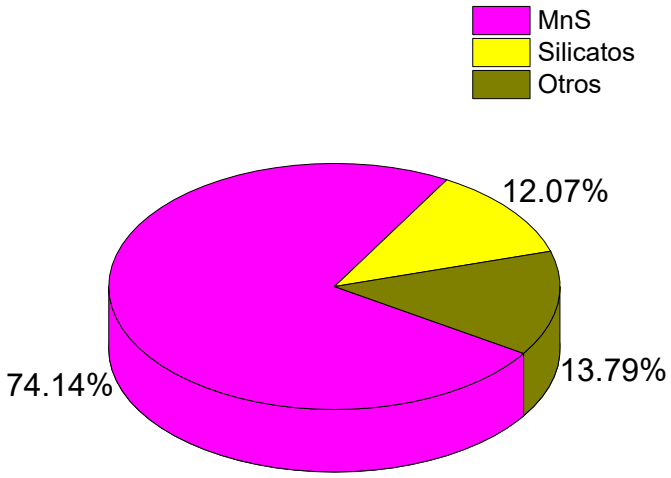


Figura 7. Inclusiones no metálicas encontradas en el acero API 5L X60 estudiado.

Con el propósito de ejemplificar, la Tabla 3 muestra la relación tiempo de inmersión, numero de inclusiones encontradas, número de picaduras generadas y la composición química de las inclusiones activas.

Tabla 3. Resumen de la relación entre el total de inclusiones no metálicas y el lugar donde se nuclearon las picaduras.

Tiempo de inmersión (min)	Número de inclusiones	Número de picaduras generadas	Sitios de nucleación (%)	Composición química de inclusiones activas		
				MnS	Silicatos	Otros
30	600	14	2.33	14	0	0
60	717	25	3.49	16	3	6
180	610	18	2.95	13	1	4

Con el fin de encontrar una relación entre el área de inclusión y el área de picaduras, trazamos un diagrama de dispersión como se muestra en la Figura 8. Se puede notar una mayor correlación entre el área de inclusión y el área de picaduras cuando el área de inclusión es menor que 200 μm2 (rho de Spearman igual a 0,50). Cuanto menor sea el área de inclusión, mayor será la probabilidad de provocar corrosión por picaduras.

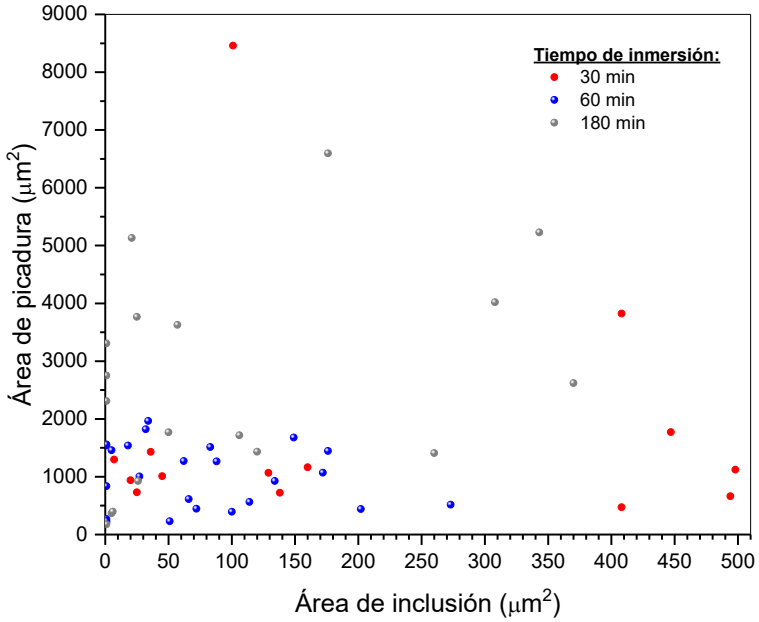


Figura 8. Diagrama de dispersión de la relación entre el área de inclusión no metálica y el área de picadura.

Con el fin de analizar el comportamiento de la evolución de la profundidad de la corrosión por picaduras, los datos observados se ajustaron a la distribución generalizada de valores extremos (GEVD) porque esta distribución se ha utilizado previamente para representar esta evolución en la literatura [38-39]. Después del ajuste, es factible observar la evolución del parámetro de forma hacia valores menos negativos (ver Tabla 4). En la Figura 9, notamos que la profundidad de corrosión por picaduras obtenida después de la prueba de inmersión de 7 días muestra una curtosis más positiva (de la mayoría de los valores observados cercanos a la media). Por otro lado, las profundidades obtenidas después de la prueba de inmersión de 7 días generan una distribución sesgada a la derecha.

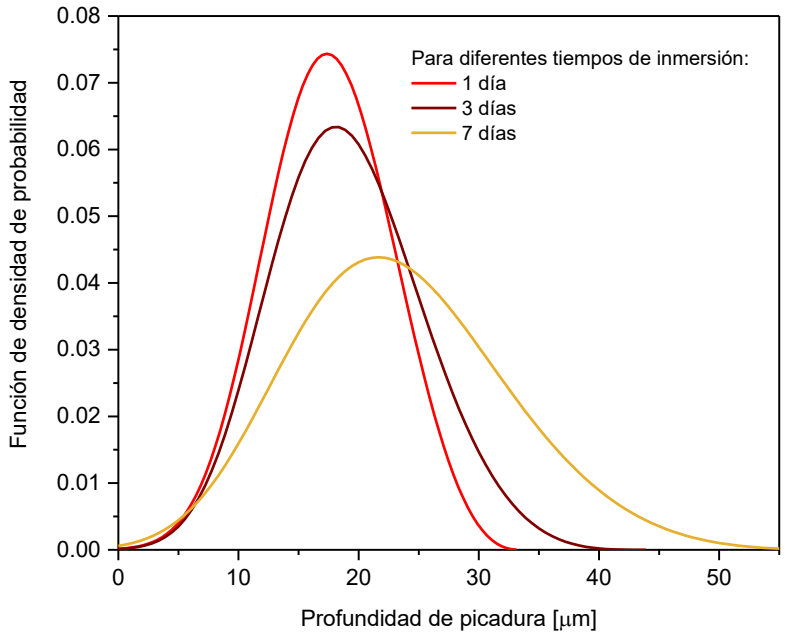


Figura 9. Distribución de profundidad de picadura a diferentes tiempos de inmersión.

Tabla 4. Parámetros de la GEVD de profundidad de defectos obtenida de las pruebas de inmersión a diferentes tiempos de generación de picaduras (ver figura 9). distribución

Parámetro	Tiempo de inmersión		
	1 día	3 días	7 días
ξ	−0.29	−0.21	−0.19
b	5.18	5.94	8.55
a	15.66	16.70	19.86

La naturaleza estocástica de la corrosión por picaduras ha sido reconocida desde la década de 1950 [37, 40-41] Parece que esta característica aleatoria podría ser causada por la misma naturaleza aleatoria de las características de inclusión no metálicas (por ejemplo, longitud, ancho y factor de forma) estudiadas en el presente trabajo de investigación. La distribución de Pareto generalizada (GPD), la distribución de valores extremos generalizados (GEVD) y la distribución de Gumbel son funciones típicamente utilizadas para estudiar el fenómeno de corrosión por picaduras [37] y, en esta investigación, permanecieron como las distribuciones preferidas que se ajustan a varias picaduras. características (por ejemplo, área y profundidad). El GEVD representa adecuadamente la evolución de la profundidad de la corrosión por picaduras sufrida tras 1, 3 y 7 días de inmersión.

La mayoría de las inclusiones encontradas y analizadas eran compuestos de MnS y tendían a convertirse en inclusiones activas cuando entraban en contacto con un ambiente corrosivo. Del número total de inclusiones encontradas (independientemente de su composición química), sólo entre el dos y el tres por ciento se volvieron activas. Parece que las inclusiones no metálicas con

áreas más pequeñas tienden a generar defectos de corrosión por picaduras con mayor probabilidad que las de mayor tamaño.

CONCLUSIONES

Luego de considerar los resultados obtenidos y su correspondiente análisis, podemos enunciar las siguientes conclusiones para enfatizar la relación entre las inclusiones no metálicas y los defectos de corrosión por picaduras:

• Las distribuciones de probabilidad como las de Valor Extremo Generalizado, Pareto Generalizado y Gumbel pueden representar satisfactoriamente la naturaleza aleatoria de las características de inclusión no metálicas, es decir, longitud, ancho y factor de forma.

• La distribución generalizada de valores extremos se ajusta adecuadamente a los histogramas de profundidad de la picadura en las pruebas de inmersión a medio plazo (1, 3 y 7 días). El parámetro de forma de esta distribución tiende a capturar el cambio en la asimetría y la curtosis debido a la evolución de la profundidad y la aparición de picaduras nuevas y poco profundas.

• Las inclusiones con áreas más pequeñas tienden a generar picaduras. De hecho, existe una correlación moderada entre el área de inclusión y el área de picadura.

• Las inclusiones de MnS son más frecuentes en el acero API 5L X60 que en otro tipo de inclusiones.

REFERENCIAS

1. Omonbude, E.J. “The Economics of Transit Oil and Gas Pipelines: A Review of the Fundamentals”. OPEC Energy Rev. 2009, 33, 125–139.
2. IEA. Analysis and forecast to 2026. Available online: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fossil-fuel-use-by-scenario-2020-2030-and-2050 (30 Abril 2023).
3. Kraidi, L.; Shah, R.; Matipa, W.; Borthwick, F. An Investigation of Mitigating the Safety and Security Risks Allied with Oil and Gas Pipeline Projects. J. Pipeline Syst. Eng. 2021, 1, 349–359.
4. Wan, C.; Mita, A. Recognition of Potential Danger to Buried Pipelines Based on Sounds. Struct. Control. Health Monit. 2008, 17, 317–337.
5. Mahmoodian, M.; Li, C.Q. Failure Assessment and Safe Life Prediction of Corroded Oil and Gas Pipelines. J. Pet. Sci. Eng. 2017, 151, 434–438.
6. Ossai, C.I. Advances in Asset Management Techniques: An Overview of Corrosion Mechanisms and Mitigation Strategies for Oil and Gas Pipelines. ISRN Corros. 2012, 2012, 570143.
7. Velázquez, J.C.; González-Arévalo, N.E.; Díaz-Cruz, M.; Cervantes-Tobón, A.; Herrera-Hernández, H.; Hernández-Sánchez, E. Failure Pressure Estimation for an Aged and Corroded Oil and Gas Pipeline: A Finite Element Study. J. Nat. Gas. Sci. Eng. 2022, 101, 104532.
8. Velázquez, J.C.; Caleyo, F.; Hallen, J.M.; Romero-Mercado, O.; Herrera-Hernandez, H. Probabilistic Analysis of Different Methods Used to Compute the Failure Pressure of Corroded Steel Pipelines. Int. J. Electrochem. Sci. 2013, 2013, 11356–11370.
9. Caleyo, F.; Alfonso, L.; Alcántara, J.; Hallen, J.M. On the Estimation of Failure Rates of Multiple Pipeline Systems. J. Press. Vessel. Technol. 2008, 130, 021704.
10. Velázquez, J.C.; Caleyo, F.; Valor, A.; Venegas, V.; Espina-Hernández, J.H.; Hallen, J.M.; López, M.R. Study Helps Model Buried Pipeline Pitting Corrosion. Oil Gas J. 2009, 107, 64–73.

11. Velázquez, J.C.; Valor, A.; Caleyo, F.; Venegas, V.; Espina-Hernandez, J.H.; Hallen, J.M.; Lopez, M.R. Pitting Corrosion Models Improve Integrity Management, Reliability. Oil Gas J. 2009, 107, 52–62.
12. Caleyo, F.; Valor, A.; Venegas, V.; Espina-Hernandez, J.H.; Velázquez, J.C.; Hallen, J.M. Accurate Corrosion Modeling Improves Reliability Estimations. Oil Gas J. 2012, 110, 122–129.
13. Smialowski, M.; Szklarska-Smialowska, Z.; Rychcik, M.; Szummer, A. Effect of Sulphide Inclusions in a Commercial Stainless Steel on the Nucleation of Corrosion Pits. Corros. Sci. 1969, 9, 123–125.
14. Park, J.H.; Kang, Y. Inclusions in Stainless Steels—A Review. Steel Res. Int. 2017, 88, 1700130.
15. Li, D.; Huang, F.; Lei, X.; Jin, Y. Localized Corrosion of 304 Stainless Steel Triggered by Embedded MnS. Corros. Sci. 2023, 211, 110860.
16. Kovalov, D.; Taylor, C.D.; Heinrich, H.; Kelly, R.G. Operando Electrochemical TEM, Ex-Situ SEM and Atomistic Modeling Studies of MnS Dissolution and Its Role in Triggering Pitting Corrosion in 304L Stainless Steel. Corros. Sci. 2022, 199, 110184.
17. American Petroleum Institute. API 5L Specifications for Line Pipe. In American Petroleum Institute; API: Houston, TX, USA, 2007.
18. Wang, L.; Xin, J.; Cheng, L.; Zhao, K.; Sun, B.; Li, J.; Wang, X.; Cui, Z. Influence of Inclusions on Initiation of Pitting Corrosion and Stress Corrosion Cracking of X70 Steel in Near-Neutral PH Environment. Corros. Sci. 2019, 147, 108–127.
19. Liang, H.; Asselin, E. Ex Situ Examination of Matrix and Inclusions of API-X100 before and after Exposure to Bitumen at Elevated Temperature. Materials 2021, 14, 5007. https://doi.org/10.3390/ma14175007.
20. Krawiec, H.; Vignal, V.; Heintz, O.; Oltra, R.; Krawiec, H.; Chauveau, E. Dissolution of Chromium-Enriched Inclusions and Pitting Corrosion of Resulfurized Stainless Steels. Metall. Mater. Trans. A 2006, 37, 1541–1549.
21. Park, I.-J.; Lee, S.-M.; Kang, M.; Lee, S.; Lee, Y.-K. Pitting Corrosion Behavior in Advanced High Strength Steels. J. Alloys. Compd. 2015, 619, 205–210.
22. Avci, R.; Davis, B.H.; Wolfenden, M.L.; Beech, I.B.; Lucas, K.; Paul, D. Mechanism of MnS-Mediated Pit Initiation and Propagation in Carbon Steel in an Anaerobic Sulfidogenic Media. Corros. Sci. 2013, 76, 267–274.
23. Li, Y.; Liu, J.; Deng, Y.; Han, X.; Hu, W.; Zhong, C. Ex Situ Characterization of Metallurgical Inclusions in X100 Pipeline Steel before and after Immersion in a Neutral PH Bicarbonate Solution. J. Alloys. Compd. 2016, 673, 28–37.
24. Muto, I.; Ito, D.; Hara, N. Microelectrochemical Investigation on Pit Initiation at Sulfide and Oxide Inclusions in Type 304 Stainless Steel. J. Electrochem. Soc. 2009, 156, C55.
25. Xue, H.B.; Cheng, Y.F. Characterization of Inclusions of X80 Pipeline Steel and Its Correlation with Hydrogen-Induced Cracking. Corros. Sci. 2011, 53, 1201–1208.
26. ASTM International. ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size; ASTM Internacional: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
27. ASTM International. ASTM E45-18a Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel; ASTM Internacional: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
28. Velázquez, J.C.; Caleyo, F.; Valor, A.; Hallen, J.M. Field Study—Pitting Corrosion of Underground Pipelines Related to Local Soil and Pipe Characteristics. Corrosion 2010, 66, 016001–016001–016005.
29. McMahon, D.; TOPA, D.M. A Beginner's Guide To Mathematica; Chapman & Hall/CRC: New York, NY, USA, 2006.
30. Coles, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values; Springer-Verlag: London, UK, 2001.

31. Villavicencio, J.; Ulloa, N.; Lozada, L.; Moreno, M.; Castro, L. The role of non-metallic Al2O3 inclusions, heat treatments and microstructure on the corrosion resistance of an API 5L X42 steel. J. Mater. Res. Technol. 2020, 9, 5894–5911.
32. Beidokhti, B.; Koukabi, A.H.; Dolati, A. Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel. J. Mater. Process. Technol. 2009, 209, 4027–4035.
33. Pourazizi, R.; Mohtadi-Bonab, M.A.; Szpunar, J.A. Role of texture and inclusions on the failure of an API X70 pipeline steel at different service environments. Mater. Charact. 2020, 164, 110330.
34. Mostafijur Rahman, K.M.; Mohtadi-Bonab, M.A.; Ouellet, R.; Szpunar, J.; Zhu, N. Effect of electrochemical hydrogen charging on an API X70 pipeline steel with focus on characterization of inclusions. Int. J. Press. Vessels Pip. 2019, 173, 147–155.
35. Zhang, J.M.; Zhang, J.F.; Yang, Z.G.; Hui, W.J.; Weng, Y.Q. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel. Mater. Sci. Eng. A 2005, 394, 126–131.
36. Castillo, E. Extreme Value Theory in Engineering, First Edition.; Academic Press: New York, NY, USA, 1988.
37. Castillo, E.; Hadi, A.S.; Balakrishnan, N.; Sarabia, J.M. Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2005.
38. Caleyo, F.; González, J.L.; Hallen, J.M. A Study on the Reliability Assessment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects. Int. J. Press. Vessel. Pip. 2002, 79, 77–86.
39. Caleyo, F.; Velázquez, J.C.; Valor, A.; Hallen, J.M. Probability Distribution of Pitting Corrosion Depth and Rate in Underground Pipelines: A Monte Carlo Study. Corros. Sci. 2009, 51, 1925–1934.
40. Rivas, D.; Caleyo, F.; Valor, A.; Hallen, J.M. Extreme Value Analysis Applied to Pitting Corrosion Experiments in Low Carbon Steel: Comparison of Block Maxima and Peak over Threshold Approaches. Corros. Sci. 2008, 50, 3193–3204.
41. Fontana, M. Corrosion Engineering, 3rd ed.; Mc Graw-Hill: New York, NY, USA, 1986.

AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE FLUJO CONTINUO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE MICROPLASTICOS EN UN MEDIO ACUOSO

Edgar Josué Camargo Pedraza, J. Ascención Guerrero-Viramontes, Ma. Rosario González Mota, María de la Luz Medina Huerta

Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
G22153209@aguascalientes.tecnm.mx

RESUMEN

En la última década, el interés en el estudio de los microplásticos ha crecido significativamente debido a su persistencia en el medio ambiente y su impacto negativo en los ecosistemas y la salud humana. La cuantificación precisa de estos contaminantes presenta desafíos importantes, ya que las técnicas disponibles suelen ser complejas, costosas y propensas a errores, particularmente los métodos visuales que dependen de la percepción humana. Las técnicas reportadas en la literatura requieren la separación previa de los MPs del medio acuoso, lo que agrega complejidad y posibles fuentes de error al proceso de análisis. Además, la falta de métodos estandarizados para la cuantificación de microplásticos dificulta la comparación de resultados entre estudios y limita la comprensión global del problema. Para abordar estas limitaciones, se desarrolló un sistema que integra tecnologías de flujo continuo, Raspberry Pi y Python para la captura automatizada de imágenes de microplásticos en medios acuosos. Este sistema utiliza un mezclador magnético para mantener las partículas en suspensión, evitando su sedimentación y flotación, facilitando su visualización y captura de imágenes. La tecnología Raspberry Pi se emplea para controlar el sistema, permitiendo la captura automática de imágenes de los microplásticos. El lenguaje de programación Python se utiliza para desarrollar una interfaz gráfica que simplifica el control del sistema y la adquisición de datos. Además de la captura de imágenes, se llevó a cabo un análisis de las velocidades de sedimentación y flotación de los microplásticos utilizando principios de mecánica de fluidos. Estos cálculos proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento de las partículas en medios acuosos y su capacidad para mantenerse en suspensión o sedimentarse. Los resultados preliminares demuestran que el sistema desarrollado es efectivo para la captura de imágenes de microplásticos en medios acuosos. La integración de tecnologías de flujo continuo, Raspberry Pi y Python ofrece una solución automatizada y eficiente para el análisis de microplásticos, lo que puede contribuir significativamente a la comprensión y mitigación de la contaminación por plásticos en entornos acuáticos. Este enfoque representa un paso importante hacia la estandarización de métodos de análisis de microplásticos y la gestión efectiva de este problema ambiental emergente.

INTRODUCCIÓN

Se han desarrollado técnicas como la espectroscopia Raman e infrarroja, calorimetría, microscopía y detección visual para identificarlos, que requieren separar los microplásticos del medio. La detección tradicionalmente dependía de la habilidad visual, pero ahora se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático, reduciendo la necesidad de intervención humana.

La integración de tecnologías de flujo continuo, Raspberry Pi y Python ofrece una solución automatizada y eficiente para el análisis de microplásticos, lo que puede contribuir significativamente a la comprensión y mitigación de la contaminación por plásticos en entornos acuáticos.

TEORÍA

Microplásticos

Los MPs son polímeros sintéticos de 0.001 a 5 mm de tamaño. Se categorizan por su origen: pueden ser fabricados de ese tamaño o formarse por la fragmentación de polímeros más grandes [1]- [3].

Clasificación de MPs

a) Primarios: Fabricados en tamaños microscópicos para cosméticos, productos de higiene, agentes de limpieza, vectorización de fármacos, abrasivos de arenado y en la impresión 3D. Su forma más común es esférica [1], [5].

b) Secundarios: Se generan cuando los microplásticos se fragmentan por efectos físicos, químicos y biológicos en el ambiente. Pueden provenir de bolsas, cajas, botellas, redes, sogas y ropa, donde la degradación puede ocurrir durante el lavado [1], [5], [6].

Contaminación por MPs

Los MPs generan problemas ambientales debido a su tamaño, mezclándose con microorganismos e ingresando a las cadenas tróficas, afectando diferentes medios como suelos, atmósfera y agua [1], [2].

a) Suelos: La contaminación proviene de rellenos sanitarios, reparaciones de suelo, lodos de drenaje, agua reciclada, compostaje, plásticos agrícolas, desgaste de llantas y precipitaciones. Esto cambia las propiedades fisicoquímicas del suelo, afectando la retención de agua, fertilidad, presencia de nutrientes y flujo de oxígeno [7].

b) Atmósfera: Los MPs se encuentran suspendidos en la atmósfera y pueden llegar a áreas remotas. Transportan tóxicos como DDT y hexaclorobenceno, amenazando a los microorganismos [8].

c) Agua: Los MPs están presentes en todas las formas de agua, sedimentándose en fondos de lagos y mares. Provienen de fibras de lavado de ropa y productos de higiene desechados en el desagüe. Son ingeridos por microorganismos y fauna, transportando sustancias como metales pesados, alterando las características químicas del agua [6].

Hidrodinámica

a) Flotación y Sedimentación de Plásticos en Agua:

La flotación depende de la densidad de los materiales según el principio de Arquímedes: un objeto flotará si su densidad es menor que la del agua (1 g/cm³ a 4°C). La sedimentación es el depósito de partículas en el fondo del agua debido a la gravedad, influenciado por la densidad, tamaño, forma y viscosidad del líquido. Los factores que afectan la sedimentación de microplásticos pueden ser: Tamaño y Forma; Partículas grandes e irregulares sedimentan más rápido; Densidad Relativa; Plásticos con densidades mayores que la del agua se hunden más rápido; Bioincrustación; Organismos biológicos en la superficie de los plásticos aumentan su densidad y tasa de sedimentación [9], [10].

b) Densidades de Plásticos Comunes:

La densidad de un plástico determina su capacidad para flotar o hundirse: PET (Polietileno Tereftalato): 1.34 – 1.39 g/cm³; PE (Polietileno): 0.91 – 0.96 g/cm³; PP (Polipropileno): 0.90 – 0.92 g/cm³; PS (Poliestireno): 1.04 – 1.06 g/cm³ [11].

c) Tensión Superficial y Microplásticos:

La tensión superficial es la fuerza en la superficie de un líquido que actúa como una membrana elástica. En el agua, esta es alta debido a los enlaces de hidrógeno entre sus moléculas. Los microplásticos, por su pequeño tamaño e hidrofobicidad, interactúan de manera compleja con la tensión superficial del agua, afectando su dispersión y comportamiento [12], [13].

La densidad de los microplásticos varía según el tipo de polímero y aditivos. Los microplásticos con densidades inferiores a la del agua flotan, mientras que los que tienen densidades superiores se hunden. Factores como el bioincrustación y la agregación pueden alterar la densidad de los microplásticos. La tensión superficial puede mantener a los microplásticos pequeños (menos de 5 mm) en la superficie del agua, influyendo en su transporte y distribución en los ecosistemas acuáticos [14], [15].

Técnicas ópticas

La óptica estudia el comportamiento y propiedades de la luz, que puede comportarse como onda y partícula. Esta rama de la física tiene aplicaciones cotidianas y tecnológicas, como en lentes y cámaras fotográficas. La luz, como onda, muestra distintos colores según su longitud de onda [16], [17].

Fuentes de iluminación

Una fuente de iluminación emite radiación electromagnética visible, perceptible por el ojo humano o sistemas de detección. Sus características incluyen eficiencia luminosa, duración, y temperatura del color. Existen diversos tipos, como lámparas fluorescentes, de vapor de sodio, halogenuros, LEDs y láseres. Los LEDs y láseres son especialmente importantes por sus aplicaciones industriales, científicas y domésticas [16] - [19].

a) Fuentes LED:

El LED (Diodo Emisor de Luz) es un dispositivo fotónico hecho de un material semiconductor con dos terminales. Emite luz al recibir energía eléctrica. Es importante por su amplia gama de aplicaciones y fácil fabricación comparada con el láser. Consiste en una unión P-N que emite fotones al recombinar cargas. Los LEDs pueden ser de alta o baja potencia y se fabrican con diversos materiales como arseniuro de galio y nitruro de galio. Están disponibles en colores desde el infrarrojo hasta el ultravioleta y blanco [20].

Cámaras Digitales

Una cámara fotográfica básica consiste en una caja cerrada a la luz, un lente convergente y una película para capturar la imagen. Las cámaras digitales modernas usan un CCD (Charged-Coupled Device) que convierte la luz en señales eléctricas. La resolución es una característica clave, definida como la densidad de puntos con información de brillo y color en una imagen [16], [21], [22].

Los lentes, hechos de materiales como acrílico o vidrio, son cruciales en las cámaras, afectando factores como el zoom, el ángulo, la nitidez y la saturación del color. Los lentes se emparejan según el tipo de sensor de la cámara, determinando su uso [16], [23]-[25].

a) Cámaras Industriales

Las cámaras industriales son parte de los sistemas de visión artificial, usadas en seguridad y líneas de montaje. Capturan imágenes mediante sensores para análisis y procesamiento. Existen varios tipos, como cámaras matriciales, lineales, de alta velocidad, 3D, infrarrojas, térmicas y panorámicas, variando en tamaño y forma según su aplicación [26].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Sistema de captura de imágenes

Actualmente se tiene un sistema como se muestra en la Fig. 1. El sistema óptico se compone de una cámara para adquisición de las imágenes que serán procesadas a través de Redes Neuronales Convolucionales (CNN), una fuente de iluminación, una lente y una celda que contiene la muestra liquida con MPs; para el propósito de este estudio se revisaran las dimensiones de la celda, las cuales son 12.5 mm de ancho 12.5 mm de profundidad y 45 mm de alto, teniendo una capacidad de 3.5 ml, el material del que se encuentra fabricado es de vidrio óptico para flourómetro.

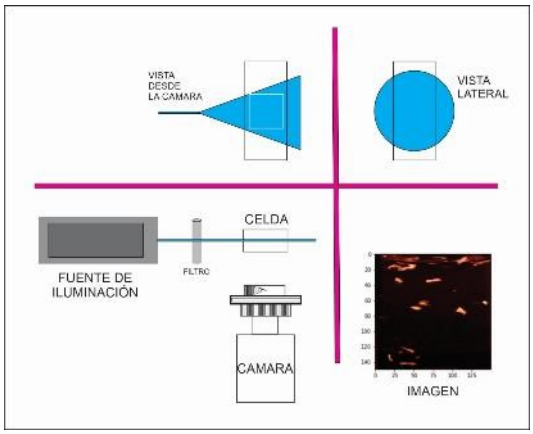


Fig. 1 Esquema del sistema óptico para detección de Microplásticos.

A partir de esta celda se diseñó una nueva con dimensiones mayores para poder procesar muestras con mayores concentraciones y capacidad de al menos 40 ml, por lo que se diseñaron diferentes versiones preliminares, las cuales fueron probadas con el sistema de flujo continuo, y el sistema de captura de imágenes para seleccionar la que permitiera un movimiento libre a los MPs evitando la superposición y flotación, y manteniendo la profundidad de campo de 10 mm. Las celdas diseñadas fueron una celda de 120 ml con dimensiones de 120 mm de ancho, 100 mm de alto y 10 mm de profundidad; otra celda se diseñó de 240 ml de capacidad, con 140 mm de alto, 120 mm de ancho, 10 mm de profundidad en su primera sección y una ampliación a 50 mm en su base por último se diseñó una celda con capacidad para 40 ml con dimensiones de 75 mm de alto, 50 mm de ancho y 15 mm de profundidad como se muestra en la Fig. 2.

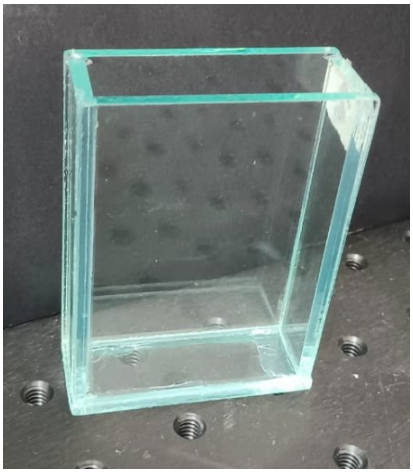


Fig. 2 Celdas diseñadas y fabricadas para el sistema de flujo continuo

Sistema de impulsores.

Los MPs son partículas pequeñas, menores a cinco mm, que pueden obstruir bombas tradicionales al acumularse en las uniones del mecanismo. Además, al cambiar de muestra en un arreglo hidráulico, los MPs pueden concentrarse en codos o aletas, complicando su extracción y afectando mediciones posteriores.

Para evitar estos problemas, se usó un impulsor que puede introducirse en la mezcla sin uniones exteriores. Los mezcladores magnéticos, que funcionan con electroimanes, fueron seleccionados porque no requieren conexión mecánica. El impulsor elegido debe ser menor a 10 mm para adaptarse a la celda diseñada. Se utilizaron impulsores magnéticos de 8x4 mm, para maximizar la superficie de la paleta impulsora.

Control de Equipos mediante Raspberry Pi 4.

El control de diversos equipos dentro del sistema automatizado se realiza mediante una Raspberry Pi 4. Utilizando un banco de relevadores de 5 volts, accionados por una señal de 3.3V proveniente de los pines GPIO (General-Purpose Input/Output) de la Raspberry Pi, se logra el encendido y apagado de diferentes dispositivos esenciales para el funcionamiento del sistema. Estos dispositivos incluyen:

a) Mezclador Magnético:

Controlado para garantizar una homogeneización constante de las muestras de agua, evitando la sedimentación de partículas y asegurando una distribución uniforme de los microplásticos en el flujo continuo.

b) LED Azul:

Utilizado para la iluminación específica durante la captura de imágenes, mejorando el contraste y la visibilidad de los microplásticos en las fotografías obtenidas. La elección del LED azul se debe a su eficacia en resaltar partículas de plástico en soluciones acuosas.
c) Sistema de Bombeo de Aire:
Integrado para mantener el flujo de aire necesario. Este sistema asegura que las partículas no se acumulen en un solo lugar, facilitando una captura de imágenes sin superposición.

Interfaz de Usuario Amigable con Tkinter.
Para facilitar la operación y el control del sistema, se desarrolló una interfaz de usuario amigable utilizando la biblioteca Tkinter de Python. Esta interfaz permite al usuario gestionar todos los sistemas de manera eficiente, proporcionando varias funcionalidades clave:
a) Control de Iluminación:
La interfaz permite seleccionar diferentes tipos de iluminación según las necesidades del análisis. Los usuarios pueden cambiar entre varias fuentes de luz para optimizar la visibilidad de los microplásticos en las muestras de agua.
b) Visualización en Tiempo Real:
La interfaz incluye una sección de visualización en tiempo real que muestra el objetivo de la cámara. Esto permite a los usuarios hacer ajustes precisos en la posición y enfoque de la cámara, asegurando que las imágenes capturadas sean de alta calidad.
c) Automatización de Cámara:
La interfaz permite la automatización de la captura de imágenes permitiendo la adquisición de imágenes de manera continua.

RESULTADOS

La Fig 3 muestra el sistema automatizado controlado mediante una interfaz de Tkinter, el cual incluye un compresor de aire de 700 psi, un mezclador magnético de 1 mm, una celda de 40 ml, una cámara Raspberry Pi y una fuente de iluminación.

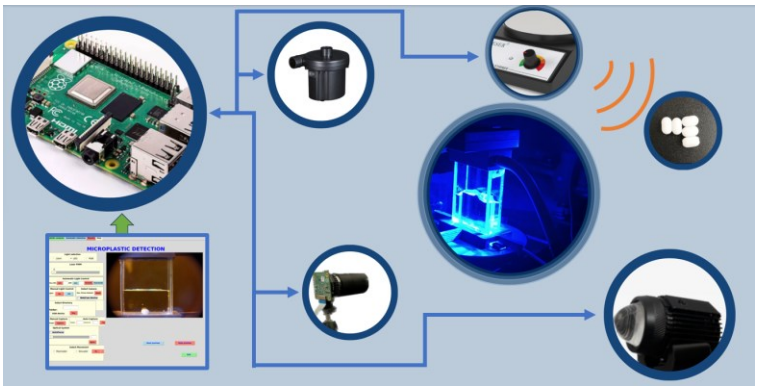


Fig 3. Esquema del Sistema automatizado para captura de microplásticos

Las imágenes obtenidas muestran microplásticos en flujo continuo, y la automatización permitió capturar 1700 imágenes por hora, así como recortarlas a una velocidad de 650 imágenes por minuto.

La Fig 4 A) muestra la imagen obtenida con una celda de 3.5 ml sin flujo, que contiene 10 partículas. En la Fig 4 B) se pueden observar los microplásticos en movimiento en una celda de 40 ml con 45 partículas. Por otro lado, la Fig 4 C) presenta la imagen ya recortada.

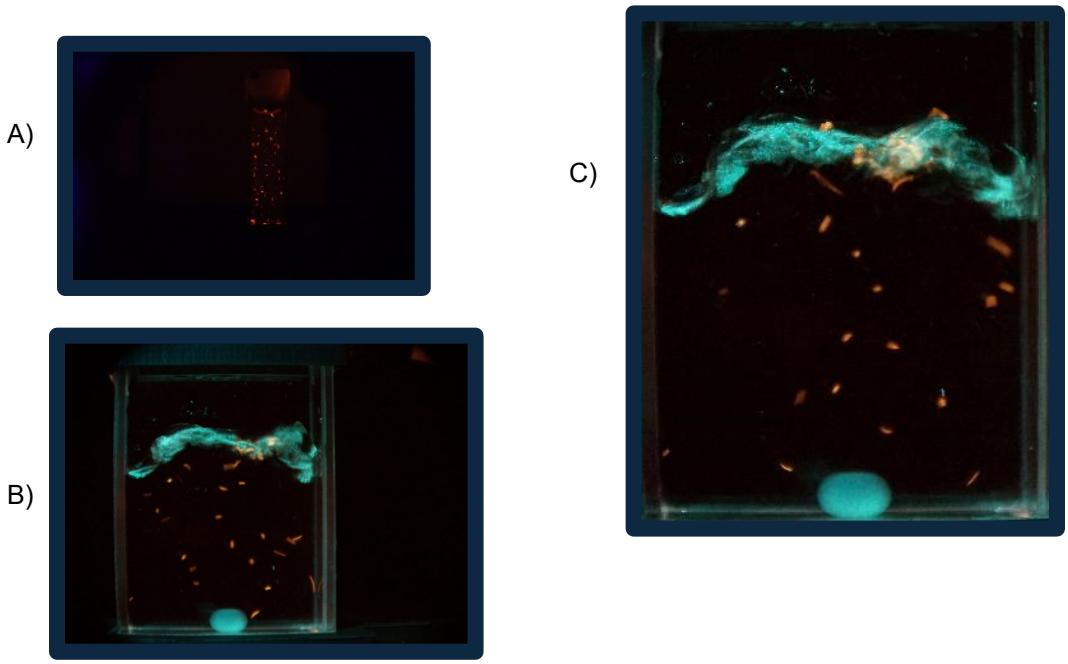


Fig 4. Comparación de Imágenes obtenidas con el sistema

CONCLUSIONES

El uso de este sistema representa un avance significativo en el proceso de detección de microplásticos. Al automatizar el sistema electrónico y la captura de imágenes, se reducen considerablemente los tiempos de procesamiento. Las imágenes obtenidas confirman que se logró el objetivo de evitar la superposición y aglomeración de microplásticos, lo que facilita su futura detección y cuantificación. Este sistema de adquisición de imágenes permite un siguiente paso, utilizar software de procesamiento de imágenes o inteligencia artificial para un análisis más preciso y eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

.

1. Wilson & Wilsons, Characterization and Analysis of Microplastics, vol. 75. Aveiro, Portugal: University of Aveiro, CESAM, 2017.
2. W. J. Shim, S. H. Hong, and S. E. Eo, “Identification methods in microplastic analysis: A review,” Analytical Methods, vol. 9, no. 9. Royal Society of Chemistry, pp. 1384–1391, Mar. 07, 2017. doi: 10.1039/c6ay02558g.
3. T. Rocha-Santos, M. F. Costa, and C. Mouneyrac, “Handbook of Microplastics in the Environment.”
4. T. Kreis, “Speckle Metrology,” in *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996), Chapter 4, pp. 125-149.
5. C. B. Crawford and B. Quinn, “Microplastics, standardisation and spatial distribution,” in Microplastic Pollutants, Elsevier, 2017, pp. 101–130. doi: 10.1016/b978-0-12-809406-8.00005-0.
6. C. Blair. Crawford and B. Quinn, Microplastic pollutants. Elsevier, 2017.
7. J. J. Guo et al., “Source, migration and toxicology of microplastics in soil,” Environment International, vol. 137. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2020. doi: 10.1016/j.envint.2019.105263.

8. Y. Zhang, S. Kang, S. Allen, D. Allen, T. Gao, and M. Sillanpää, “Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives,” Earth-Science Reviews, vol. 203. Elsevier B.V., Apr. 01, 2020. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103118.
9. W. M. Haynes, Ed., "CRC Handbook of Chemistry and Physics," 95th ed. CRC Press, 2014.
10. L. C. Yonkos, C. A. Friedel, et al., "Role of Surface Tension in the Formation and Floating of Microplastic," Environmental Science & Technology, vol. 54, no. 4, pp. 2341-2350, Feb. 2020.
11. S. Ebnesajjad, "Plastic Films in Food Packaging: Materials, Technology and Applications," 1st ed. William Andrew Publishing, 2012.
12. P. Atkins, J. de Paula, "Physical Chemistry," 9th ed. Oxford University Press, 2010.
13.] M. Wagner, S. Lambert, et al., "Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review," Science of the Total Environment, vol. 768, pp. 144-152, Mar. 2021.
14. S. G. Andersson, P. Tiselius, et al., "Surface tension effects on microplastic buoyancy," Marine Pollution Bulletin, vol. 150, pp. 110-117, Dec. 2019.
15. L. J. Cole, H. Webb, et al., "The Impact of Microplastics on Freshwater Organisms: A Review," Water Research, vol. 196, pp. 117-129, Jan. 2021.
16. Serway Raymond A. and Beichner Robert J., Física Para Ciencias e Ingenieria, Quinta Edicion., vol. II. México: McGraw-Hill, 2002.
17. Malacara Daniel, Óptica Básica, 2da ed. Fondo de Cultura Economica México, 2004.
18. G. Rodríguez Morales, F. Sánchez Cruz, and S. Martínez Martínez, “Ingenieria de haces láser: Propiedades, manipulación y aplicaciones,” 2009.
19. R. W. Waynant and M. N. Ediger, Electro-optics handbook. McGraw-Hill, 2000.
20. V. H. FILLIPO RUGELES, H. B. CANO GARZÓN, and J. A. CHAVES OSORIO, “APLICACIONES DE ILUMINACIÓN CON LEDs,” Scientia et Technica Año XVI, vol. 45, 2010, [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_color
21. U. Ceu, S. Pablo, B. Guerrero González-Valerio, Y. Daniel, and C. Méndez, “FACULTAD DE HUMANIDAD ES Y CC. DE LA COMUNICACIÓN FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA FOTOGRAFÍA.”
22. “Canon: Manuales de PIXMA: E470 series: Resolución.” https://ij.manual.canon/ij/webmanual/ScanUtility/W/E470%20series/1.1/ES/SU/su-308.html (accessed Nov. 23, 2022).
23. “Maria Luisa Calvo Padilla - Óptica Avanzada-Ariel (2004)”.
24. “Distancia focal | Entendiendo qué es el zoom de la cámara y la distancia focal del lente | Nikon de Nikon.” https://www.nikon.com.mx/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/entendiendo-la-distancia-focal.html (accessed Nov. 27, 2022).
25. “Lentes para Cámara Explicados | Lentes de Formato DX y FX de Nikon de Nikon.” https://www.nikon.com.mx/learn-and-explore/a/products-and-innovation/los-formatos-dx-y-fx.html (accessed Nov. 27, 2022).
26. EDS Robotics, “Cámaras industriales: tipos y funcionamiento,” https://www.edsrobotics.com/blog/camaras-industriales/#:~:text=Las%20c%C3%A1maras%20industriales%20se%20encuentran,pueda%20procesar%2C%20analizar%20y%20visualizar., Oct. 08, 2020.

INVERSORES MULTINIVEL APLICADOS E ENERGÍAS RENOVABLES FOTOVOLTAICAS

José Juan Alfaro Rodríguez[1], Sonia Daniela Pérez Rodríguez [1], Isaac López Alonso [1]

[1]Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
jose.ar@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Las energías renovables, son una fuente cada vez más utilizada para suministrar energía en los diversos campos como lo son procesos industriales, servicios médicos, telecomunicaciones, etc. Dentro de las primeras topologías se encuentran el inversor multinivel de diodo fijador, inversor multinivel con capacitores flotantes e inversor multinivel en cascada. En el presente trabajo se implementa un inversor multinivel de 15 niveles el cual opera por medio de un arreglo de 12 dispositivos de conmutación y 2 fuentes de CD asimétricas aplicando sistemas fotovoltaicos y controlados mediante las técnicas de modulación por ancho de pulso de corrimiento de nivel. La validación se realizará mediante software numérico utilizando diferentes técnicas de modulación y se analizará los resultados de voltaje y corriente de salida multinivel.

INTRODUCCIÓN

La radiación proveniente del sol se puede aprovechar de diversas formas, dos de ellas son mediante le energía térmica (Figura 1) y el efecto fotoeléctrico (Figura 2). Debido a la demanda de energía eléctrica el uso de la energía solar ha crecido de manera constante en los últimos 20 años. Este crecimiento se debe principalmente al uso de los sistemas fotovoltaicos que pueden ser aislados o conectados a la red eléctrica, en el último caso mediante inversores multinivel.

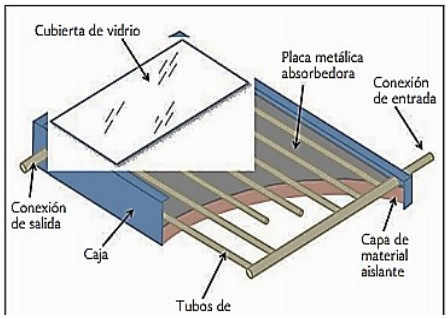


Figura 1. Componentes principales de un calentador solar de agua.
(https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf)

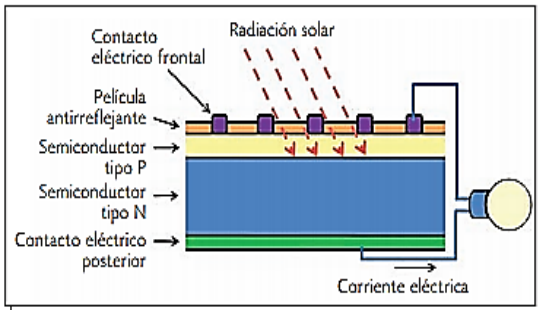
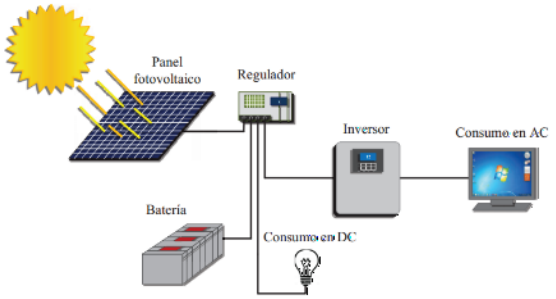


Figura 2. Estructura básica de una celda fotovoltaica. (https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La energía solar fotovoltaica es una alterativa y una solución para generar y producir electricidad para muchas aplicaciones incluso en lugares donde una gran parte de la población vive sin acceso a la electricidad. Básicamente la energía solar FV se aplica en dos tipos de sistemas:

- ✓ Sistemas independientes (stand-alone systems)



- ✓ Sistemas conectados a la red (grid connected systems

Figura 3 Esquema de conexión de un sistema FV independiente o aislado. (Valdez, D. C, Tesis "Inversor tipo T conectado a la red eléctrica con filtro LCL para la inyección de potencia")

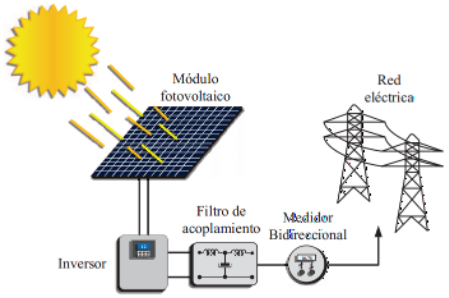


Figura 4. Esquema de conexión de un sistema FV conectado a la Red Eléctrica. (Valdez, D. C, "Tesis Inversor Tipo T conectado a la Red Eléctrica con Filtro LCL para la Inyección de Potencia")

CONVERTIDORES

Para que un sistema FV opere de la manera más eficiente es necesario mantener al panel FV funcionando en el punto de máxima potencia (Ppmax). Para ello se han propuesto distintas topologías de convertidores (figura 5), los cuales se encargan de transferir energía del PFV a la etapa de conversión CD-CA del sistema FV.

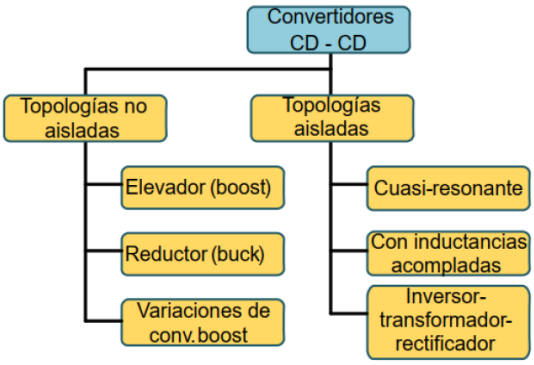


Figura 5. Clasificación de diferentes topologías utilizadas para MPPT en PFV (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor reductor (buck)

La topología de un convertidor reductor para el MPPT (Figura 6), es una topología de bajo costo, y se recomienda en el uso de cargas inductivas, como motores de CD y también en instalaciones de sistemas FV independientes.

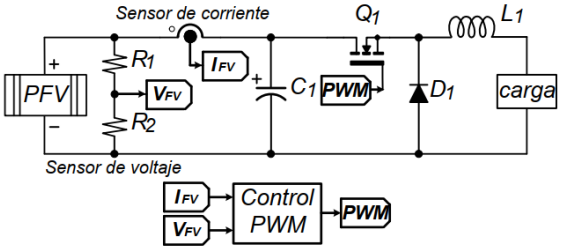


Figura 6: Topología de convertidor reductor para MPPT (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor elevador entrelazado (boost interleaved)

La topología del convertidor elevador entrelazado (Figura 7) permite reducir el rizo de la corriente de entrada, y aumenta la frecuencia del rizo de corriente del PFV (IF V) y de voltaje de salida (Vo) lo cual facilita la eliminación por medio de un filtro. Sin embargo, al aumentar el número de etapas en paralelo eleva el costo de implementación y la complejidad del control.

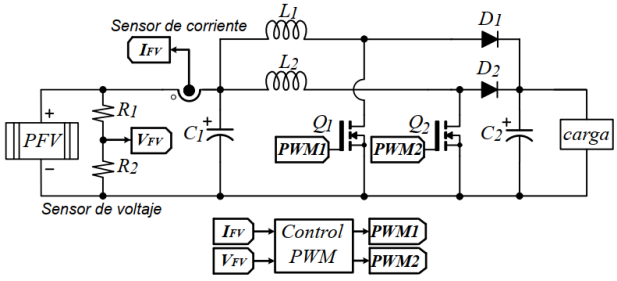


Figura 7. Topología de convertidor elevador entrelazado para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor reductor-elevador (buck-boost)

La topología del convertidor reductor-elevador (Figura 8) puede generar un voltaje de salida menor o mayor al voltaje de entrada del convertidor. Sin embargo, la corriente de entrada es pulsante

ocasionando que el convertidor opere en modo de conducción discontinua (MCD) y los componentes deben soportar valores pico altos de corriente.

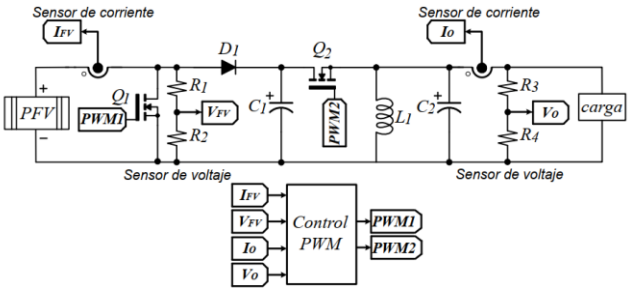


Figura 8. Topología de convertidor reductor-elevador para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor Cuk

En el convertidor Cuk el voltaje de salida puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada sin embargo, presentan mayor eficiencia entre los convertidores no aislados y mejores características de corriente de salida debido al inductor en la etapa de salida.

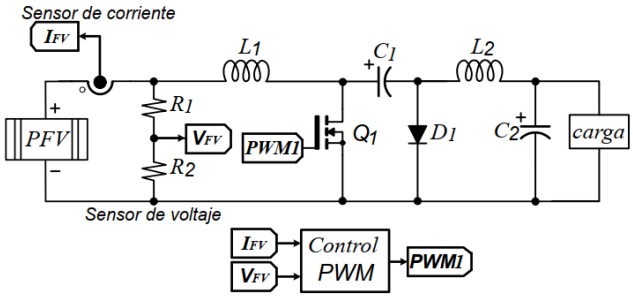


Figura 9. Topología de convertidor Cuk para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor SEPIC

La topología del convertidor SEPIC en pruebas experimentales, permite que el voltaje de entrada tenga niveles de ruido bajo lo cual se refleja en el bajo estrés eléctrico que presentan los componentes de potencia, además la corriente de entrada no es pulsante, esto permite una ventaja sobre la topología reductor-elevador.

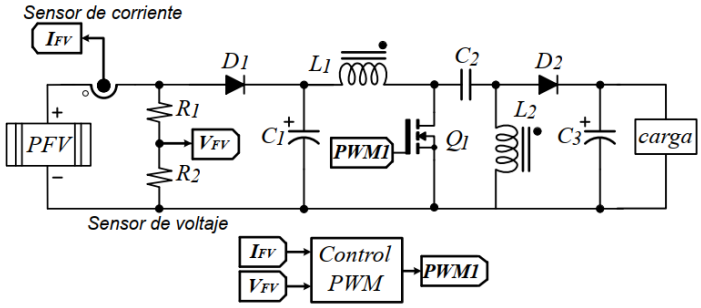


Figura 10. Topología de convertidor SEPIC para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor cuasi-resonante

Dentro de las topologías aisladas está la del convertidor cuasi-resonante (Figura 11) que está formada por una etapa inversora resonante, un transformador de alta frecuencia y un rectificador. Esta topología consigue conmutaciones suaves en el encendido debido al capacitor resonante que se encuentra en paralelo con la inductancia del bobinado primario del transformador de alta frecuencia.

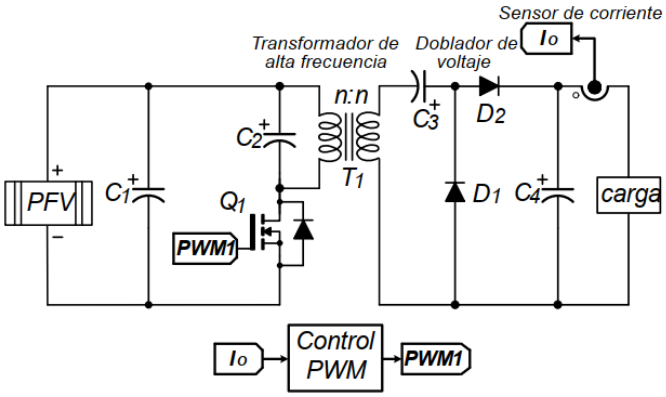


Figura 11. Topología de convertidor cuasi-resonante para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor CD-CD con inductancias acopladas

La topología del convertidor CD-CD con inductancias acopladas (Figura 12) permite reducir el costo y el tamaño de los inductores al tener los inductores acoplados a la entrada del convertidor lo que permite además suprimir la interferencia electromagnética, obteniendo corrientes de salida libres de ruido. Esta se compone de cuatro etapas: acoplamiento de las inductancias, inversor, transformador y rectificador.

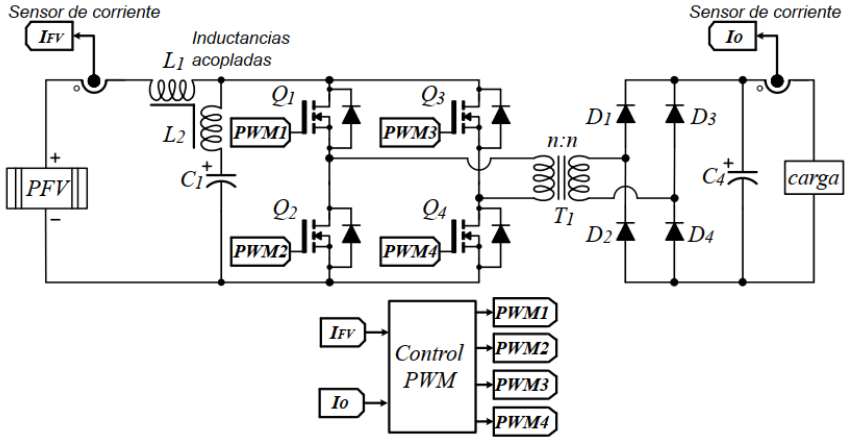


Figura 12. Topología de convertidor CD-CD con inductancias acopladas para MPPT. (Canchola, A. Tesis "Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos")

Topología con convertidor CD-CD con dos transformadores

La Topología con convertidor CD-CD con dos transformadores (Figura 13) consta de tres etapas: inversor, transformador y rectificador. La característica principal de esta topología es que incluye un transformador que relaciona la entrada con la salida del convertidor.

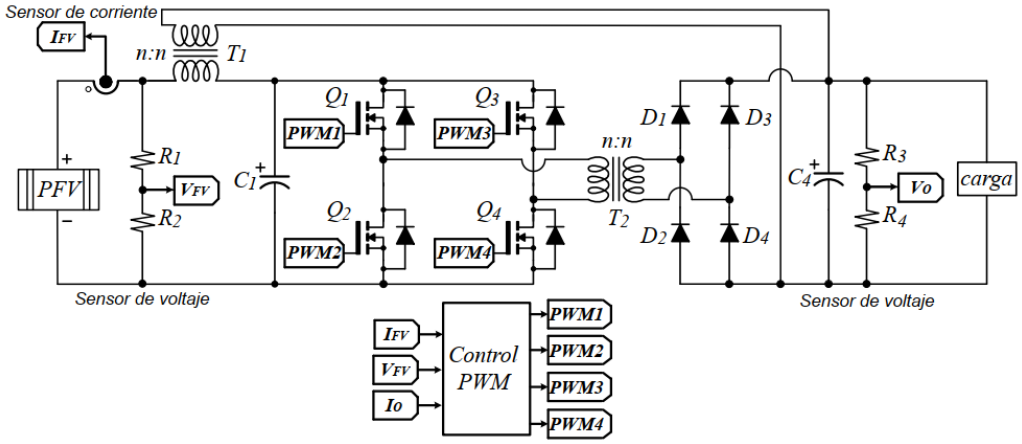


Figura 13. Topología de convertidor CD-CD con dos transformadores para MPPT. (Canchola, A. Tesis “Implementación y Optimización de Algoritmos MPPT para Sistemas Fotovoltaicos”)

INVERSORES MULTINIVEL

El inversor multinivel es el elemento final en un sistema FV en los sistemas aislados y es parte de los convertidores que adecuan una señal de CD en una señal de CA, mediante arreglos de dispositivos semiconductores que se conmutan bajo una técnica de modulación. Para generar una señal de 15 niveles en este trabajo se utiliza un arreglo no modular de 3 puentes H en cascada diseñado con 12 dispositivos de conmutación (de los cuales 6 son complementarios) y 3 fuentes de DC asimétricas ($V_{CD1}=2V_{CD2}=4V_{DC3}$) cada una a la mitad del puente H que le sucede (Figura 14).

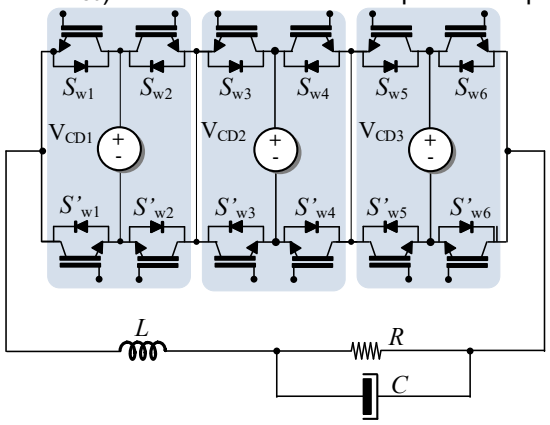


Figura 14. Topología de Inversor Multinivel de Puentes H en Cascada con arreglo no modular.

Mediante las técnicas de modulación por ancho de pulso con desplazamiento de nivel (LS-PWM), basada en la comparación de un grupo de portadoras triangulares a alta frecuencia y una señal senoidal a baja frecuencia, se pueden generar una señal escalonada la cual se asemeja a la señal de onda senoidal. Entre más niveles se generen mayor es la complejidad del control.

Para este trabajo se generaron 14 portadoras triangulares, 7 para el semi ciclo positivo (Figura 7) y 7 para el semi ciclo negativo, bajo la técnica PD-LS-PWM las cuales tienen las características de amplitud de 20V, frecuencia de 10Khz y que todas las portadoras están en fase. La señal senoidal tiene una amplitud de 127V y una frecuencia de 60Hz.

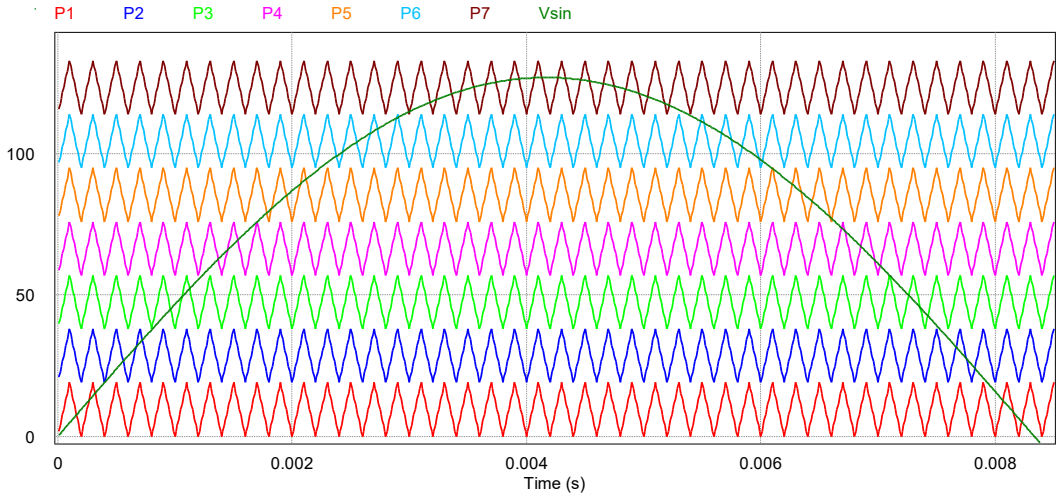


Figura 7. Portadoras (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7) del semi ciclo positivo para la Técnica de Modulación PD-LS-PWN para el Inversor Multinivel Puentes H en cascada de 15 Niveles.

RESULTADOS Y VALIDACIÓN NUMÉRICA

Implementando el inversor multinivel en software numérico (Figura 8) se validó el funcionamiento de los modos de operación del inversor multinivel (Tabla 1) obteniendo la señal de 15 niveles bajo la técnica de modulación PD-LS-PWM (Figura 9), y aplicando un filtro LC a la salda se aprecia el voltaje y la corriente senoidal (Figura 10). Para la simulación se utilizaron fuentes de CD que cumplen ($V_{CD1}=2V_{CD2}=4V_{DC3}$). Si $V_{CD1}=80V$, $V_{CD2}=40V$ y $V_{CD3}=20V$.

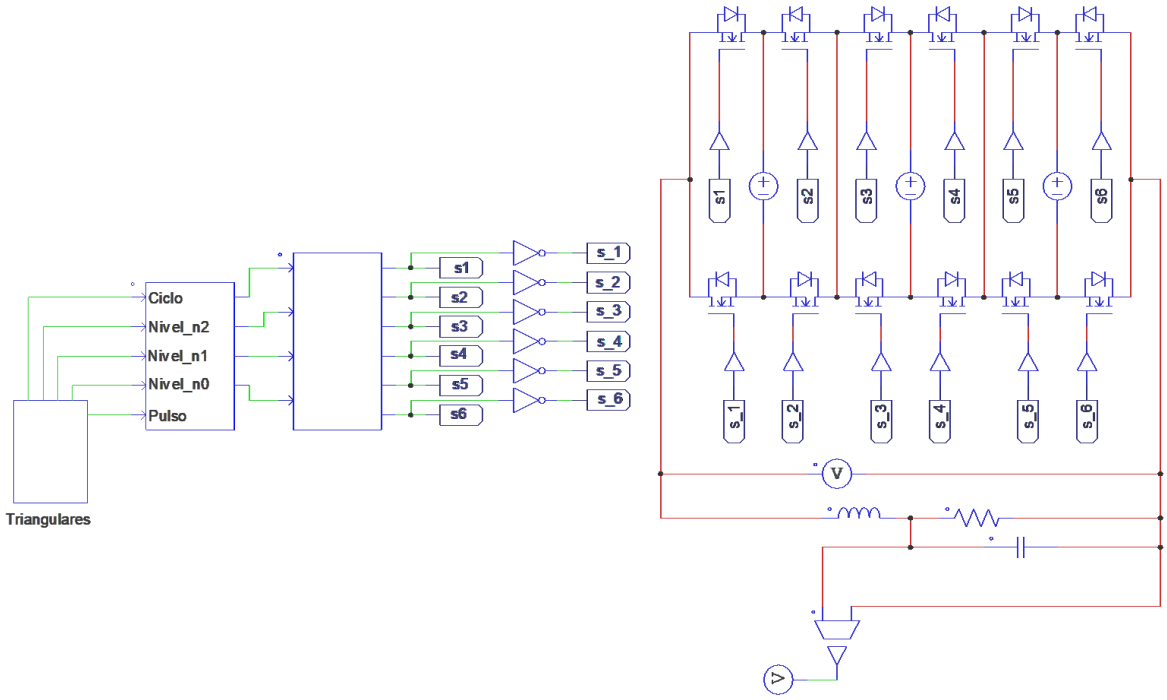


Figura 8. Inversor Multinivel en Software Numérico.

Tabla 1. Estados lógicos de los interruptores para los modos de operación del inversor multinivel.

Operación	Voltaje	Valor	S_{w1}	S_{w2}	S_{w3}	S_{w4}	S_{w5}	S_{w6}
$V_{CD1}+V_{CD2}+V_{CD3}$	$7V_{CD}/4$	140	1	0	1	0	1	0
$V_{CD1}+V_{CD2}$	$3V_{CD}/2$	120	1	0	1	0	0	0
$V_{CD1}+V_{CD3}$	$5V_{CD}/4$	100	1	0	0	0	1	0
V_{CD1}	V_{CD}	80	1	0	0	0	0	0
$V_{CD2}+V_{CD3}$	$3V_{CD}/4$	60	1	1	1	0	1	0
V_{CD2}	$V_{CD}/2$	40	1	1	1	0	0	0
V_{CD3}	$V_{CD}/4$	20	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1
$-V_{CD3}$	$-V_{CD}/4$	-20	0	0	0	0	0	1
$-V_{CD2}$	$-V_{CD}/2$	-40	0	0	0	1	1	1
$-(V_{CD2}+V_{CD3})$	$-3V_{CD}/4$	-60	0	0	0	1	0	1
$-V_{CD1}$	$-V_{CD}$	-80	0	1	1	1	1	1
$-(V_{CD1}+V_{CD3})$	$-5V_{CD}/4$	-100	0	1	1	1	0	1
$-(V_{CD1}+V_{CD2})$	$-3V_{CD}/2$	-120	0	1	0	1	1	1
$-(V_{CD1}+V_{CD2}+V_{CD3})$	$-7V_{CD}/4$	-140	0	1	0	1	0	1

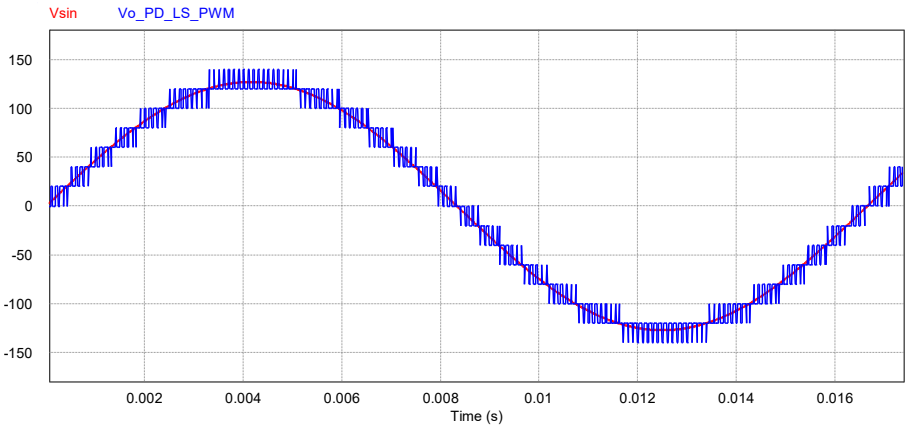


Figura 9. Señal Voltaje de Salida de 15 niveles bajo la técnica PD-LS-PWM

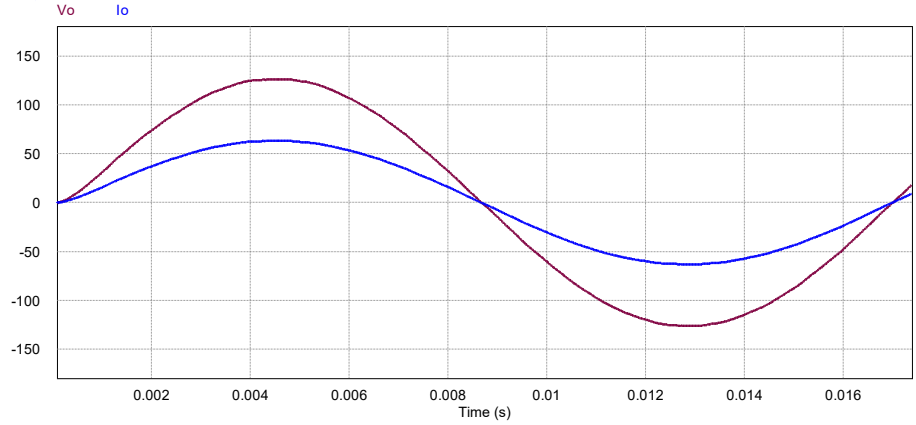


Figura 10. Señales de voltaje y corriente de salida bajo la técnica PD-LS-PWM con filtro LC.

En la tabla 2 se reflejan los resultados numéricos de corriente, potencia, THD y FP obtenidos en simulación para las técnicas de modulación PD-LS-PWM.

Tabla 2. Resultados obtenidos para 100 Ω.

Técnica	PD
V_o	126V
I_o	1.26A
R	100Ω
L	31.8μH
C	795nF
$THD_{voltaje}$	$4.880x10^{-3}$
$THD_{corriente}$	$4.886x10^{-3}$
Potencia	75.7W
F. P	0.99

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en simulación han cumplido la funcionalidad del Inversor Multinivel, utilizando fuentes asimétricas de 80V, 40V y 20V con un filtro L=32mH, R=100Ω y C=795nF. La capacidad del inversor es de 75.5W que puede ser aplicado en iluminación en baja potencia y cámaras de vigilancia. En esta etapa se comprobó la funcionalidad de la topología, actualmente se está terminando la construcción del prototipo experimental para aplicar las técnicas de modulación PD, POD y APOD en una tarjeta FPGA, en una etapa final se sustituirá 2 fuentes de DC por capacitores. Adicionalmente se tiene la colaboración para implementar la etapa de adecuación de los panales fotovoltaicos mediante un convertidor CD-CD.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Rodriguez. et al., Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 49, no. 4, August 2002.
2. I. D. Pharne and Y. N. Bhosale. A Review on Multilevel Inverter Topology, International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC). pp. 700-703. 2013.
3. N. Mittal et al. Multilevel Inverters: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies, 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES). pp. 1-11. 2012.
4. L. Tapia Hector J, A. Rodriguez Jose Juan, D. Gonzalez Aurelio and R. Resendiz Juvenal, "Eight Levels Multilevel Voltage Source Inverter Modulation Technique," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 4, pp. 1121-1127, April 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8362146
5. C. Orbegozo and R. Arivilca, Energía Solar Fotovoltaica, Manual técnico para instalaciones domiciliarias, 1st ed. Argentina: Deutscher Entwicklungsdienst, 2010.
6. D. Tan and A. K. Seng, Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems, 1st ed. Singapore: Energy Market Authority, 2011.
7. B. Bendib, H. Belmili and F. Krim, A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 45, pp. 637-648, May 2015.
8. E. Koutroulis, K. Kalaitzakis and N. C. Voulgaris, Development of a microcontroller based, photovoltaic maximum power point tracking control system, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, January 2001.
9. G. Escobar, S. Pettersson, C. N. M. Ho and R. Rico-Camacho, Multi-sampling Maximum Power Point Tracker (MS-MPPT) to Compensate Irradiance and Temperature Changes, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 8, no. 3, pp. 1096-1105, July 2017.
10. D. Apablaza and J. Muñoz, Laboratory Implementation of a Boost Interleaved Converter for PV Applications", IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 6, pp. 2738-2743, June 2016.Bibliografía 139
11. A. Safari and S. Mekhilef, Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1154-1161, April 2011.
12. Hybrid Particle Swarm Optimization and Perturb and Observe Method with Variable Perturbation Frequency for GMPPT in PV Systems, Manuscript ID 17-TIE-1667, IEEE Industrial Electronics Society, Transactions on Industrial Electronics, 2009.
13. H. Terai, Utility-interactive solar photovoltaic power conditioner with soft switching sinewave modulated inverter for residential applications", 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), Cairns, Qld., Australia, 2002, pp. 1501-1505 vol.3.
14. Y. Chen, Y. Liu and F.Wu, Multi-input DC/DC converter with ripple-free input currents, 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat.No.02CH37289), Cairns, Qld., Australia, 2002, pp. 796-802 vol.2.
15. J. A. M. Bleijs and A. Gow, Fast maximum power point control of current-fed DC-DC converter for photovoltaic arrays, Electronics Letters, vol. 37, no. 1, pp. 5-6, January 2001.

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA COMUNIDAD ESTUDIANTIL DE LA UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE ENERGÍA Y MOVILIDAD

Lilian Montserrat Garnica Vieyra[1], Jaime Guillermo Molano Macias[2], Dulce Lizeth Galindo García[3], María Alicia Prado Juárez[3], Erica Mariana Hernández Hernández[4] y Claudia Alicia Cortés Escobedo[4]

[1]Instituto Politécnico Nacional - Unidad Profesional Interdisciplinaria en Energía y Movilidad , [2]Instituto Politécnico Nacional, [3]Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, [4]Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-Instituto Politécnico Nacional.
lgarnicav1700@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Ante las condiciones actuales de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad, alumnos y profesores interesados en abordar las necesidades ambientales del mercado actual y reconociendo el enfoque de la Unidad en materia de sostenibilidad e innovación, se presenta la propuesta de diseño de un biodigestor para la unidad académica, un plan de manejo integral de residuos, concentrándonos en los residuos orgánicos para la generación de energía y producción de fertilizantes, sensibilizando e integrando a la comunidad académica hacia una economía circular. Se presentan resultados sobre la generación de la línea base (análisis de generación de residuos), campaña de sensibilización, proyección de necesidades actuales y en el corto, mediano y largo plazo, y finalmente, la propuesta de diseño de un biodigestor y la determinación de parámetros de operación. Presentando el diseño de un biodigestor tubular con capacidad de 15 kg/día, determinando que por 1 kg de residuos orgánicos se producen 100L de biogás dentro del biodigestor, obteniendo así 1500L/mes, los cuales son equivalentes a 0.75kg de gas envasado, lo que se traduce en un ahorro de gas/mes de 202.5 pesos. Por otro lado, considerando una operación del 70% se obtendrían 420L/mes, si de esta producción se vende el 50% se tienen ganancias de hasta 6,300 pesos/mes. Dentro del plan de inversión se consideró; herramientas, materiales (zanja, bolsa, umbráculo, red de biogás – costos variables conforme la ubicación- y cubos de cemento) siendo necesario una inversión de 45,000 pesos, con la producción y metas planteadas se puede tener un retorno de inversión estimado de año y medio a dos años. El desarrollo de este biodigestor dentro de la unidad emerge como una propuesta viable y prometedora para la gestión sostenible de residuos orgánicos y la generación de biogás y biofertilizante. Incluso a pesar de que algunos costos específicos requieren una estimación más precisa, como lo es la red del biogás y a reserva de sobrecostos durante la construcción, mantenemos una confianza sólida en la factibilidad del proyecto, la cual está condicionada a lograr la venta del 50% del biofertilizante. Es importante destacar que la efectividad del biodigestor está directamente vinculada a la cantidad de residuos orgánicos recopilados. A mayor cantidad de materia prima, se obtendrán resultados óptimos en la producción de biogás y biofertilizante. Por lo tanto, se resalta la importancia de estrategias eficaces para la recolección de residuos, ya que esto no solo contribuirá al éxito del proyecto, sino que también maximizará sus beneficios ambientales y económicos. La obtención de financiamiento y una gestión eficiente de los residuos se presentan como elementos cruciales para convertir este proyecto en una realidad sostenible y exitosa.

INTRODUCCIÓN

La Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad es un plantel del Instituto Politécnico Nacional de reciente creación; que tiene como misión y visión la formación de nuevas generaciones de profesionales con conocimiento y desarrollo enfocado a las necesidades actuales ambientales y del mercado; que permitirán innovaciones en los sistemas energéticos y los negocios asociados con una visión de sustentabilidad; trabajando con tecnología, habilidades y competencias multidisciplinarias que permitan el desarrollo en las áreas de energía, negocios energéticos, redes inteligentes y movilidad urbana. Su comunidad está conformada por docentes, personal administrativo y alumnos interesados en lograr un cambio en las condiciones actuales del planeta.

En la actualidad la generación y el tratamiento de residuos, así como la falta de tecnología para el correcto tratamiento de estos, en países subdesarrollados se ha vuelto una grave problemática a resolver por la sociedad alrededor del mundo; de esta necesidad se han podido desarrollar más y mejores avances que nos ayudan a disminuir esta problemática.

Uno de los más prácticos y efectivos ha sido el desarrollo de biodigestores a distintas escalas, desde aplicaciones domésticas hasta plantas de generación industriales; es por ello que se halló la oportunidad de implementar un biodigestor para la unidad académica, resolviendo así problemáticas ambientales tales como; la liberación de gases de efecto invernadero de mayor impacto y el adecuado manejo de residuos orgánicos, que a la fecha no se han encontrado soluciones integrales, efectivas y sencillas de usar.

TEORÍA

Un biodigestor es en pocas palabras un recipiente, el cual siempre cuenta con aberturas a la entrada; por la cual se le añaden residuos (pueden ser de distintos tipos según el tipo de digestión que se quiera realizar, sin embargo siempre deben de ser residuos de tipo biológico); y estos residuos donde se descomponen en su interior mediante distintos subprocesos de la digestión anaeróbica los cuales son: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogenesis y Metanogénesis; y como producto final de los biodigestores se obtiene una mezcla de gases comúnmente llamada biogás que comprende una mayoría de metano y dióxido de carbono; aunque existen otros como el sulfuro de hidrogeno, nitrógeno y vapor de agua. Además, se obtiene otro subproducto, el cual se encuentra de manera líquida y comúnmente puede ser utilizada como fertilizante o mejorador de suelo.

Dentro del proyecto se desarrollaron dos cuestiones distintas simultáneamente; la primera una campaña de sensibilización mediante posters informativos para la inclusión en la separación de residuos por parte de la comunidad; y en segunda, teniendo resultados cuantitativos respecto a la generación de residuos, se procedió a realizar un diseño de biodigestor que fuera factible de implementar en las instalaciones.

En esta segunda parte de diseño, primero se definió el tamaño de los residuos y como serian aplastados/triturados para reducir su tamaño a aproximadamente 2 cm. Se definieron las proporciones de agua por kilogramo de residuos en 1:1 según la literatura consultada al respecto. Luego se definió la capacidad instalada que debía tener nuestro biodigestor, considerando el día 0 como la primera carga y el día 30 como el día que tendríamos una carga de tamaño completo para la puesta en marcha del biodigestor.

El dimensionamiento de nuestro biodigestor tubular se realizó considerando los resultados obtenidos en la medición de generación de residuos dentro de la escuela (aproximadamente 20-25 kilogramos por día) y también se consideró esto, en la utilización de las siguientes ecuaciones:

Ecuación (1), circunferencia:

$$\boldsymbol{C = 2x\,\pi\,x\,r}$$

$$\boldsymbol{r = \frac{C}{2\,x\,\pi}}$$

Donde:

$$\boldsymbol{C = circunferencia\ del\ plástico\ (m)}$$

$$\boldsymbol{\pi = 3.1416}$$

$$\boldsymbol{r = radio\ de\ la\ circunferencia\ del\ plástico\ (m)}$$

Ecuación (2); longitud:

$$\boldsymbol{\frac{L}{D} = (5\ a\ 10)}$$

Donde=

$$L = Longitud\ del\ biodigestor\ (m)$$
$$D = diámetro\ de\ la\ circunferencia\ del\ plástico (m)$$

La relación óptima entre la longitud y el diámetro para un biodigestor será de 7.5. (Rodríguez, D, 2017). Entre diámetros de 50 cm, 70 cm, 1m y 2m, el ancho de rollo de 1m proporciona una relación L/D de 7.2, por lo que se selecciona 1 m como diámetro del biodigestor.

Cabe mencionar que para la construcción de la bolsa es necesario utilizar polietileno tubular, este material solo se consigue comercialmente en calibres que van desde el número 2 hasta el número 6, si se desea un calibre mayor debe encargarse su producción (lo que resulta costoso y demorado). Lo mismo sucede con el ancho del rollo de polietileno tubular, éste se consigue en anchos de 50 cm, 70 cm, 1m y 2m.

Las dimensiones de un biodigestor tubular vienen determinadas por las dimensiones de la zanja. La zanja es la que contendrá la fase líquida del biodigestor. Normalmente se usan zanjas trapezoidales (con paredes inclinadas para ayudar al terreno para que no se derrumbe) donde se colocan los biodigestores tubulares.

Dicha zanja, es parte fundamental de la construcción del biodigestor por lo que también se determinó el área de excavación y el volumen final de excavación mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación (3), área de la zanja:

$$A_{zanja} = p\ x\ \frac{(a+b)}{2}$$

Donde:

$$A_{zanja} = área\ del\ trapecio\ de\ la\ zanaja\ (m^2)$$
$$p = profundidad\ (m)$$
$$a = ancho\ inferior\ (m)$$
$$b = ancho\ superior\ (m)$$

Ecuación (4), volumen de la zanja:

$$V_{zanja} = V_L = A_{zanja}\ x\ L$$
$$L = \frac{V_L}{A_{zanja}}$$

Donde:

$$V_{zanja} = volumen\ de\ la\ zanja\ (m^3)$$
$$V_L = volumen\ líquido\ (m^3)$$
$$L = longitud\ de\ la\ zanja\ (m)$$

El diámetro que se acerca más al escogido para este cálculo es de 0.96 m que corresponde a un ancho de rollo de 1.50 como se observa en la figura siguiente:

Ancho de rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diametro (m)
1	2	0,32	0,64
1,25	2,5	0,4	0,8
1,5	3	0,48	0,96
1,75	3,5	0,56	1,12
2	4	0,64	1,38

Fuente: (Ibid., pág. 35)

Figura 1 Parámetros geométricos

AR (m)	2	1,75	1,5	1,25	1
a (m)	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
b (m)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
p (m)	1	0,9	0,9	0,7	0,6

Fuente: *(Ibid., pág. 37)*

Figura 2 Dimensiones de zanja

Se extraen los valores de a, b y P (0,50m, 0,70m y 0,90m respectivamente) que corresponden a la base menor, base mayor y altura del perfil trapezoidal de la zanja.

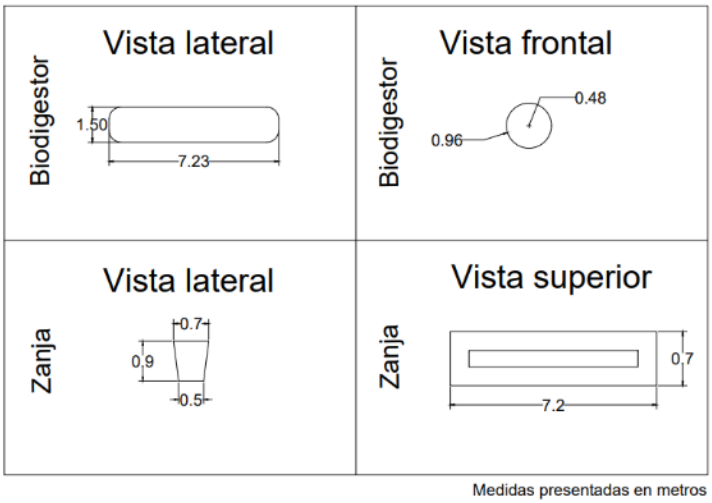


Figura 33 Dimensiones propuestas de biodigestor y zanja

Desde el punto de visa de beneficios ambientales obtuvimos los siguientes beneficios:

- Eliminación de la contaminación ambiental, producida por los residuos
- Al utilizar el biogás, disminuye el consumo de combustibles convencionales y así mismo, la emisión de dióxido de carbono y metano, lo que nos ayuda a la reducción del efecto invernadero.
- Disminuye el consumo de agua.

Desde el punto de visa de beneficios económicos obtuvimos los siguientes resultados:

Un costo total estimado de construcción de $50,000 (cincuenta mil) pesos mexicanos; y se hizo la suposición de realizar la venta de fertilizante a bajo costo y con estudios de calidad; así como el auto abasto de gas, con lo que teníamos un retorno de inversión en aproximadamente tres años.

PARTE EXPERIMENTAL

Este proyecto, al ser escolar, por el momento solo tuvo de parte experimental la medición de cantidad de residuos generados dentro de las instalaciones escolares, de los cuales obtuvimos valores promedio que rondaban los 22.5 kilogramos por día, sin embargo no se ha autorizado la compra ni instalación del biodigestor y lo necesario para ello.

RESULTADOS

Para este proyecto se esperaría la obtención de dos tipos de residuos utilizables; el biogás y biogestato.

Del biogás se espera la obtención de una composición mayoritaria; de entre 55% y 70% de gas metano (CH4); en una mezcla con otros gases dentro de los que se encuentran ácido sulfhídrico, monóxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno; y pueden o no ser removidos según el uso que se le desea dar; en el caso particular de este proyecto no sería necesario retirar los componentes anteriormente mencionados para su uso en cocina, siempre y cuando no presente ácido sulfhídrico, ni siloxanos; que de acuerdo con el sustrato que se va a utilizar no tiene por qué existir estos componentes en nuestra mezcla.

Respecto al biodigestato se espera obtener una mezcla líquida; sin residuos sólidos con algunos nutrientes en su composición; sin embargo, para permitir su uso en plantas y tener así la posibilidad de venderlo; habría que hacerle un estudio de Análisis de Mejoradores Orgánicos (realizado por el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal) de pH, Materia Orgánica, Nitrógeno Total, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Sodio, Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso, Cromo, Níquel, Plata, Plomo, Cadmio, Coliformes fecales.

En el análisis de financiero y de funcionamiento, se concluyo que el éxito del proyecto estaba condicionado a que la escuela estuviera siempre en funcionamiento, por lo que al tener vacaciones largas dos veces al año, pierde mucho del valor de procesamiento de residuos que tiene, ya que al finalizar cada periodo es necesario tener un día 0 otra vez y esperar a que la primera producción salga de manera exitosa.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este biodigestor dentro de la UPIEM emerge como una propuesta viable y prometedora para la gestión sostenible de residuos orgánicos y la generación de biogás y biofertilizante. Incluso a pesar de que algunos costos específicos requieren una estimación más precisa, como lo es la red del biogás y a reserva de sobrecostos durante la construcción o extras no considerados, mantenemos una confianza sólida en la factibilidad del proyecto. Esta factibilidad está condicionada a lograr la venta del biofertilizante, con el objetivo de lograr la venta de al menos un 50% de los subproductos generados.

Es importante destacar que la efectividad del biodigestor está directamente vinculada a la cantidad de residuos orgánicos recopilados. A mayor cantidad de materia prima, se obtendrán resultados óptimos en la producción de biogás y biofertilizante. Por lo tanto, se resalta la importancia de estrategias eficaces para la recolección de residuos, ya que esto no solo contribuirá al éxito del proyecto, sino que también maximizará sus beneficios ambientales y económicos. La obtención de financiamiento y una gestión eficiente de los residuos se presentan como elementos cruciales para convertir este proyecto en una realidad sostenible y exitosa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Biodigestores: generación de biogás como respuesta a la problemática energética aplicable a poblaciones con vulneración ambiental (2.ª ed.). (2022). (2.ª ed.). buenos aires: corel pdf engine version 17.0.0.491. RECUPERADO DE https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/76d9e3f1-674f-437b-be17-20a6a412b498/content
2. CURSO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA (1.ª ed., p. academia de las renovables). (2019). (1.ª ed.). SANTA FE: Subsecretaría de energías renovables . Recuperado de

https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wpcontent/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-2-Biodigesti%C3%B3n-anaer%C3%B3bica.pdf

ÍNDICES DE DAÑO PARA LA NAVE DEL TEMPLO Y CLAUSTRO DEL EX CONVENTO DE SAN DIEGO EN MORELIA, MICHOACÁN

Lidia Mejía Olmos[1], Guillermo Martínez Ruiz[2], José Manuel Jara Guerrero[2]

[1] Egresada de la Maestría en Ingeniería en el Área de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [2] Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
0733949c@umich.mx, guillermo.martinez@umich.mx, jose.jara@umich.mx

RESUMEN

Se presenta un primer escenario de daño para la nave del templo interactuando con el claustro del ex convento de San Diego en Morelia, considerando como demanda sísmica un conjunto de registros acelerométricos de terremotos reales. Se construyeron modelos bidimensionales de elementos rígidos para la nave interactuando con el claustro del antiguo complejo conventual, el cual fue sometido a nueve registros acelerométricos del sismo del 19 de septiembre de 2017, obtenidos en estaciones ubicadas entre los 80 y 100 kilómetros del epicentro a las zonas de mayor daño en estructuras conventuales, los cuales fueron introducidos sin y con el escalamiento para dos periodos de recurrencia así como en dos etapas, la primera solamente la componente horizontal y en la segunda, considerando simultáneamente las dos componentes sísmicas. Para los registros escalados a recurrencias de 475 y 975 años así como sin escalamiento alguno, en las condiciones de sismo horizontal y posteriormente sismo horizontal y vertical, se obtuvieron desplazamientos máximos a nivel de cubierta con un valor máximo de 8.42 centímetros para el caso de sismo sin escalamiento de la estación SAPP, el cual, es muy grande para este tipo de edificaciones. Por otro lado, se obtuvo la energía histerética disipada para las tres condiciones de sismo consideradas, evidenciando nuevamente una mayor energía para el sismo sin escalamiento, llegando a valores de 17.259e6 Joules para en el caso del registro horizontal y vertical para la estación sísmica PZPU. Finalmente para todas las condiciones de peso propio combinado con la acción sísmica, se obtuvieron índices de daño para estimar la posibilidad de colapso cuando estos fueran iguales o mayores a la unidad. En concusión de obtuvo un comportamiento similar para todos los registros estudiados, observándose en la mayor parte de la demanda sísmica considerada la aparición de daños por tensión en el intradós de la clave de la bóveda principal, así como en los arranques de la misma producto de la interacción de la nave con el claustro, este último, de menor altura, lo que provoca una importante asimetría de rigideces en elevación. Por otro lado, las bóvedas del claustro bajo y alto también experimentaron daños por tensión en el intradós de sus claves. Para la demanda sin escalamiento, se obtuvo un índice de daño máximo de 0.71, para el escalamiento de 475 años uno igual a 1 y para 975 años igual también a 1, verificándose que estos daños extensivos y colapsos se encontraron para la condición del sismo horizontal actuando con la componente vertical simultáneamente, situación más aproximada con la realidad, lo cual pone en evidencia la importancia de considerar las dos componentes del movimiento en el estudio del comportamiento sísmico de edificios históricos de tipo conventual.

INTRODUCCIÓN

El templo de Guadalupe y Ex convento de San Diego en el centro histórico de la ciudad de Morelia, México, se encuentra ubicado con coordenadas 19°42’2.70’’N, 101°10’39.2’’W. Su construcción inició en 1708 y se concluyó en 1716. En la última etapa de su edificación el templo fue dado a un grupo de franciscanos que pertenecían a la Orden de San Diego.

Entre 1729 y 1737 se construyó una casa adosada al templo para que hicieran uso de ello los eclesiásticos, y en 1760 se hizo entrega tanto del templo como del edificio anexo a los frailes Franciscanos Descalzos. El crucero y el presbiterio del templo se ampliaron en 1777, y para octubre de 1785 pasó por un proceso de restauración a cargo de Fray Antonio de San Miguel. El templo tiene una torre de dos cuerpos con imafronte piramidal (Figura 1a) y una cúpula sin tambor, fusionando

un estilo arquitectónico de corriente europea con la mexicana del siglo XVIII de estilo barroco, destacándose la ornamentación interior la cual fue realizada por manos indígenas (Figura 1b).

Figura 1. Fachada del templo a) y vista interior de la nave del templo b).

El claustro está compuesto por dos niveles en donde su nivel inferior es abovedado, mientras que su nivel superior es a base de viguería de madera y tapas de ladrillo con terrado interno. El Ex convento se encuentra en una zona de alta sismicidad, por lo que ha experimentado eventos de importancia, algunos de ellos históricos como el del 19 de junio de 1858 el cual generó gran destrucción desde el Estado de Michoacán hasta la Ciudad de México (García y Suarez, 1996), viéndose afectada la nave del templo, lesiones que de existir en la actualidad no son visibles debido a la gran ornamentación existente. Lo anterior obliga por tanto la realización de trabajos que permitan estimar la vulnerabilidad sísmica futura del conjunto conventual de cara a establecer estrategias preventivas de conservación, abocadas a evitar tanto pérdidas humanas como patrimoniales irreparables.

DEMANDA SÍSMICA

Para entender de mejor forma el comportamiento sísmico esperado a futuro de la nave de la iglesia interactuando con el claustro del Ex convento de San Diego, se utilizó como demanda sísmica los registros obtenidos en nueve de las estaciones sísmicas más próximas a las zonas de mayores daños en los Estados de Morelos y Puebla, del terremoto del 19 de septiembre de 2017, Ms 7.2, los cuales, se obtuvieron mediante estaciones sísmica ubicadas a distancias epicentrales entre 85 y 100km. El mecanismo tipo intraplaca de este evento sísmico produjo amplificaciones espectrales en un rango de periodos de 0.18 a 0.54 segundos, alcanzando un valor máximo de 1.01g para un periodo de 0.44 segundos (Figura 3), lo cual, debido a los periodos naturales de vibración cortos típicos en este tipo de edificios generó que experimentaran las mayores aceleraciones espectrales, llevando a cientos de estructuras conventuales a sufrir daños desde ligeros hasta colapsos.

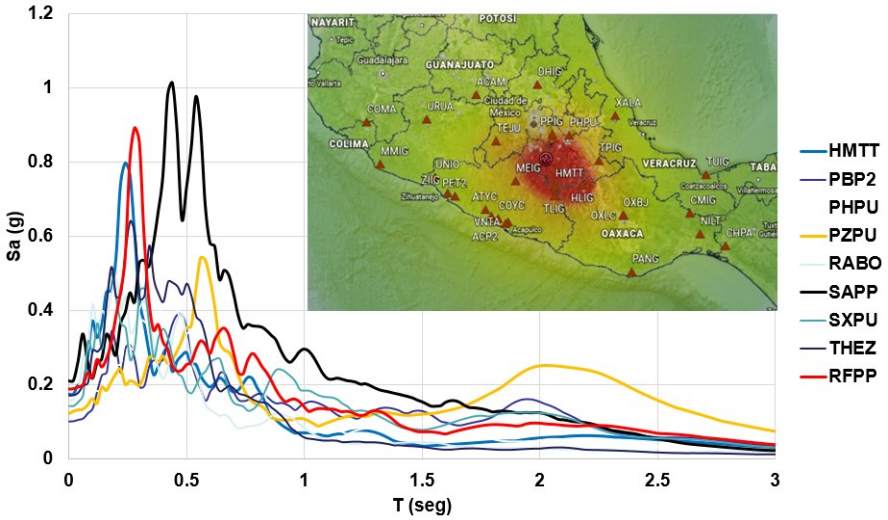
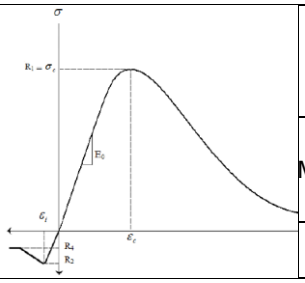


Figura 2. Espectros de respuesta de las aceleraciones obtenidas en nueve estaciones dentro de los Estados de Puebla y Morelos.

ANÁLISIS NO LINEAL DE LA ESTRUCTURA

El método de los Elementos Rígidos permite en un tiempo computacional muy reducido realizar análisis dinámicos no lineales en el tiempo, partiendo del considerar que los elementos se comportan elásticamente y no así los elementos de enlace entre los mismos, los cuales se modelan como resortes no lineales a los que se les pueden incorporar diferentes modelos constitutivos tanto para comportamiento en compresión como en tensión. En el caso que nos ocupa el modelo constitutivo utilizado para el análisis fue de tipo exponencial (Peña, 2010), para el cual, el comportamiento a compresión se define únicamente con la rigidez inicial del material y la resistencia a compresión máxima como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros para el modelo constitutivo



Material	R1 (Mpa)	R2 (Mpa)	R3 (Mpa)	R4 (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)	Módulo del Poisson	Densidad (Kg/m3)
Mampostería	10.8	-1.08	6.963	-0.32	1000	0.2	1800
Rellenos	4.904	-0.49	0.314	-0.15	500	0.2	1600

Se construyeron y analizaron macroelementos bidimensionales de Elementos Rígidos (Casolo & Peña, 2007) para una sección de la nave adosada al edificio del claustro, para la cual se consideró en una primera etapa la componente horizontal del movimiento del terreno, y en una segunda la componente horizontal actuando simultáneamente con la componente vertical de cada registro sísmico de la demanda considerada, que es como realmente actúa el sismo, tomando como referencia tanto la dirección transversal como la longitudinal de la nave. Los registros sísmicos de aceleraciones del terreno se introdujeron con sus valores tal cual se obtuvieron en las estaciones y después escalándolos a la máxima aceleración probabilista del terreno firme para 475 y 975 años, es decir, para 96.9 y 139.24 centímetros por segundo al cuadrado, valores que se obtuvieron a partir de un análisis de peligro sísmico del sitio considerando todas las fuentes sísmicas que pueden afectar a la ciudad de Morelia, es decir, temblores intraplaca, locales y de subducción.

En la Figura 3a se muestra el macroelemento en estudio así como la malla de elementos rígidos considerada en la Figura 3b, el cual, está indicado con el recuadro azul en la planta del conjunto conventual de la Figura 4.

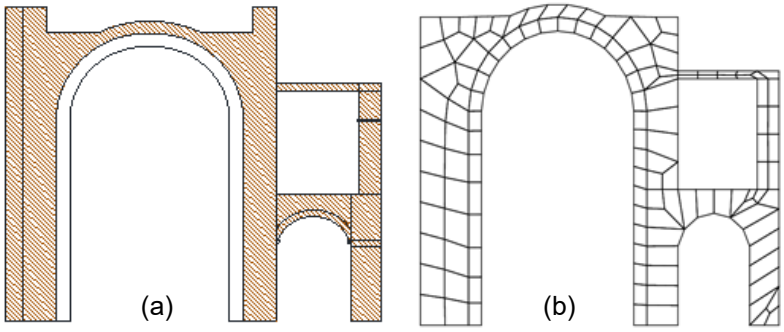


Figura 3. Sección transversal (a) y malla de elementos rígidos del macroelemento en estudio (b).

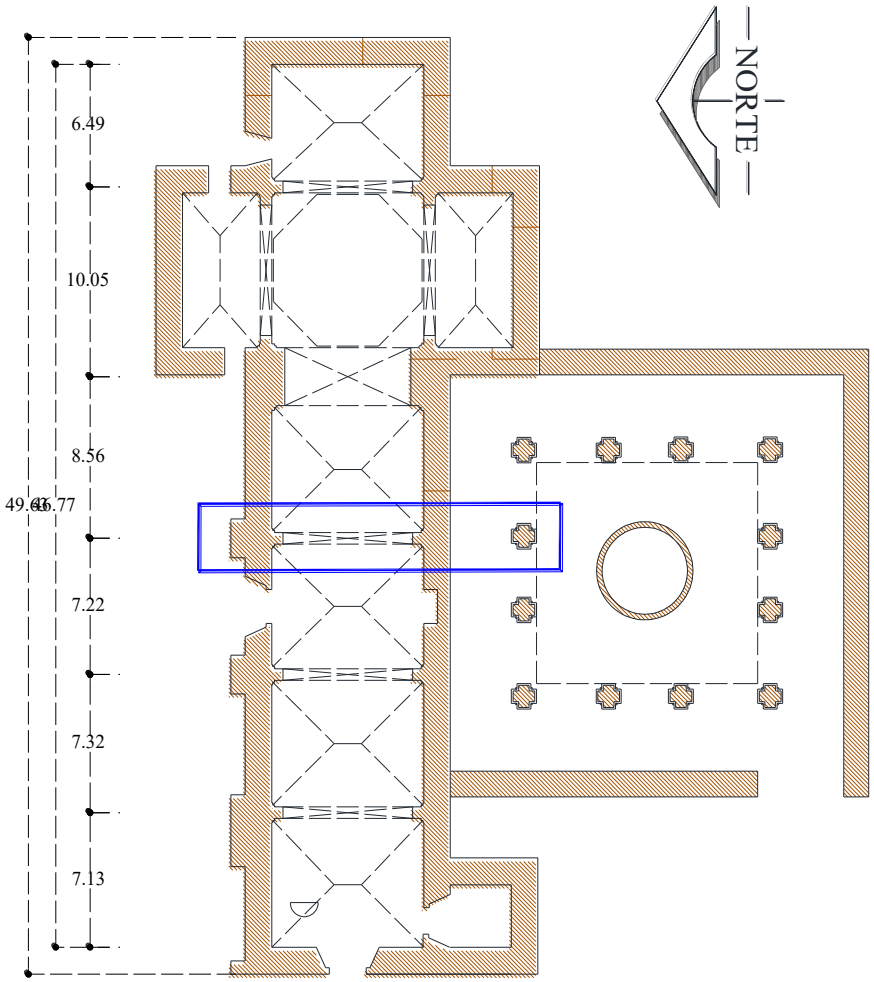


Figura 4. Planta del conjunto conventual y ubicación del macroelemento analizado.

El criterio utilizado para la ubicación del macroelemento fue generar un elemento biplanar en donde la rigidez lateral fuera lo más reducida posible, incluyendo tanto a la nave del templo como a los dos niveles del claustro, con la finalidad de obtener los mayores desplazamientos laterales del conjunto.

RESULTADOS

Daños por tensión

Se presentan (Figura 5) las zonas del macroelemento con fallas por tensión producidas por el registro sísmico de la estación SAPP (que fue la más crítica de las nueve) sin escalamiento de aceleraciones, evidenciando que los mayores grados de daño por tensión ocurren en el intradós la bóveda de la nave extendiéndose a los riñones y en el claustro alto. El comportamiento resultó similar para los restantes ocho registros sísmicos, por lo que el contenido frecuencia de éste evento en particular, de ocurrir con características similares cerca de la ciudad de Morelia generaría daños de consideración que pondrían en riesgo tanto la bóveda del templo como el claustro.

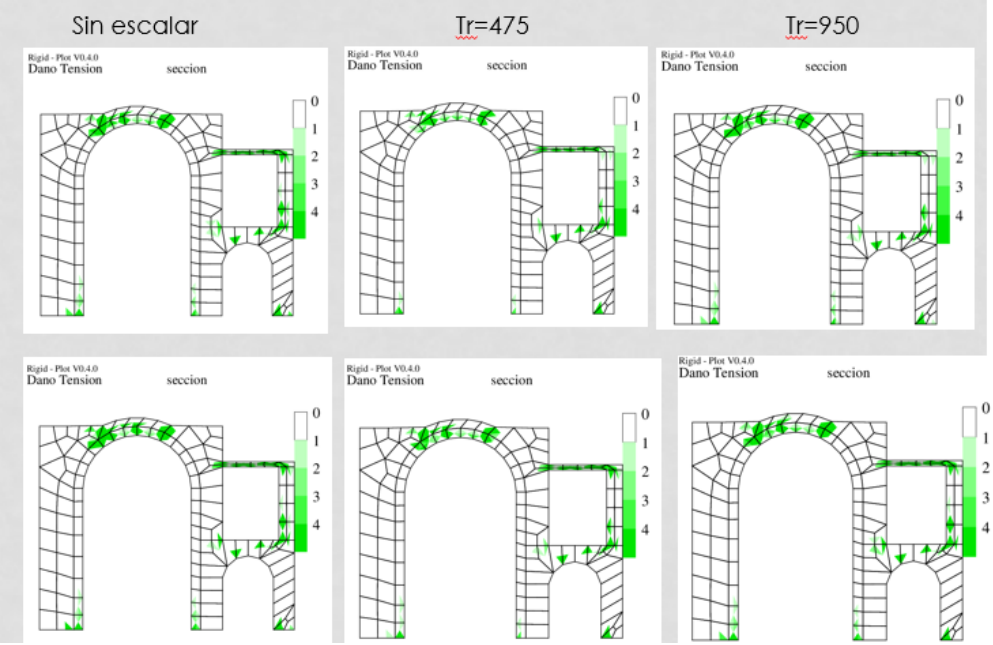


Figura 5. Zonas de esfuerzos de tensión máximos para el sismo de la estación SAPP.

Desplazamiento laterales máximos

Los desplazamientos laterales máximos (Figura 6) alcanzaron un valor de 8.42 centímetros a nivel de la bóveda del templo para el registro SAPP sin escalamiento, valor que resulta muy grande para éste tipo de edificaciones lo que pone de manifiesto que se presentaría el colapso con la consecuente pérdida de dicho elemento, incluyendo su valiosa ornamentación.

Energía histerética disipada

La energía histerética es una medida que se relaciona directamente con el daño, por lo que del análisis para las tres condiciones de sismos considerados, que son sin escalar, y escalados para periodos de retorno de 475 y 975 años, se evidencia una mayor energía disipada para el sismo sin escalamiento, llegando a valores de 17.259e6 Joules para en el caso del análisis considerando la componente horizontal y vertical simultáneas para la estación sísmica PZPU (Figura 7).

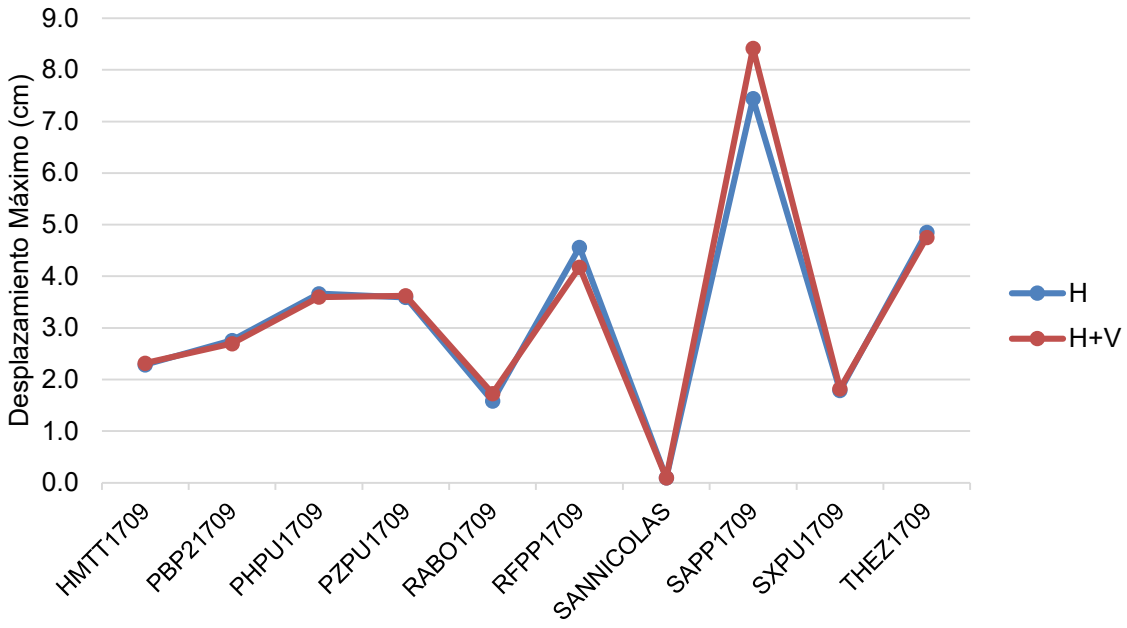


Figura 6. Desplazamientos laterales máximos componente horizontal (H) y horizontal más vertical (H+V) sin escalar.

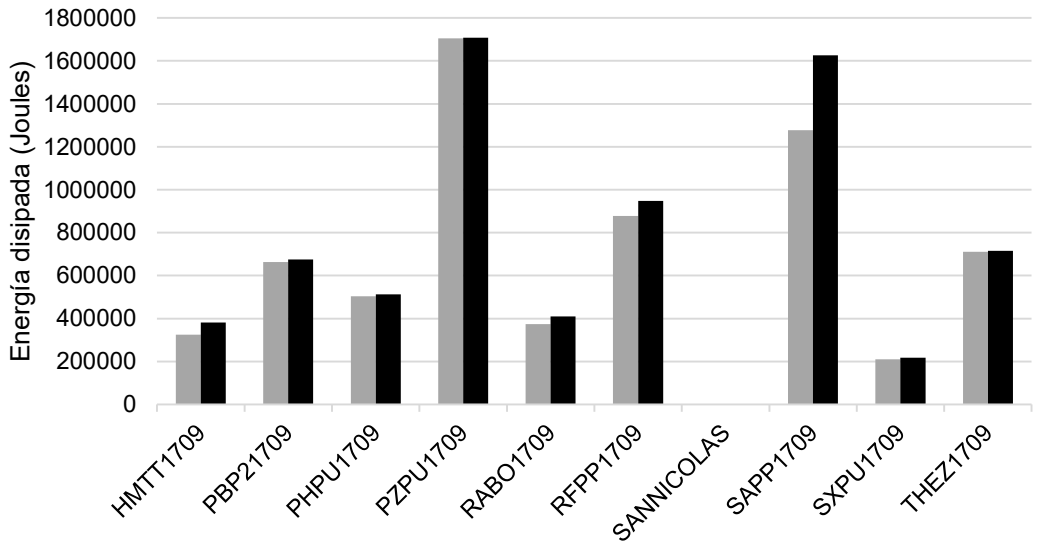


Figura 7. Energía histerética disipara para registros sin escalar. Componente horizontal (gris) y componente horizontal más vertical (negro).

Índices de daño

Para tener un mejor indicador de los grados de daño en la dirección transversal de la nave y claustro, en las Figuras 8 a 10 se presentan los índices de daño para la demanda sísmica sin escalar y con escalamiento, los cuales fueron calculados utilizando la formulación de Park, Ang y Wen (Park et al, 1987) para estructuras de mampostería:

$$D = \frac{U_m}{U_f} + \frac{\varepsilon}{q_u * U_f} \int dE \tag{1}$$

En la expresión anterior $\boldsymbol{U_m}$ es la deformación lateral máxima, $\int \boldsymbol{dE}$ es la energía histerética disipada, $\boldsymbol{U_f}$ es el máximo desplazamiento bajo carga lateral monotónica, $\boldsymbol{q_u}$ la resistencia a la fluencia y ε una constante experimental positiva igual a 0.075. El índice de daño es una cantidad normalizada, cuyo valor es, por definición, entre 0 y 1. El valor del índice de daño a cero denota una estructura no dañada, es decir, el comportamiento elástico lineal de la estructura durante el terremoto, mientras que un valor mayor o igual a 1 denota la falla de la estructura, es decir, colapso local o general de la misma. En las Figuras 7 a 9 se presentan los índices de daño calculados que muestran que un sismo intraplaca de magnitud similar al ocurrido el 19 de septiembre de 2017 con epicentro cercano a Morelia generaría un daño de grave a colapso en el Ex convento.

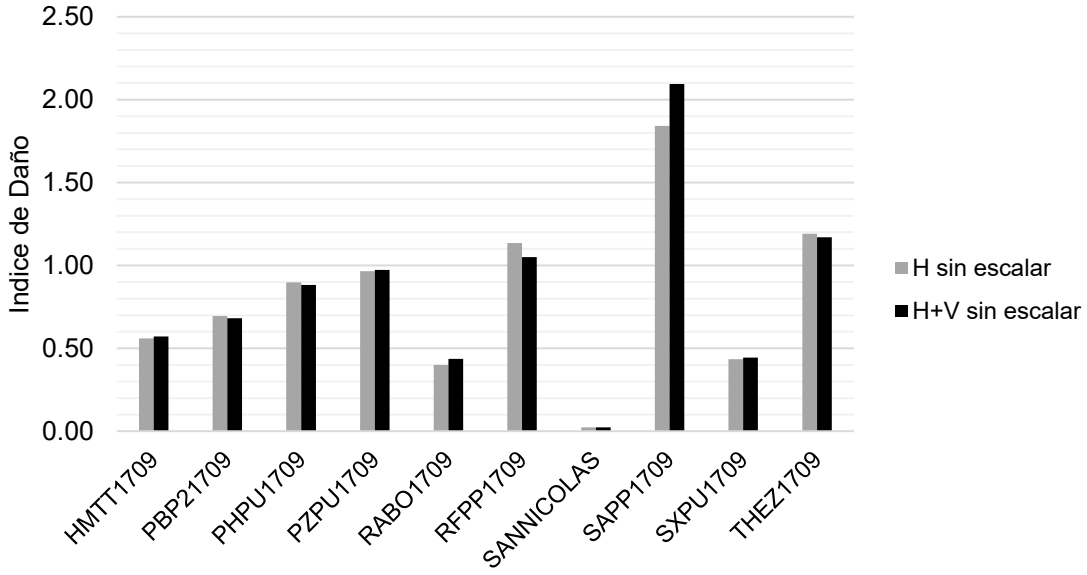


Figura 8. Índices de Daño en el macroelemento para aceleraciones sin escalar.

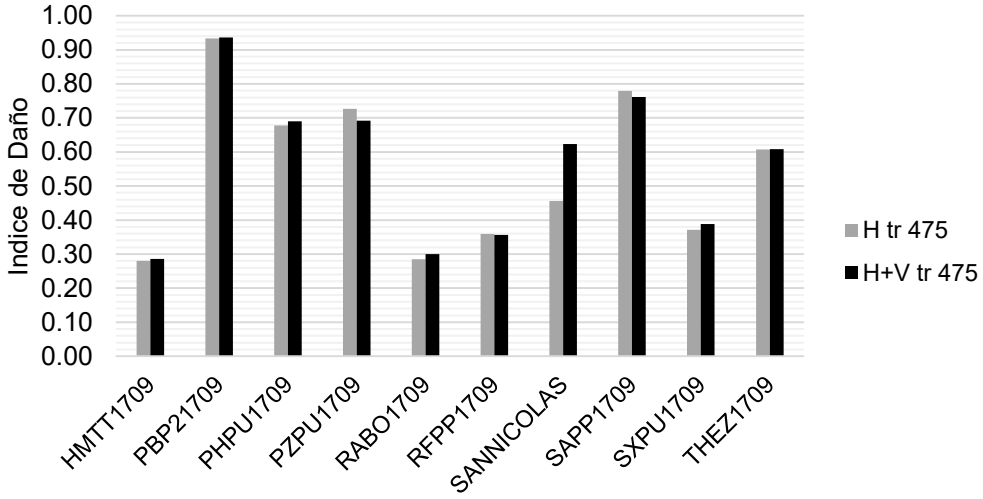


Figura 9. Índices de Daño en el macroelemento para aceleraciones escaladas a un período de retorno tr=475 años.

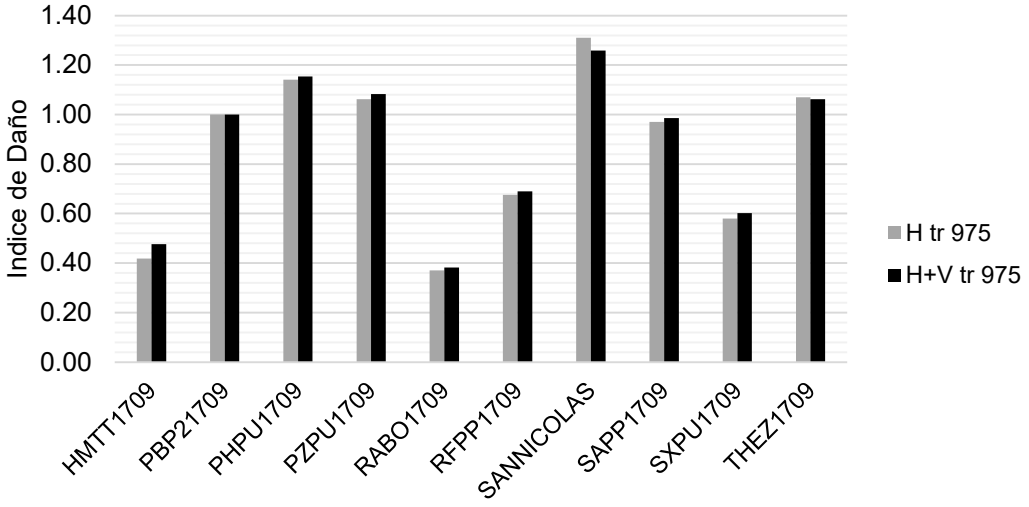


Figura 10. Índices de Daño en el macroelemento para aceleraciones escaladas a un período de retorno tr=975 años.

Considerando que un índice de daño cero significa sin daño y que uno significa colapso, los valores obtenidos para el caso de sismo sin escalamiento alguno excedieron significativamente los índices obtenidos para recurrencias de 475 y 975 años en Morelia, lo anterior no significa que en un futuro no se puedan llegar a experimentar el nivel de aceleraciones de Puebla y Morelos, ya que pueden estar asociados a recurrencias mayores a 975 años que son por completo plausibles. Para el caso de los registros sin escalamiento la estación SAPP presentó los mayores índices tanto para componente horizontal como para horizontal más vertical, y en el 30 por ciento de los casos si un sismo con características similares se produjera cerca del Ex convento de San Diego podría producir el colapso de la bóveda y el claustro alto. Resulta importante resaltar que en el caso de un período de retorno de 475 años, que es mucho más probable que ocurra ya que tiene una probabilidad de ocurrencia del 10 por ciento en 50 años, un evento de epicentro cercano con un contenido de frecuencias altas podría producir en el Ex convento de San Diego daños de extensivos a graves, ya que en un 60 por ciento de los casos van desde 0.5 a cerca de la unidad.

CONCLUSIONES

El Ex convento de San Diego y templo de Guadalupe en la ciudad de Morelia, presenta una alta vulnerabilidad sísmica ante la presencia de sismos que se pudieran producir con epicentro entre 85 y 100 kilómetros. En todos los casos el patrón de daños por tensión fue similar, evidenciado que para ese tipo de eventos intraplaca los daños podrían concentrarse en la bóveda del templo y el claustro alto. En cuanto a los desplazamientos laterales máximos en los registros sin escalar llegaron a alcanzar un valor de 8.418cm para el registro de la estación SAPP, el cual, excede significativamente el desplazamiento máximo permisible establecido por expertos que puede ser del 0.2 por ciento de la altura, es decir, de 2.75 centímetros considerando la altura al extradós de la nave del templo que es de 13.76 metros. Por último, para todos los casos y las diferentes recurrencias analizadas, los daños esperados podrían ir de extensivos a colapso, por lo que resulta imperioso llevar a cabo estudios con mayor detalle en este inmueble, de cara a establecer estrategias de conservación que permitan a futuro reducir la alta vulnerabilidad que ´presenta en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Casolo, Siro. and Peña, Fernando. Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (2007), **36**: 1029-1048.
2. García Acosta, Virginia y Suárez Reynoso, Gerardo. Los sismos en la historia de México, Tomo I, México: UNAM/CIESAS/FCE, 1996, 718p.
3. Peña, F. RIGID (v.0.4.1) *Programa de Elementos Rígidos para en Análisis Dinámico no Lineal de Estructuras de Mampostería*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México (2010).
4. Y. J. Park, Y.J., A. H-S. Ang, A. H-S., and Wen, Y.K. Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings. *Earthquake Spectra* (1987), **3**:1, 1-26.

IMPORTANCIA DE DESARROLLAR HABILIDADES Y COMPETENCIAS EN AUTOCAD PARA SER COMPETITIVOS EN EL SECTOR INDUSTRIAL: CASO ITESI

Estefany Obed Olmos Elizarraraz, Leslie Mayte Rico Guerra, César Manuel Hernández Mendoza, Luz María Rodriguez Vidal

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

AutoCAD es uno de los principales programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) que un estudiante de ingeniería puede conocer, es incluso uno de los más populares entre la población general. Esta gran popularidad, le ha permitido incidir en diversas áreas del sector laboral como generación de planos, bocetos, diseños y documentación técnica detallada. Los estudiantes de la carrera de Sistemas Automotrices del TECNM/ ITS de Irapuato, tienen dentro de su plan o retícula académica, varias materias relacionadas al uso del CAD con el fin de poder desarrollar habilidades y competencias que impacten en su perfil de egreso, el cual es: “Aplica conocimientos y habilidades generales de ingeniería en las áreas de diseño”, “Desarrolla sistemas automotrices, aplicando el diseño de instalaciones”, y “Utiliza normas nacionales e internacionales pertinentes (GD&T)”, por lo que aprender, conocer y aplicar estas habilidades es sumamente vital para su carrera. Así mismo, existe una gran variedad de programas especializados en CAD orientados al estudio y análisis para el ensamble de piezas mecánicas, los cuales también son muy importantes de conocer y coadyuvan al alcance del perfil profesional. Según los resultados observados en una encuesta aplicada a estudiantes de noveno semestre, manifestaron que los programas como Solid Works y Catia son los más útiles en su carrera en base a lo que han visto en semestres anteriores; es interesante mencionar, que ninguno de ellos mencionara AutoCAD. Esta situación es preocupante, no tanto por debatir si es mejor que otros programas, sino por el hecho de que están perdiendo las oportunidades que les brinda dominar este software, ya que pueden encontrar o perder oportunidades laborales. El desarrollo y metodología de este proyecto permitió a los estudiantes generar una base sólida de conocimientos en dibujo técnico y diseño en 2 y 3D así como prepararse profesionalmente para cumplir con la demanda de la industria. Por esta razón, creemos pertinente que la enseñanza y desarrollo de habilidades de dibujo en el software AutoCAD es importante e indispensable de llevar en los primeros semestres y antes de hacer uso de otros programas especializados, ya que además de conocer términos y herramientas de dibujo que les permita formarse académicamente, también les permite tener la oportunidad de desarrollarse profesionalmente y eventualmente aceptar vacantes en otras áreas y ciencias afines al CAD que involucran el uso de este software para el desarrollo de sus procesos y actividades diarias. Se obtuvo un portafolio de evidencias individual con 29 prácticas, con el que los estudiantes pueden demostrar sus conocimientos en este software y tener la oportunidad de ejercer su profesión en el área de estudio o bien ser competitivos en el sector industrial, en donde ellos mismos y las empresas valoren que las habilidades desarrolladas con este programa son útiles en múltiples campos laborales.

INTRODUCCIÓN

El Ingeniero en Sistemas Automotrices cuenta con una retícula en donde podemos encontrar el Diseño Asistido por Computadora (CAD), que incide directamente en otras carreras como Ingeniería en Mecatrónica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Civil, Ingeniería Aeronáutica/Aeroespacial e Ingeniería Industrial, entre otras, para llevar a cabo sus procesos, actividades o que tienen un impacto directo sobre la línea de producción y manufactura que llevan a cabo, es por ello que es importante que los estudiantes de esta carrera tengan conocimientos y habilidades en CAD que les permita cumplir con las exigencias y requerimientos que la industria actual les demande. En este mismo sentido, podemos confirmar que utilizar programas especializados en CAD es para ellos una obligación, y utilizar más de una herramienta podría darles ventajas significativas sobre otros compañeros y ser más competitivos.

Uno de los principales problemas que se tiene, es precisamente la gran variedad de software especializado en CAD que un estudiante podría conocer y manejar, y sobretodo trabajar a profundidad, ya que el tiempo o estancia en su carrera podría no alcanzar para terminar de conocer y aplicar todas las herramientas y funciones que ofrecen algunos programas, por esta razón en ocasiones es complicado que un estudiante sepa manejar más de un programa a un nivel aceptable. Esta situación hasta cierto podría ser normal, ya que se requiere de mucho tiempo, dedicación y experimentación para conocer un solo software de diseño asistido por computadora de los más de 30 existentes en el mercado. Como parte de la vinculación del ITESI con el sector productivo, hemos identificado empresas del ramo automotriz que realizan sus procesos y actividades con un programa especializado en CAD especifico, el cual es difícil de adquirir para una institución educativa debido a los altos costos de licencia o bien por que requiere de otros componentes o equipos de cómputo para que tengan un buen funcionamiento. Sin embargo, esta no es una excepción o justificación para que los estudiantes y profesores se dediquen a trabajar con un software único, por lo general, el conocer los principios básicos y funciones principales suele ser muy similar en cada programa.

Por otra parte, en una encuesta aplicada a los estudiantes de noveno semestre de Ingeniería en Sistemas Automotrices, indicaron que los programas especializados en CAD más útiles en su carrera son Solid Works y Catia, por un lado consideramos esta respuesta como correcta, dado que ambos programas cumplen eficazmente con las expectativas esperadas académicamente para que los estudiantes alcancen las competencias y objetivos de su programa académico, pero los estudiantes ignoran la importancia al diseño generado en el programa AutoCAD, por esta razón consideramos que los estudiantes pueden perder oportunidades laborales en un futuro cercano, es decir, una vez que egresan, la lógica diría que el estudiante de Ingeniería en Sistemas Automotrices terminará laborando en una empresa del ramo automotriz, sin embargo en la práctica y en base a las materias y conocimientos adquiridos durante su trayectoria escolar, el estudiante puede llegar a trabajar o especializarse en alguna empresa que no esté relacionada al sector automotriz, y por esta razón, proponemos que el uso de AutoCAD debe ser enseñado al inicio de su carrera. De esta manera, en un futuro cercano, pudiera darles la oportunidad de trabajar desempeñando las funciones de un ingeniero en Sistemas Automotrices o bien en empresas dedicadas por ejemplo a la Ingeniería Civil, la Arquitectura, la Ingeniería Mecánica, Diseño Industrial, Ingeniería Naval o Aeronáutica, Modelado 3D, ya que todas ellas inciden en las habilidades y funciones que les brinda AutoCAD.

TEORÍA

Comenzamos dando relevancia al uso de AutoCAD en la industria a nivel mundial, según datos y cifras reportadas por Statista (portal en línea que recopila datos estadísticos informativos y precisos) menciona en un reporte titulado: Ingresos del mercado del diseño asistido por ordenador (CAD) en todo el mundo de 2016 a 2018: "*Los nombres más importantes en el mercado CAD han sido típicamente Autodesk y Dassault, los cuales representan alrededor de una cuarta parte de la cuota de mercado total de la industria. Solo en 2019, Autodesk reportó más de 730 millones de dólares en ingresos solo de sus productos AutoCAD*" (statista, 2022), esta información nos indica la fuerte presencia de AutoCAD y la gran popularidad con la que cuenta a nivel mundial y con ello la necesidad de que los estudiantes conozcan por lo menos las características, comandos y funciones básicas del programa especializado, además según las fuentes consultadas, las ganancias previstas indican que nuevas empresas estarán haciendo uso de este software. Esta misma fuente indica en otro reporte titulado: Cuota de mercado del diseño asistido por ordenador (CAD) en todo el mundo de 2016 a 2018 y en 2023 y 2028, por tecnología: "*Autodesk, con su programa insignia AutoCAD, es la empresa más grande del mercado y representa casi el 30 por ciento de los ingresos totales*" (statista, 2022), confirmando que la propuesta presentada en este proyecto debe ser considerada tanto por profesores, estudiantes y profesionistas.

Una vez que se ha recalcado la importancia del software, podemos mencionar como trabaja: "*AutoCAD trabaja en capas con imágenes vectoriales, aunque también se pueden importar imágenes de mapa de bits, lo que nos hace pensar directamente en programas de estilo como Photoshop o*

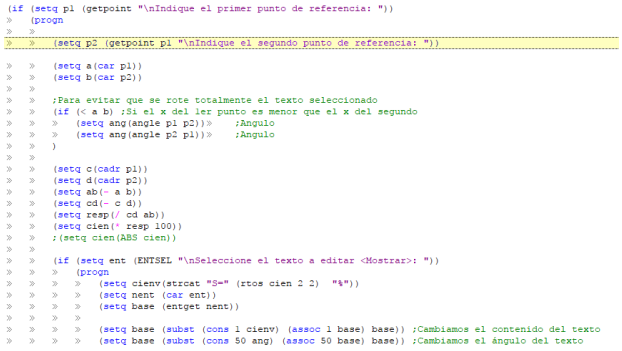
Illustrator. Sin embargo, toda su interfaz está diseñada para el diseño de planos y estructuras" (toulouselautrec, 2021). Conociendo su forma de trabajo podemos decir que, en AutoCAD, una capa podría ser representada por una hoja transparente sobrepuesta una con otra, y en cada una de estas hojas pueden existir formas y líneas que una sobre otra representa algún plano u objeto que se esté diseñando, de esta manera la función de capas permite organizar y estructurar los diseños que el usuario va generando hasta terminar su trabajo, cabe recalcar que estas capas no son visibles a simple vista para el diseñador. Por otra parte, las imágenes vectoriales indican que los diseños generados en AutoCAD no pierden su calidad de imagen al hacer un zoom muy alto y mantienen su calidad dado que todas las formas y líneas se crean en base a fórmulas matemáticas que generan elementos geométricos, lo que, si conlleva, es que una imagen o diseño a mayor calidad de definición requiere de mayor espacio en memoria del equipo para almacenarla.

Programación con LISP

Al igual que muchas otras plataformas y programas que incorporan módulos, complementos o actualizaciones, AutoCAD cuenta con una función para facilitar el diseño por medio de la programación. LISP es uno de los lenguajes de programación más longevos en la historia de la programación, creado a mediados de los años 50´s, su acrónimo significa procesamiento de listas (list processing). En LISP, todos los cálculos se expresan en función de al menos un objeto, los objetos pueden ser otras funciones, elementos de datos (como constantes o variables) o estructuras de datos (Reclu IT, 2020).

AutoCAD utiliza LISP como un lenguaje de programación que ha sido adaptado para trabajar funciones potentes que ayudan a generar los diseños esperados por el usuario, y a esta evolución le han llamado AutoLISP, gracias a este complemento, se puede crear rutinas y programas que interactúen con AutoCAD para que el usuario acceda rápidamente a los comandos preestablecidos e ingrese datos para facilitar su trabajo. La estructura de un programa en AutoLISP es semejante a la sintaxis y reglas del lenguaje HTML o a un archivo .bat, en este caso, AutoLISP evalúa línea por línea y ejecuta las instrucciones, respetando la jerarquía de los operadores, ya que se utilizan muchos paréntesis para programar rutinas, en la Figura 1 se observa un ejemplo.

Fuente: https://www.devcadlisp.com/autolispdev/el-lenguaje-de-programacion-autolisp/



```
(if (setq p1 (getpoint "\nIndique el primer punto de referencia: "))
  (progn
    (setq p2 (getpoint p1 "\nIndique el segundo punto de referencia: "))

    (setq a(car p1))
    (setq b(car p2))

    ;Para evitar que se rote totalmente el texto seleccionado
    (if (< a b) ;Si el x del 1er punto es menor que el x del segundo
      (setq ang(angle p1 p2))    ;Angulo
      (setq ang(angle p2 p1))    ;Angulo
    )

    (setq c(cadr p1))
    (setq d(cadr p2))
    (setq ab(- a b))
    (setq cd(- c d))
    (setq resp(/ cd ab))
    (setq cien(* resp 100))
    ;(setq cien(ABS cien))

    (if (setq ent (ENTSEL "\nSeleccione el texto a editar <Mostrar>: "))
      (progn
        (setq cienv(strcat "S=" (rtos cien 2 2)  "%"))
        (setq nent (car ent))
        (setq base (entget nent))

        (setq base (subst (cons 1 cienv) (assoc 1 base) base)) ;Cambiamos el contenido del texto
        (setq base (subst (cons 50 ang) (assoc 50 base) base)) ;Cambiamos el ángulo del texto
```

Figura 1. Ejemplo de un programa en AutoLISP

Finalmente, en la parte académica, el perfil de egreso de la Ingeniería en Sistemas Automotrices del TECNM, menciona que un egresado de esta carrera debe ser capaz de:

- Desarrollar sistemas automotrices, aplicando los procesos de manufactura desde la planeación y diseño de instalaciones hasta las operaciones.
- Aplicar herramientas computacionales de acuerdo a las tecnologías de vanguardia, para el diseño, simulación, operación y optimización de sistemas automotrices acordes a la demanda del sector industrial.

Por lo que este proyecto pretende que los estudiantes estén consientes de la importancia que tiene AutoCAD en la industria y lo consideren como una herramienta vital para su profesión, además de otros programas especializados en CAD, con el fin de que puedan tener mayores conocimientos y habilidades de diseño 3D que les permita tomar nuevas oportunidades en el mundo laboral.

PARTE EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo este proyecto, los estudiantes siguieron una metodología de cuatro etapas en la cual fueron adquiriendo las habilidades y competencias al utilizar AutoCAD, en la Figura 2, se presenta esta metodología.

Fuente: Elaboración propia

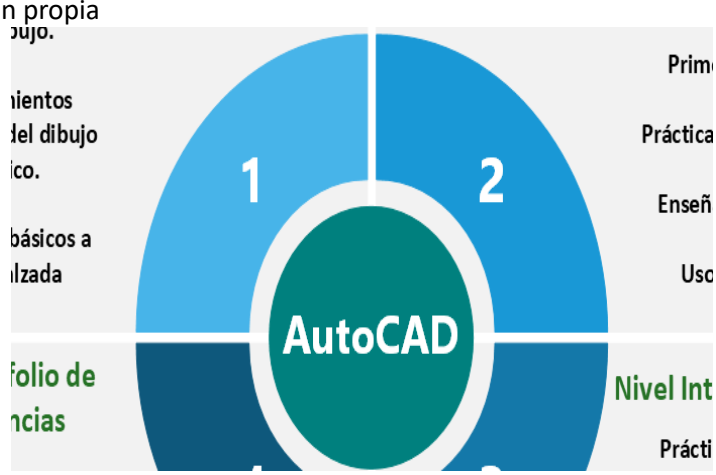


Figura 2. Metodología utilizada por los estudiantes de Sistemas Automotrices

La primera etapa es la de **Fundamentos teóricos**, en donde el profesor lleva la mayor carga de trabajo, dado que es necesario que presente diversas diapositivas para dar a conocer: ¿Qué es el dibujo técnico?, su historia, antecedentes y sobretodo la aplicación del mismo en la vida diaria de la industria. Así mismo, dar a conocer la importancia de dibujos y diseños con medidas precisas y tolerancias aceptadas. Con ello, los estudiantes pueden entender que es el Diseño Asistido por Computadora y porque es necesario en su vida profesional, en esta parte se presentan algunos diseños generados en diversos programas especializados en CAD, con el fin de atraer su atención y el interés por saber cómo generarlos. Por otra parte, algunos ejercicios se realizaron a mano alzada aplicando el trazo de líneas y formas básicas, además de conocer diversas perspectivas sobre el dibujo. En esta parte de la metodología se explica la simbología básica del sistema GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing), y se da lectura de algunos bocetos en base a estos símbolos. Observe la Figura 3, en donde se presenta parte de la simbología GD&T que fue generada como una de las primeras prácticas realizadas por los estudiantes.

Fuente: Estudiante Estefany Obed Olmos Elizarraraz

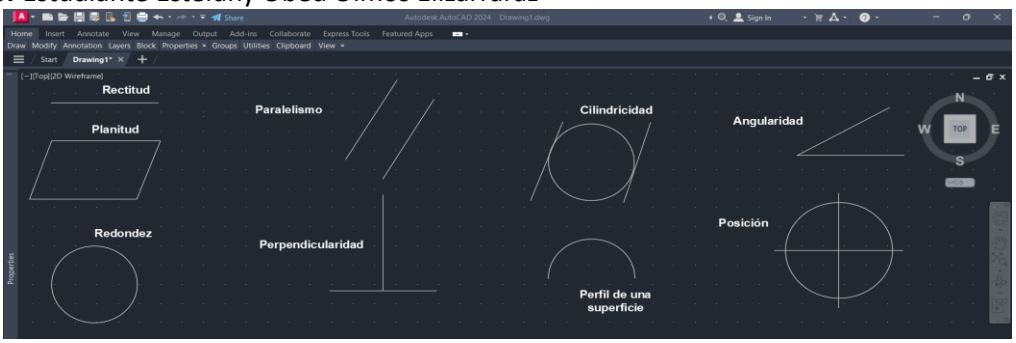
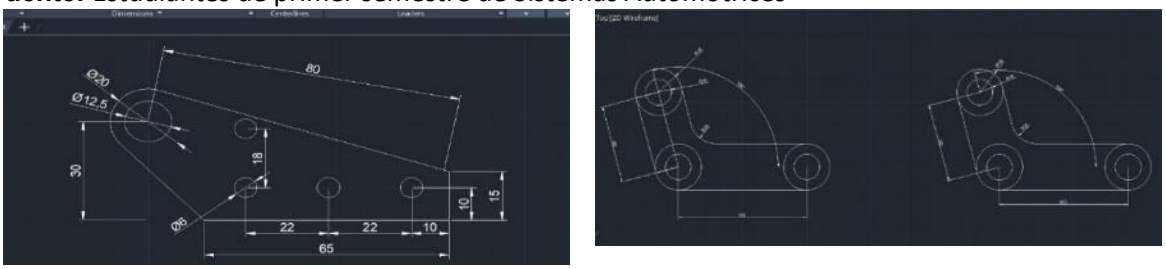


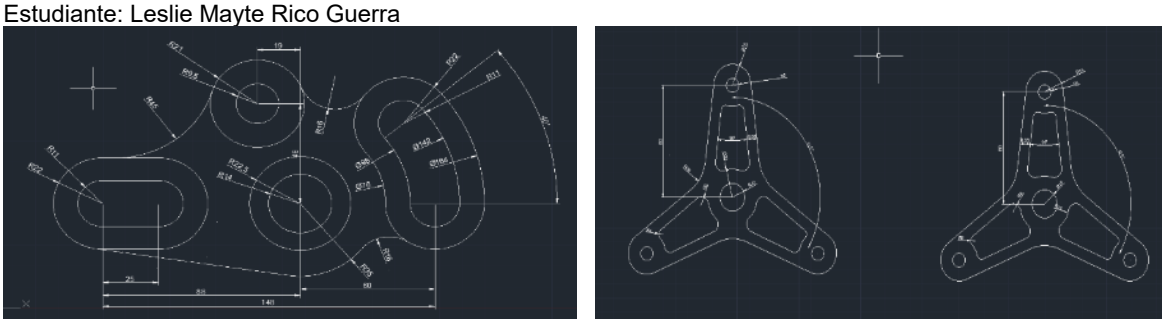
Figura 3. Práctica para generar la simbología GD&T

En la segunda etapa denominada **primeros pasos**, los estudiantes conocieron la interfaz y área de trabajo de AutoCAD, generaron formas y figuras básicas, herramientas de cotas, mover, girar entre otras. El nivel de complejidad en esta etapa era muy sencillo, pero la variedad de diseños a realizar permitía que el estudiante pudiera recordar los pasos y comandos para generar el boceto solicitado, cabe recalcar que, como parte de este estudio, se propone que el profesor realice de manera guiada cada una de las prácticas en conjunto con todos los estudiantes del grupo, con el fin de que se sientan seguros de que están dando seguimiento puntual a la actividad. En la Figura 4, se observan algunos ejercicios realizados que van incrementando su dificultad.

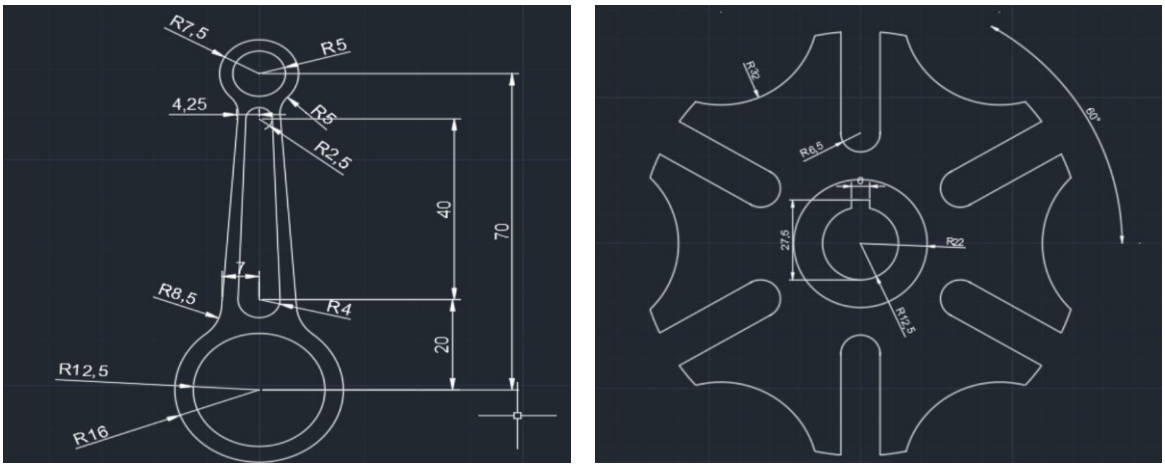
Fuente: Estudiantes de primer semestre de Sistemas Automotrices



Estudiante: Leslie Mayte Rico Guerra



Estudiante: Juan Luis Rocío García



Estudiante: Naret Rosales López

Figura 4. Prácticas que realizaron los estudiantes en la segunda etapa

De igual forma, los comandos, formas y herramientas utilizadas de manera general en esta etapa se muestran en la Tabla 1.

En la etapa tres de **nivel intermedio**, los estudiantes ya podían comenzar a realizar en AutoCAD la mayoría de los diseños solicitados por el profesor, únicamente requerían las cotas y perspectivas de cada una de ellas, en algunos casos lograban terminarlas antes de que el profesor lo realizara de manera guiada con todo el grupo, en base a esta situación, se demuestra que realizar la mayor cantidad posible de prácticas promueve que los estudiantes aprendan los comandos o herramientas mayormente utilizadas y sobretodo las puedan aplicar sobre el diseño requerido, así mismo, los comandos presentados en la tabla anterior seguían siendo utilizados para las prácticas de nivel intermedio.

Comando	Alias	Significado	Comando	Alias	Significado
PLINE	PL	Pol	LINE	L	Línea
ARC	A	Arco	TRIM	T	Recorta
OFFSET	O	Desfase	MIRROR	M	Simetría
ROTATE	RO	Girar	ARC	A	Arco
SKETCH	(no hay)	Boceto	ELLIPSE	EL	Elipse
MOVE	M	Desplaza	FILLET	F	Empalme
CIRCLE	C	Circulo	ARRAYPOLAR	(no hay)	Matrizpolar
HATCH	H	Sombrea	COPY	CO	Copiar

Tabla 1. Comandos utilizados para generar los diseños en la etapa dos

Por otra parte, a pesar de que el semestre ya estaba avanzado, el profesor continuaba realizando con todo el grupo los diseños con ayuda del proyector y se invitaba a los estudiantes rezagados que aún no tenían un dominio del programa a sentarse cerca para que pudieran tener la oportunidad de aprenderlo y alcanzar a sus compañeros más adelantados.

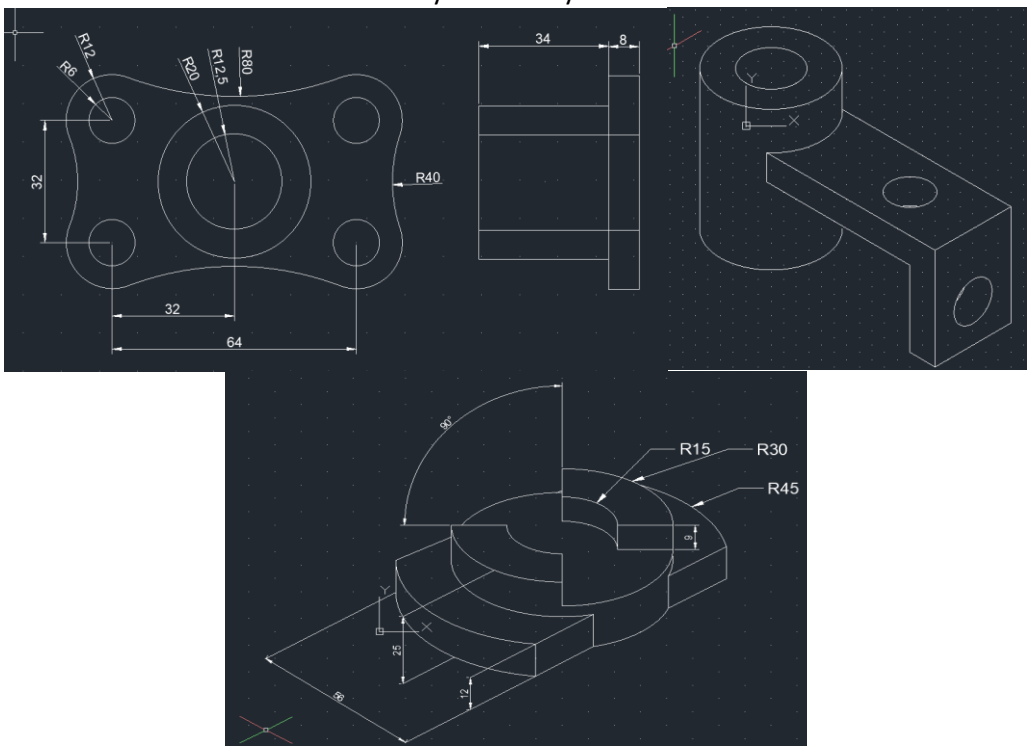
El objetivo de esta etapa era que los estudiantes reafirmaran y practicaran sus conocimientos, sentirse seguros y desarrollar habilidades que eran requeridas en el temario de la materia de Fundamentos de Dibujo y que eventualmente impactaran en el perfil de egreso, de esta manera se les incita y promueve que investiguen por su cuenta que herramientas y comandos eran necesarios para realizar prácticas más avanzadas y laboriosas. En la Figura 5 se presentan algunos diseños generados por los estudiantes de la materia en la etapa intermedia.

Por último, en la etapa 4 denominada "**Portafolio de evidencias**", los estudiantes pudieron generar un documento de manera individual en donde presentan todas sus actividades realizadas. El portafolio de evidencias contiene una portada con membrete institucional, sus datos de identificación y agregan un diseño por hoja, en la última hoja podemos encontrar un diseño de práctica final tipo examen, este documento completo, es requisito para aprobar la materia y es una garantía de que cada estudiante alcanza de manera satisfactoria las competencias de la materia. De esta manera la metodología empleada termina y se analizan ciertas situaciones que inciden con el desarrollo de habilidades en CAD.

Un segundo tema de interés fue la encuesta realizada a los estudiantes de noveno semestre de la carrera, específicamente se encuestó a 45 de ellos, divididos en dos grupos (matutino y vespertino), el principal objetivo fue conocer a su consideración y en base a sus conocimientos ¿Cuál o cuáles de los programas especializados en CAD eran los más importantes para ejercer su profesión? La respuesta fue Solid Works con 32 respuestas y 13 respuestas para Catia, es interesante mencionar, que ninguno de los estudiantes próximos a egresar mencionara AutoCAD, esta situación es preocupante, no tanto por debatir si es mejor que otros programas, sino por el hecho de que están perdiendo las oportunidades que les brinda el saber usar este software, ya que, de acuerdo con las estadísticas presentadas por statista, pueden perder oportunidades laborales en otras ciencias y campos del sector productivo.

Como parte del proyecto se les dio una platica de concientización sobre la importancia de saber usar AutoCad, además de ofrecerles el centro de cómputo de la institución en donde se tiene instalado el programa como parte de los servicios ofrecidos a los estudiantes.

Fuente: Estudiante Juan Luis Rocío García y Leslie Mayte Rico Guerra



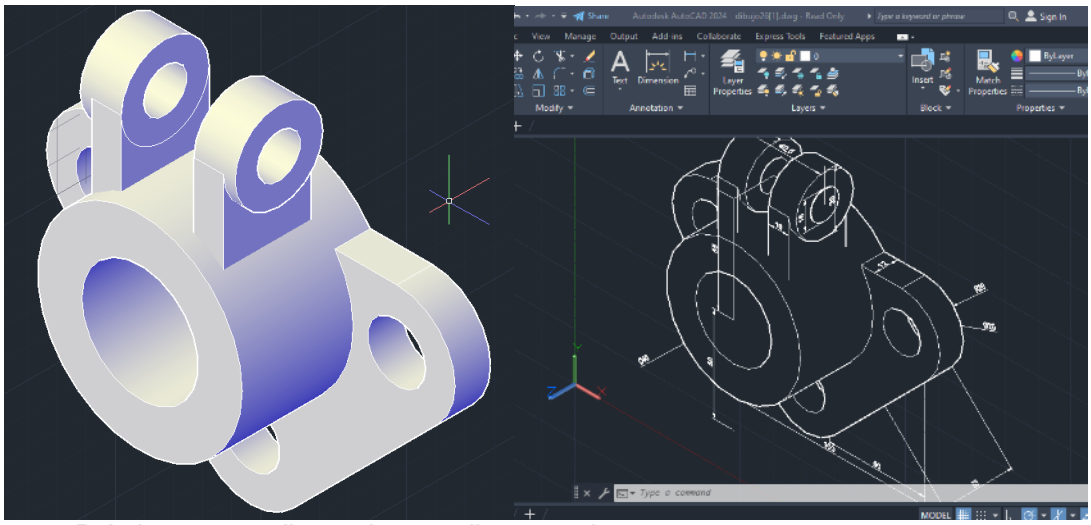


Figura 5. Prácticas que realizaron los estudiantes en la tercera etapa

Otros temas de estudio:

Como parte de este proyecto, se analizan dos situaciones que se han presentado en la carrera de Sistemas Automotrices del ITESI, una de ellas consiste en un concurso denominado: ”Diseño y Modelado 3D” de la Semana Tecnológica, en la que 15 estudiantes de primer semestre han participado para demostrar sus habilidades en AutoCAD, el concurso consistió en realizar a diseño libre un automóvil tipo dragster (vehículo automotriz especializado en competencias de aceleración) empleando este programa, en la Figura 6 se presenta uno de los mejores diseños que los estudiantes generaron, sin ningún tipo de medición o cotas. Lo llamativo de esta situación, es que los estudiantes de primer semestre a los que apenas terminaban de conocer AutoCAD pudieron realizar la actividad y aplicaron los conocimientos recién adquiridos.

Fuente: Estudiante Alan Jesús Ríos Barrientos

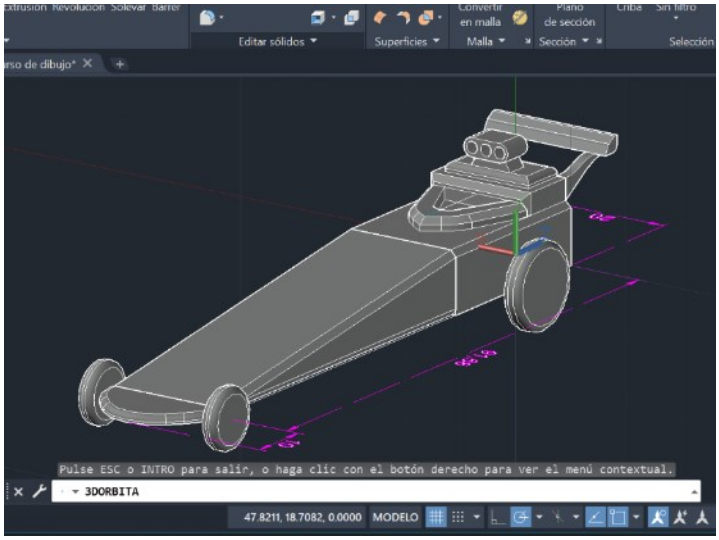


Figura 6. Diseño del dragster ganador en la Semana Tecnológica

RESULTADOS

Se realizaron 24 prácticas en AutoCAD a lo largo del semestre, observe la Figura 7, las cuales fueron incluidas en el portafolio de evidencias, más otros diseños que los estudiantes fueron generando en

otras plataformas del CAD que fueron usados al final del semestre con la intención de que conocieran de su existencia y cómo funcionan, los estudiantes lograron adquirir y alcanzar las competencias de la materia, se comprobó de la siguiente manera: al iniciar, el profesor mostraba el boceto con las cotas correspondientes del modelo al grupo y tenían una hora para tratar de generarla, todos tenían avances considerables sobre el mismo y más de la mitad del grupo lograba terminarlas antes de que el profesor posteriormente las hiciera con ayuda del proyector, cabe recalcar que las últimas 4 prácticas incluían diseño en perspectivas.

Fuente: Estudiantes de primer semestre de Sistemas Automotrices

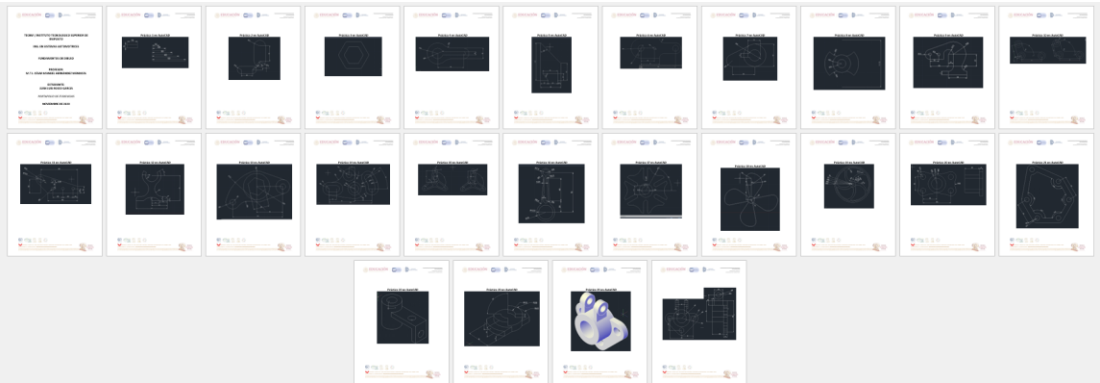


Figura 7. Portafolio de evidencias con las prácticas realizadas

Por otra parte, el informe ejecutivo de seguimiento a egresados de Sistemas Automotrices del 2021 y 2022 del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), presenta datos relevantes para este proyecto, pues los egresados manifiestan que sus principales expectativas para tomar algún posgrado son en áreas de la Manufactura y el Diseño Asistido por Computadora, este informe también determina la oferta laboral para los estudiantes, ya que los resultados indican que los egresados de la carrera que trabajan son favorables con un 75%, mientras que el porcentaje restante continúa con un posgrado o están a la espera de ser llamados por alguna empresa. Así mismo, los datos estadísticos muestran que a nivel institucional y analizando los resultados de los egresados de 13 programas educativos del ITESI en 2022, muestran que la empresa en la que labora la mayor cantidad de egresados pertenece al sector de la industria automotriz, lo que indica que el sector productivo de la región continuará requiriendo estudiantes de Sistemas Automotrices con habilidades y competencias aptas para satisfacer sus necesidades. Con esta información, se propone que el uso y enseñanza de AutoCAD son favorables para los estudiantes, por lo que es importante que este programa educativo domine por lo menos las funciones básicas en el primer semestre de la carrera con la materia de Fundamentos de dibujo, ya que la presencia de AutoCAD en muchas de estas empresas y algunas otras que no son propiamente del sector automotriz los podrían requerir.

CONCLUSIONES

La importancia del aprendizaje y dominio del programa AutoCAD para los estudiantes de Sistemas Automotrices del ITESI, se evidencia en diversos aspectos cruciales para su formación y futura inserción laboral. Este proyecto, ha permitido destacar la relevancia de AutoCAD en el desarrollo de habilidades y competencias necesarias:

Demanda en la Industria: AutoCAD, como uno de los programas más utilizados en Diseño Asistido por Computadora (CAD), tiene una presencia significativa en la industria a nivel mundial, las cifras de ingresos y la cuota de mercado muestran que es una herramienta clave, reportando ganancias considerables.

Perfil de Egreso: El perfil de egreso de la Ingeniería en Sistemas Automotrices incluye la aplicación de conocimientos generales de ingeniería en diseño, el desarrollo de sistemas automotrices, y la utilización de normas nacionales e internacionales pertinentes, incluyendo GD&T.

Diversidad de Aplicaciones: AutoCAD no solo se limita al sector automotriz, sino que tiene aplicaciones en diversas áreas, como Ingeniería Civil, Arquitectura, Ingeniería Mecánica, Diseño Industrial, Ingeniería Naval, Aeronáutica, Animación y Modelado 3D, de esta manera los estudiantes que dominan este programa no solo tienen la capacidad de trabajar en la industria automotriz, sino que también pueden explorar oportunidades en campos relacionados, ampliando así sus perspectivas profesionales.

Al considerar este proyecto como una propuesta para implementarse con todas las generaciones futuras, no solo beneficiaría a los estudiantes, sino que también contribuye al crecimiento y éxito continuo de la institución educativa y su vinculación con las demandas en la industria de la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. Reclu IT. (13 de 10 de 2020). *recluit.com*. Obtenido de https://recluit.com/que-es-lisp/statista. (17 de 03 de 2022). *www.statista.com*. (L. S. Vailshery, Editor)
2. Obtenido de https://www.statista.com/statistics/790005/worldwide-computer-aided-design-market-by-technology/statista. (17 de 03 de 2022). *www.statista.com/*. (L. S. Valishery, Editor)
3. Obtenido de https://www.statista.com/statistics/789999/worldwide-computer-aided-design-market/
4. toulouselautrec. (05 de 11 de 2021). *www.toulouselautrec.edu.pe*. Obtenido de https://www.toulouselautrec.edu.pe/blogs/que-es-autocad

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA RECONOCIMIENTO DE HERRAMIENTAS UTILIZANDO PROGRAMACIÓN DE DISPOSITIVOS MÓVILES

César Manuel Hernández Mendoza y Citlali García Hernández

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La Inteligencia Artificial es una ciencia que cada día se está involucrando en actividades de diversos sectores como la industria, comercio, marketing, sociedad, e-commerce, redes sociales, entre muchos otros más. Se tiene previsto que el sector industrial demandará a corto y mediano plazo personal y profesionistas capacitados en temas referentes a las ciencias involucradas como el Big Data, Ciencia de Datos, Internet de las Cosas, Programación, Matemáticas que estén orientados a mejorar y optimizar procesos de manufactura y automatización en las líneas de producción. En base a la literatura que se investigó, se comprueba que hoy en día, existen empresas del ramo industrial que aún dependen de personal humano para hacer reconocimiento visual de piezas en buenas condiciones después de la producción masiva de las mismas y también para la identificación y control del personal interno que labora en la empresa o bien para agrupar y clasificar objetos que se utilizan para la manufactura de algún vehículo o cualquier objeto de esta índole. Por otra parte, es importante introducir las nuevas tecnologías en la materia de Programación Aplicada en la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices del TECNM/ITS de Irapuato, en donde los estudiantes puedan generar e innovar aplicaciones móviles que hagan uso de la Inteligencia Artificial, así como buscar atraerlos al uso y desarrollo de estas tecnologías, incitando y promoviendo conocimientos y competencias que impacten a su perfil profesional. El proyecto permitió generar una aplicación móvil aplicada al reconocimiento de herramientas que suelen encontrarse en un taller mecánico a partir de la toma de una fotografía con el teléfono. Se llevo a cabo una metodología cuantitativa que considera el uso de técnicas de reconocimiento de patrones y se entrenó un modelo de aprendizaje automático implementado en la aplicación móvil. Se obtuvieron resultados favorables después del periodo de pruebas y experimentaciones, así como una identificación correcta de al menos un 97% en cada herramienta utilizada. El desarrollo de esta aplicación es apenas el origen para continuar con mejoras y nuevas aplicaciones y la búsqueda de una implementación industrial. De esta manera los estudiantes tienen conocimientos básicos en Inteligencia Artificial que les permite seguir aprendiendo y desarrollar un perfil investigador en esta área de la ciencia, de esta manera se impulsa el desarrollo científico y tecnológico en los jóvenes de nivel superior del estado de Guanajuato.

INTRODUCCIÓN

La IA se ha convertido en una ciencia fundamental en la era digital, influyendo en sectores tan diversos como el comercio, la medicina y la manufactura. Este avance tecnológico no solo ha facilitado la automatización de procesos, sino que también ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y la precisión en distintos ámbitos. En particular, el sector industrial ha experimentado una creciente demanda de profesionales capacitados en IA, dados los beneficios que esta tecnología aporta a la optimización de procesos y la toma de decisiones.

En paralelo, el campo de la programación de dispositivos móviles ha ganado relevancia como una habilidad clave para ingenieros en sistemas automotrices. La capacidad de desarrollar aplicaciones móviles no solo amplía el espectro de habilidades técnicas de los ingenieros, sino que también les permite abordar desafíos específicos dentro del sector automotriz de manera innovadora y eficiente.

La Inteligencia Artificial (I.A.) es una de las ciencias que ha estado adquiriendo un mayor interés en el público, su implementación y uso en aplicaciones con fines de entretenimiento es uno de los principales factores que se ha presentado a la sociedad por medio de las redes sociales, actualmente podemos encontrar entre las aplicaciones más comunes la distorsión, modificación o cambios en la

apariencia física de una persona, algunas otras herramientas pueden incluso cambiar el dialogo y apariencia de las personas haciendo parecer que es real. El público suele ver soló el resultado de la I.A., no conoce el proceso, ciencias involucradas, entrenamiento de datos, reconocimiento de imágenes, modelos, entre otros. En la industria y el sector empresarial, la I.A. está llevando tareas cada vez más serias que tienen un impacto en los recursos y la seguridad de la misma, ya que se combina con el reconocimiento de imágenes para dar acceso a su personal por medio de la visualización del rostro, se ha utilizado también la ciencia de datos (ciencia aplicada previamente para generar la I.A.) para mejorar y/o predecir productividad de los operadores o línea de producción y en otros casos, ha permitido identificar patrones para la toma de decisiones que permiten aprovechar los recursos energéticos y naturales.

De esta manera, la I.A. y su desarrollo constante, implica que el sector industrial requerirá una demanda cada vez más de profesionales y personal capacitado para el desarrollo o aplicación de la misma. Actualmente, estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices del TECNM/ ITS de Irapuato, han desarrollado actividades que implican el uso de la I.A. con el propósito de cumplir dos metas, la primera contribuir al desarrollo científico y tecnológico en el sector automotriz, y como segunda meta, desarrollar habilidades y competencias aptas para satisfacer las necesidades actuales de las empresas. Así mismo, se indica que la ubicación del tecnológico y el sector productivo en el que está inmerso, hace posible, factible y viable el desarrollo de este proyecto, ya que se encuentra y es considerado parte del clúster automotriz del bajío, dedicado al desarrollo, fabricación y ensamblaje de autos, según lo declara el Gobierno del Estado.

En el presente proyecto, se presentan los avances considerables que se han logrado a partir del desarrollo de aplicaciones móviles, el uso de la I.A. y el reconocimiento de imágenes. El objetivo del proyecto es generar una app que haga uso del reconocimiento de imágenes y la I.A. para identificar herramientas de trabajo con una precisión de al menos un 97% con solo obtener una fotografía de la herramienta. Se presenta también avances en el diseño de la interfaz, desarrollos previos que fueron utilizados y una metodología práctica experimental con resultados cuantitativos.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en la aplicación de IA para el reconocimiento de herramientas, utilizando programación de dispositivos móviles como medio de implementación. Este enfoque no solo tiene el potencial de revolucionar la industria automotriz, sino que también contribuye al desarrollo de competencias clave en estudiantes de ingeniería en sistemas automotrices. El objetivo de este trabajo es explorar cómo la combinación de IA y programación de dispositivos móviles puede mejorar los procesos de identificación y control de herramientas en entornos automotrices. Para ello, se desarrolló una aplicación móvil que utiliza técnicas de reconocimiento de imágenes para identificar herramientas comunes en un taller mecánico.

El desarrollo del proyecto comienza en la materia de Programación Aplicada que se cursa en el segundo semestre de la carrera, se desarrollan programas y se diseñan interfaces graficas amigables y comprensibles para el usuario final. Se tiene como uno de los objetivos específicos que las aplicaciones se vean limpias en su diseño, mantener un mismo tema y que se vean profesionales en todo sentido. La aplicación es escalable por lo que se consideran avances y áreas de mejora en la misma. A través de este proyecto, se busca no solo mejorar la eficiencia y la precisión en la identificación de herramientas, sino también fomentar el desarrollo de habilidades y competencias en estudiantes de ingeniería en sistemas automotrices en áreas científicas y tecnológicas.

Asimismo, se pretende explorar el potencial de esta tecnología para resolver problemáticas específicas en el sector automotriz y contribuir al desarrollo tecnológico en esta área. Se determina que la IA y la programación de dispositivos móviles puede ofrecer un amplio espectro de posibilidades en el campo de la ingeniería automotriz, desde la optimización de procesos hasta el desarrollo de soluciones innovadoras.

TEORÍA

La aplicación de la inteligencia artificial (IA) en el reconocimiento de imágenes es actualmente el centro de numerosas investigaciones y avances tecnológicos en los últimos años. Los algoritmos de aprendizaje profundo, en particular las redes neuronales convolucionales (CNN), han demostrado ser especialmente efectivos en tareas de reconocimiento visual. Estos algoritmos son capaces de aprender características complejas de las imágenes y clasificar objetos con una precisión cercana a la humana y casi siempre sin errores.

La implementación de la Inteligencia Artificial (IA) en aplicaciones móviles para el reconocimiento de herramientas representa un avance significativo en la formación académica de los estudiantes, ya que al día de hoy la programación está presente en un sinnúmero de actividades de cualquier área o especialidad. La IA se define como la capacidad de las máquinas para realizar tareas que requieren inteligencia humana, como el reconocimiento de patrones y la toma de decisiones. En este contexto, el reconocimiento de herramientas mediante IA implica el uso de algoritmos de aprendizaje automático para analizar imágenes y identificar objetos específicos en ellas, como patrones, líneas, formas entre otros, además de la comparación de los elementos a identificar.

El desarrollo de aplicaciones móviles basadas en IA requiere conocimientos en programación, ciencia de datos y procesamiento de imágenes. Los algoritmos de aprendizaje automático, como las redes neuronales convolucionales, son fundamentales para entrenar modelos que puedan reconocer herramientas con precisión. Además, la integración de técnicas de procesamiento de imágenes y visión por computadora permite mejorar la calidad del reconocimiento y la usabilidad de la aplicación. Así mismo, el avance tecnológico ha sido tan grande que existen diversas herramientas y plataformas que ya realizan estos cálculos y operaciones facilitando el trabajo o bien permitiendo que sea más accesible a cualquier persona, incluso con pocos conocimientos en el tema. En el contexto académico, la aplicación de la IA en el reconocimiento de imágenes ha generado un gran interés debido a su potencial para resolver una variedad de problemas en diferentes campos. Por ejemplo, en la industria automotriz, el reconocimiento de herramientas mediante IA puede mejorar la eficiencia de las operaciones de mantenimiento y reparación al permitir una identificación rápida y precisa de las herramientas necesarias para realizar una tarea específica.

Por otra parte, la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices, la aplicación de IA para el reconocimiento de herramientas ofrece varias ventajas. Por un lado, permite optimizar los procesos de producción al automatizar tareas de identificación y control de calidad. Por otro lado, brinda a los estudiantes la oportunidad de adquirir habilidades y competencias en áreas emergentes como la IA y el desarrollo de aplicaciones móviles, lo que mejora su empleabilidad y contribuye al avance tecnológico en la industria automotriz.

PARTE EXPERIMENTAL

La programación de dispositivos móviles, en conjunto con el perfil del ingeniero en Sistemas Automotrices, abre una gran variedad de oportunidades y posibilidades tanto en el ámbito académico como en el industrial. La habilidad para desarrollar aplicaciones móviles no solo amplía el horizonte de habilidades técnicas del ingeniero, sino que también permite mejorar su capacidad para abordar desafíos específicos dentro del sector automotriz de una manera innovadora y eficiente. El desarrollo de aplicaciones móviles implica una comprensión profunda de varios aspectos técnicos, desde la lógica de programación hasta el diseño de interfaces de usuario amigables. Para un ingeniero en sistemas automotrices, esta capacidad de programar dispositivos móviles representa un valioso activo, ya que le permite crear herramientas personalizadas y soluciones adaptadas a las necesidades específicas de la industria automotriz.

En primer lugar, la programación de dispositivos móviles ofrece la oportunidad de desarrollar aplicaciones que pueden mejorar los procesos de producción y mantenimiento en la industria

automotriz. Por ejemplo, una aplicación móvil diseñada específicamente para el reconocimiento de herramientas puede ayudar a los técnicos y mecánicos a identificar rápidamente las herramientas necesarias para una tarea determinada, lo que aumenta la eficiencia y reduce el tiempo de inactividad en el taller. Además, el desarrollo de aplicaciones móviles puede contribuir al avance de la investigación y el desarrollo en el campo de los sistemas automotrices, en este caso, el proyecto es “la punta de lanza” que permitirá realizar mejoras constantes sobre el mismo hasta obtener un impacto productivo, comercial o con aplicación industrial. Además, la enseñanza y capacidad para desarrollar aplicaciones contribuye a que los futuros ingenieros puedan utilizar aplicaciones móviles para recopilar datos en tiempo real durante pruebas de campo o experimentos, lo que les permite analizar y optimizar el rendimiento de los vehículos y sistemas automotrices de manera más efectiva, o bien utilizar los.

Desde una perspectiva académica, el desarrollo de aplicaciones móviles brinda a los estudiantes la oportunidad de aplicar y consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en el aula en un entorno práctico y relevante. Al desarrollar su propia aplicación, los estudiantes no solo fortalecen sus habilidades técnicas, sino que también mejoran su capacidad para trabajar en equipo, resolver problemas y comunicarse de manera efectiva.

Se considera que la enseñanza y el desarrollar competencias especificas relacionadas a la programación son un pilar importante en la formación y el desarrollo profesional del ingeniero en Sistemas Automotrices. Al combinar habilidades técnicas con un profundo conocimiento del sector automotriz, los ingenieros pueden utilizar aplicaciones móviles para mejorar la eficiencia operativa, impulsar la innovación y contribuir al avance continuo de la industria automotriz. Las pruebas realizadas para evaluar la efectividad de la aplicación de IA en el reconocimiento de herramientas se llevaron a cabo utilizando un conjunto de datos diverso que incluía imágenes de varias herramientas que se pueden encontrar en un taller mecánico. Estas imágenes se utilizaron para entrenar y validar el modelo de IA, utilizando técnicas de aprendizaje automático supervisado. Durante las pruebas, se registraron métricas de rendimiento como la precisión y el tiempo de procesamiento de la aplicación. Además, se compararon los resultados obtenidos con criterios de referencia establecidos previamente para evaluar la calidad del reconocimiento de herramientas.

La metodología experimental se dividió en cuatro etapas:

Diseño y desarrollo de la aplicación móvil: En esta etapa, se diseñó la interfaz de usuario y se desarrollaron las funcionalidades necesarias para capturar imágenes, procesarlas y reconocer herramientas utilizando algoritmos de IA, además de generar la interfaz grafica y realizar pruebas de funcionalidad de la aplicación, obsérvese la Figura 1 en donde se visualizan capturas de pantalla de pruebas de las primeras aplicaciones.

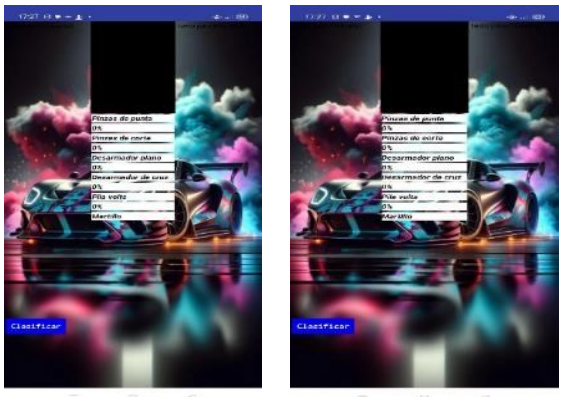


Figura 1. Primeros avances del desarrollo de aplicaciones móviles.

Entrenamiento del modelo de IA: Se recopilaron imágenes de diferentes herramientas y se etiquetaron para entrenar el modelo de IA. Se utilizaron técnicas de aprendizaje automático para ajustar los parámetros del modelo y mejorar su precisión en el reconocimiento de herramientas. Se presenta en la Figura 2, las herramientas que fueron utilizadas en esta primera etapa del proyecto.

Figura 2. Pinzas de corte, de punta, desarmador y otras herramientas más.

Pruebas y experimentaciones: Se llevaron a cabo pruebas de la aplicación en un entorno controlado para evaluar su desempeño y precisión en el reconocimiento de herramientas. Se registraron los resultados obtenidos y se realizaron ajustes en el modelo según sea necesario. Observe la Figura 3, en donde se presenta la aplicación funcionando en la identificación de la herramienta.

Figura 3. Aplicación funcionando con la I.A.

Evaluación de resultados: Se analizaron los resultados de las pruebas para determinar la precisión del modelo de IA en el reconocimiento de herramientas. Se compararon los resultados con criterios de referencia y se identificaron áreas de mejora para futuras iteraciones del proyecto.

RESULTADOS

Los resultados de las pruebas demostraron una alta precisión en el reconocimiento de herramientas, con una tasa de acierto superior al 97%. Esto indica que el modelo de IA entrenado y utilizado fue capaz de identificar correctamente la gran mayoría de las herramientas en el conjunto de datos de prueba. Además, se observó que la aplicación móvil desarrollada fue capaz de procesar las imágenes de manera rápida y eficiente, lo que sugiere un alto rendimiento del modelo de IA implementado. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que han demostrado la efectividad de los algoritmos de aprendizaje profundo en tareas de reconocimiento visual. La aplicación móvil fue capaz de identificar correctamente una amplia variedad de herramientas comunes en un taller mecánico, lo que sugiere un alto nivel de eficacia del modelo de IA entrenado. Además, se observó que la interfaz de usuario diseñada fue intuitiva y fácil de usar, lo que facilitó su adopción por parte de los usuarios finales. Los estudiantes que participaron en el desarrollo de la aplicación adquirieron habilidades y competencias en áreas clave como programación, IA y desarrollo de aplicaciones móviles, lo que les permitirá enfrentar desafíos tecnológicos en el futuro.

Con el desarrollo y aplicación del proyecto se puede mejorar la seguridad en el lugar de trabajo al garantizar que los trabajadores utilicen las herramientas adecuadas para cada tarea. Esto puede ayudar a prevenir accidentes y lesiones relacionadas con el uso incorrecto de herramientas.

CONCLUSIÓN

La implementación de la IA en aplicaciones móviles para el reconocimiento de herramientas representa un avance significativo en la industria automotriz y en la formación académica. La aplicación desarrollada en este proyecto demostró una alta precisión en el reconocimiento de herramientas y proporcionó una experiencia de usuario satisfactoria. Los resultados obtenidos sugieren que la IA tiene el potencial de mejorar y optimizar los procesos de producción en la industria automotriz, así como de enriquecer la formación académica de los estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Además, el proyecto contribuyó al desarrollo de habilidades y competencias en áreas emergentes como la programación, la IA y el desarrollo de aplicaciones móviles, lo que fortalecerá el perfil profesional de los estudiantes y su capacidad para enfrentar los desafíos tecnológicos del futuro.

La aplicación de IA en el reconocimiento de herramientas tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia y la productividad en el sector industrial y automotriz, ya que permite automatizar tareas de identificación y control de calidad, las empresas pueden reducir los costos operativos y aumentar la precisión en sus procesos de producción. Una de las principales problemáticas que resuelve la aplicación de IA en el reconocimiento de herramientas es la dependencia del personal humano para realizar tareas de identificación visual. En muchos casos, esta dependencia puede ser ineficiente y propensa a errores, especialmente en entornos de producción donde se manejan grandes volúmenes de herramientas. Al automatizar el proceso de reconocimiento de herramientas, las empresas pueden aumentar la velocidad y la precisión de sus operaciones, lo que se traduce en una mejora significativa en la eficiencia y la calidad de sus productos. Además, al liberar al personal humano de tareas repetitivas y tediosas, la aplicación de IA permite que los trabajadores se enfoquen en actividades de mayor valor añadido que requieren habilidades humanas únicas, como la resolución de problemas y la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Coppola, M., & Kornaros, G. (Junio de 2017). Internet de las Cosas para los Aprendices del Siglo 21 - IEEECS. Obtenido de Internet de las Cosas para los Aprendices del Siglo 21: https://www.computer.org/publications/tech-news/computing-now/internet-of-things-for-21st-centurylearners-spanish-version
2. Izurieta, F., & Saavedra, C. (2000). Redes neuronales artificiales. Concepción: Departamento de Física Universidad de Concepción.
3. Uberman, A. (1998). The use of games for vocabulary presentation and revision.In English Teaching Forum, 20-27.
4. UNESCO. (2018). Las TIC en la educación. Obtenido de https://es.unesco. org/themes/tic-educacion.
5. Vázquez-Cano, Esteban. 2021. “Artificial intelligence and education: A pedagogical challenge for the 21st century.” Educational Process: International Journal 10, no. 3 (July): 7–12, https://doi.org/10.22521/ EDUPIJ.2021.103.1

ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS QUE CONTRIBUYEN AL DESARROLLO DE COMPETENCIAS MATEMÁTICAS EN EL ÁREA DE INGENIERÍA

María de la Luz Delgadillo Torres[1], Mariana Bárcenas Castañeda[1], Maria de los Ángeles Vargas Hernández[1], Arturo Aguilar Pérez[2], Alberto Reyes Solís[2]

[1]TecNM/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
[2]UNAM/ Facultad de Estudios Superiores Aragón
ldelgadillo@tese.edu.mx

RESUMEN

El aprendizaje de las matemáticas en el ámbito de la ingeniería contribuye al desarrollo de competencias genéricas y específicas basadas en el uso eficaz del conocimiento matemático, pensar-razonar, argumentar, modelar, plantear-resolver problemas en un contexto real y representar-utilizar el lenguaje simbólico formal y técnico. Para que los educandos adquieran conocimientos significativos matemáticos, los docentes implementan diferentes estrategias educativas, audiovisuales, escritas, colaborativas e implementación de recursos tecnológicos. En la presente investigación, se analizó cuantitativamente cómo contribuyen los recursos didácticos de material audiovisual (grupo experimental) y escrito (grupo control), para la enseñanza del cálculo vectorial. La muestra de estudio está integrada por 55 estudiantes (grupo experimental) inscritos en la carrera de Ingeniería Bioquímica y 49 educandos de Ingeniería Química (grupo control), del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), institución perteneciente al Tecnológico Nacional de México (TecNM). Para lo cual, se estructuró un examen y una tarea del tema de funciones vectoriales de una variable real, las cuales requieren la ejecución de operaciones algebraicas y derivadas parciales. Las evidencias obtenidas fueron evaluadas por una lista de cotejo, para determinar la prueba de hipótesis Z y calcular las variables descriptivas. Los resultados estadísticos, obtenidos de la valoración de los instrumentos de apreciación aplicados en los dos grupos de estudio demuestran que, la implementación de material audiovisual en el grupo experimental presenta un mejor desempeño en la elaboración del examen comparado con el grupo que adquirió conocimientos por medio del uso de material escrito.

INTRODUCCIÓN

En el área de ingeniería, la adquisición y desarrollo de competencias específicas matemáticas, contribuye a aplicación de conocimientos teórico-prácticos y habilidades de discernimiento para dar solución a problemas abstractos, fenómenos físicos o problemas de aplicación en el contexto ingenieril. La matemática, a nivel superior, es una ciencia pedagógica formal compleja, necesaria para estudiar funciones de varias variables, estudio de distribuciones de espacio vectorial, modelización aplicando ecuaciones diferenciales, programación de algoritmos lineales, optimizar recursos y procesos, ajustes de regresiones numéricas y programación lógica matemática [Melo, 2003; Albono,2012]. En el mismo contexto, el cálculo vectorial es un campo de la matemática referido al análisis real multivariable de vectores en dos o más dimensiones. El dominio conceptual y práctico de los conocimientos y herramientas que integran el contenido programático de la asignatura de cálculo vectorial, son esenciales para estudiantes de ingeniería, debido a que son la base para la resolución de problemas de especialidad, establecer leyes y para abordar los contenidos de las asignaturas como: electromagnetismo, mecánica de los fluidos, aerodinámica, mecánica de sólidos, transferencia de calor, mecánica del medio continuo, entre otras [Costa-Arlego, 2014].

El aprendizaje de las funciones vectoriales de una variable real del cálculo vectorial en ingeniería contribuye al desarrollo competencias específicas que permiten al educando establecer ecuaciones en el espacio en forma paramétrica, para analizar el movimiento curvilíneo de diferentes objetos. Asimismo, dicho conocimiento apoya el perfeccionamiento de competencias genéricas como la capacidad de abstracción, análisis-síntesis, planear, identificar y resolver problemas. La complejidad propia del aprendizaje matemático genera que los estudiantes puedan presentar dificultades procedimentales (implementación de fórmulas, procedimientos algebraicos y gráficos), cognitivas

(comprensión, análisis, síntesis y aplicación de conocimientos) o metacognitivas (reflexión, autorregulación y aprender a aprender). Para reducir estos inconvenientes y contribuir a la adquisición de conocimientos significativos, los docentes implementan estrategias didácticas. Cabe resaltar que, las estrategias didácticas o planeaciones procedimentales, deben poseer cualidades que permitan alcanzar el cumplimiento de los objetivos educativos, por medio de la implementación de recursos tecnológicos, didácticos o escritos. Las estrategias didácticas se ven fortalecidas por medio del trabajo colaborativo o individual en la elaboración de diversas actividades como: tareas, trabajos, exámenes o aprendizaje basado en problemas.

Por lo anterior, en la presente investigación se estudió por medio de la metodología cuantitativa la influencia de los recursos didácticos audiovisuales y escritos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de cálculo vectorial. La población de estudio está integrada por estudiantes que se encuentran cursando cálculo vectorial en las carreras de Ingeniería Química y Bioquímica, del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE). Para la recolección de datos, se estructuró y aplicó un examen y una tarea referentes al tema de funciones vectoriales de una variable real, valoradas con una lista de cotejo. Con los resultados de la evaluación se efectuó la prueba de hipótesis Z y el cálculo de variables descriptivas (media, mediana, moda, rango, desviación estándar y varianza) con el propósito de establecer en qué medida contribuyen las estrategias propuestas.

TEORÍA

1. La enseñanza en ingeniería.

La educación en ingeniería es un proceso de interacción entre el docente y el educando con la intención de transferir conocimientos significativos aplicados para resolver problemas reales en la sociedad. Esta transferencia debe realizarse de manera sencilla, coherente, bien argumentada, con aplicación práctica y sobre todo amena; independiente de la complejidad del tema que se imparta. La enseñanza en ingeniería inauguralmente debe efectuar una descripción física de los fenómenos, realizar definiciones y conceptos teóricos cualitativos, para aprender el lenguaje de las ecuaciones matemáticas con el fin de cuantificar las variables asociadas al fenómeno físico en estudio. Actualmente, también es importante apoyarse en la información estadística de los procesos para justificar la adquisición del nuevo conocimiento. Una vez consolidada la teoría, es importante utilizarla en ejercicios concretos de aplicación real que impliquen cálculos teóricos escritos, después se deben realizar los mismos ejercicios de aplicación que involucren cálculos utilizando herramientas computacionales. Posteriormente, se propone el uso de herramientas tecnológicas o equipos utilizados a nivel industrial para el desarrollo de prácticas que contribuyan al fortalecimiento del conocimiento teórico-práctico [Caicedo, 2013, Orozco et al., 2016; Zapala, 2022].

2. La importancia de las matemáticas en la ingeniería.

La matemática como ciencia pedagógica, centra su estudio en los procesos didácticos y los fenómenos resultantes ocurridos dentro de la cátedra y fuera de ella, la didáctica de esta ciencia siempre propondrá las acciones y los medios adecuados para mejorar el estudio de las matemáticas en los ambientes educativos. La didáctica busca como teoría epistemológica explicar de manera unitaria y sistemática los procesos asociados en la producción y comunicación de la matemática, seleccionando su objeto de estudio. En el aprendizaje de la matemática, en especial durante la aplicación de principios y leyes matemáticas, se requiere por parte del estudiante la extrapolación de los conocimientos adquiridos en escenarios complejos, con la finalidad de aportar soluciones a las situaciones planteadas [Sánchez, 2012].

3. Etapas de enseñanza de la matemática en la formación de profesionales de la ingeniería.

De acuerdo con diversos estudios, se han establecido siete etapas sobre la enseñanza de la matemática [Mora, 2003]:

1. *Introducción didáctica:* Uso de diversas estrategias pedagógicas por parte del docente, como historias concretas sobre la aplicación real de la matemática en la ingeniería, informaciones en publicaciones relacionadas con el tema a tratar, fenómenos naturales o sociales, ejemplos de la vida cotidiana que está llena de fenómenos que pueden servir para introducir distintos

temas matemáticos, entre otras. Esta etapa es importante, ya que les brinda a los docentes la posibilidad de vincular la visualización, el lenguaje natural, la manipulación de objetos concretos, la simbolización de hechos con la realidad matemática y el proceso de acción e investigación.

2. *Desarrollo de los contenidos matemáticos:* Implementación de estrategias didácticas vinculadas a los conocimientos matemáticos aplicados al ámbito ingenieril, con el propósito de que los estudiantes asimilen nuevos conocimientos o dominen novedosos procedimientos matemáticos.
3. *Vinculación con otros conocimientos matemáticos:* Relacionar diversos conocimientos matemáticos para resolver ejemplos y problemas. Por lo cual, es importante que el personal docente proporcione modelos que permitan conectar diversas ideas matemáticas, independientemente de su complejidad.
4. *Consolidación de los nuevos conocimientos matemáticos:* Para una persona que está en plena formación de ingeniería, la consolidación de nuevos conocimientos matemáticos es fundamental, ya que la mayor parte de los conceptos pueden ser aprendidos. En cuanto a las estrategias didácticas asignadas por el docente, la importancia y el significado de los contenidos matemáticos y el interés que muestren los magistrales hacia la materia, de esta forma, consolidando mediante la repetición y ejercitación de los procedimientos y reglas trabajados durante las respectivas clases de matemáticas. El aprendizaje de las matemáticas exige paciencia, ejercitación y repetición constante.
5. *Profundización de los conocimientos matemáticos:* Identificar los contenidos programáticos matemáticos que requieren una mayor profundización, de acuerdo con el área de estudio.
6. *Inspección de los nuevos conocimientos matemáticos:* La inspección de los conocimientos matemáticos adquiridos por los estudiantes se hace por medio de la evaluación para la verificación del proceso y los resultados de actividades complejas de enseñanza permite enfocar de otra manera la ayuda o las sugerencias para la continuación del trabajo individual o colectivo.
7. *Corrección, eliminación de errores y concepciones erróneas:* la identificación de errores permite adquirir aprendizaje significativo.

4. Técnicas educativas implementadas en la enseñanza matemática.

El uso de técnicas pedagógicas para el fortalecimiento de la cognición matemática se elige de acuerdo con la habilidad específica que se desea reforzar o complementar. Las técnicas más utilizadas, se describen a continuación [Espeleta et al., 2016].

a) Resolución de problemas. El aprendizaje se fortalece a través de la implementación de prácticas educativas específicas; dentro del aprendizaje basado en el cerebro existen diferentes prácticas como el aprendizaje basado en problemas, simulación y juego de roles, discusiones activas, gráficas y atmosfera positiva. El aprendizaje basado en problemas es un método en el cual los estudiantes desarrollan habilidades creativas, reflexivas y manejan conocimientos propios; este aprendizaje se puede desarrollar de forma individual o colaborativo [Schunk, 2012].

b) *Cálculo mental.* Es una técnica utilizada para ejecutar operaciones matemáticas simples de forma mental y sin el apoyo de herramientas (calculadora o computadora), suscita el desarrollo de la memoria, agilidad y actividad mental. Al mismo tiempo, fomenta habilidades comunicativas, a través del uso del lenguaje verbal y escrito empleado en esa área de estudio. El análisis de los planteamientos matemáticos mentales considera tres elementos: reformulación, traducción y compensación [Escribano et al., 2008].

c) Trabajo colaborativo. El aprendizaje cooperativo es una estrategia grupal activa, en donde el educando contribuye en la construcción de conocimientos; se implementa con el propósito de fomentar el desarrollo de habilidades colaboración, empatía, comunicación entre pares, análisis y evaluación de la información, búsqueda y solución de procedimientos, y edificación de experiencias [Herrada-Baños, 2018].

d) Material audiovisual. El material audiovisual es una herramienta educativa constituida por imágenes en movimiento, sonidos y una descripción verbal, que especifica con claridad lo que se visualiza; se utiliza con el propósito de reforzar el aprendizaje [Morales-Guzmán, 2015]. Las herramientas audiovisuales utilizadas con mayor frecuencia en el fortalecimiento de conocimientos matemáticas son los videos, presentaciones con descripción verbal y videoblog [García-López, 2016]. Los medios audiovisuales contribuyen de forma positiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Debido a que el aprendizaje se genera en mayor medida por medio de la observación; es decir, el 83% del aprendizaje que se adquiere es producto de la visualización. El uso de esta técnica propicia a los estudiantes motivación académica, desarrollo de ideas, participación activa, mantienen el interés por aprender y proporciona experiencias adicionales que complementan al conocimiento previo [Caro, 2006].

e) Aula invertida: El método de aula invertida se define como la inversión de roles educativos, en este sentido, el docente adquiere un papel secundario como guía del aprendizaje, mientras que el estudiante aprende los contenidos fuera del aula. A este respecto, se genera una reorganización de las tareas, donde los contenidos son consultados en contextos no formales y el aula se configura como un espacio para la resolución de dudas y el trabajo en equipo [Hinojo et al., 2019].

PARTE EXPERIMENTAL

Inicialmente, se elaboró el material escrito y se eligió el material audiovisual, referente al tema de funciones vectoriales de una variable real, de la asignatura de cálculo vectorial impartida en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), institución perteneciente al Tecnológico Nacional de México (TecNM). Al mismo tiempo, se estructuraron los instrumentos de recolección de datos (examen y tarea) y la lista de cotejo para la valoración de los instrumentos. La rúbrica especifica los elementos que se deben evaluar en cada ejercicio matemático; es decir, se analizará que el educando aplique las fórmulas de derivación y efectué procesos algebraicos adecuadamente, para la obtención del resultado correcto. Consecutivamente, antes de aplicar los instrumentos de apreciación, se verificó la consistencia entre los ejercicios que integran las actividades tarea y examen, en función de la escala de valoración, calculando el coeficiente Alfa de Cronbach, por medio del uso del software Minitab-19, Obteniendo un valor de medición de 0.88, considerado en la ponderación excelente.

Cabe resaltar que, la muestra de estudio está integrada por estudiantes universitarios inscritos en cálculo vectorial de la carrera de Ingeniería Química y Bioquímica. Se solicitó analizar el material audiovisual al grupo experimental (55 estudiantes); al mismo tiempo, se presentó el material escrito al grupo control (49 estudiantes). Posteriormente, se aplicaron los instrumentos de valoración a los grupos de estudio. Con los resultados de la apreciación de instrumentos, se efectuaron cálculos estadísticos para la obtención de las variables descriptivas (tendencia central y variabilidad), prueba de hipótesis Z y obtención de porcentajes de éxito; utilizando software Minitab 19. La Figura 1, muestra el procedimiento experimental de forma sintetizada.

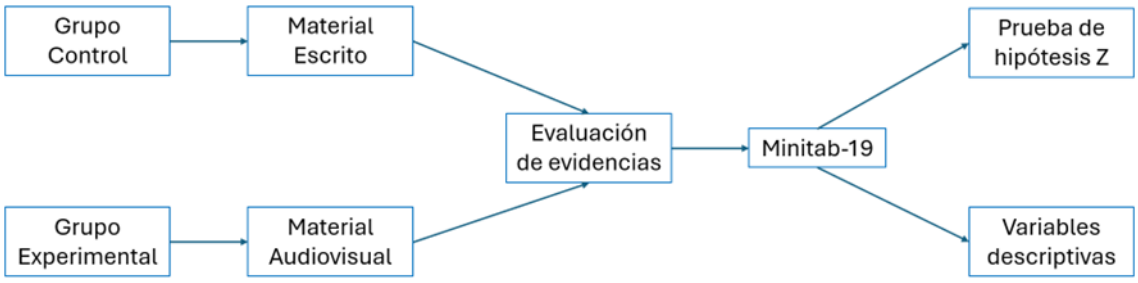


Figura 1. *Procedimiento experimental.*

RESULTADOS

Con los valores obtenidos de la evaluación de cada instrumento, se determinó el porcentaje de éxito y el análisis estadístico descriptivo para el cálculo de la media, desviación estándar, varianza y mediana; de la ponderación de la evaluación total, para cada instrumento aplicado a los grupos de estudio (ver Tabla 1).

***Tabla 1**. Porcentaje de éxito y análisis descriptivo de la valoración de instrumentos.*

	Instrumento	*% Éxito*	*Medida*	*Evaluación*		*Instrumento*	*% Éxito*	*Medida*	*Evaluación*
Grupo Control	Examen	25	Media	3.3	***Grupo Experimental***	Examen	82	Media	2.4
			Mediana	3.5				Mediana	2
			Moda	4				Moda	2
			Rango	2				Rango	2.3
			S	0.6				S	0.9
			S^2	0.4				S^2	0.8
	Tarea	74	Media	3.3		Tarea	81	Media	2.8
			Mediana	3.3				Mediana	2.3
			Moda	4				Moda	3
			Rango	2				Rango	2
			S	0.6				S	0.5
			S^2	0.4				S^2	0.7

Por otro lado, se efectuó el análisis de hipótesis nula y alternativa con la finalidad de establecer si las suposiciones planteadas son correctas o incorrectas; es decir, si los estudiantes del grupo experimental evidencian un mejor desempeño en la solución de ejercicios matemáticos comparado con el desempeño alcanzado por los estudiantes del grupo control. Para lo cual, se calculó el p-valor, por medio de la prueba de hipótesis Z utilizando software Minitab 19, considerando un intervalo de confianza de 95%; esto es, implementando un nivel de significancia de 0.05. Los resultados obtenidos en la prueba de hipótesis Z se aprecian en la Tabla 2.

***Tabla 2.** Prueba de hipótesis, instrumentos examen y tarea.*

Hipótesis nula (Ho)	P	Conclusión (Ho)
Los estudiantes del grupo experimental no logran identificar las fórmulas de derivadas y no ejecutan procesos algebraicos adecuadamente, obteniendo el resultado incorrecto; en la elaboración del examen.	0.000	Rechaza
Los estudiantes del grupo experimental no logran identificar las fórmulas de derivadas y no ejecutan procesos algebraicos adecuadamente, obteniendo el resultado incorrecto; en la elaboración de la tarea.	0.000	Rechaza
Los estudiantes del grupo control no identifican las fórmulas de derivadas y no ejecutan los procesos algebraicos adecuadamente, obteniendo el resultado incorrecto; en la elaboración del examen.	0.164	Acepta
Los estudiantes del grupo control no identifican las fórmulas de derivadas y no ejecutan procesos algebraicos adecuadamente, obteniendo el resultado incorrecto; en la elaboración de la tarea.	0.000	Rechaza

CONCLUSIONES

Los resultados estadísticos descriptivos y la obtención del porcentaje de éxito indican que existe mayor éxito en la adquisición de aprendizajes de cálculo vectorial cuando se fortalece el aprendizaje por medio de material audiovisual (grupo experimental) comparado con el uso de material escrito (grupo control). Esta inferencia es confirmada por la prueba de hipótesis Z, la cual ostenta un p-valor=0.000 (<0.05 nivel de significancia) para la Ho; permitiendo rechazar y confirma el caso contrario, es decir, los estudiantes del grupo experimental si identifican fórmulas y efectúan procesos algebraicos, obteniendo el resultado correcto. Mientras que, la Ho planteada para la ejecución del examen en el grupo control, no se rechaza debido a que presenta un p-valor=0.164 (>0.05). Lo anterior permite establecer de acuerdo con el estudio estadístico, la implementación del material audiovisual en la elaboración del examen, impacta positivamente en mayor medida en la adquisición de aprendizajes y habilidades de cálculo vectorial, comparado con el uso del material escrito.

En el mismo tenor, el análisis estadístico del instrumento tarea, establece que la herramienta didáctica material audiovisual aplicada al grupo experimental contribuye en mayor medida en la adquisición de habilidades matemáticas, comparado con el material escrito utilizado en el grupo control. La prueba de hipótesis Z, para la actividad tarea alcanzó un p-valor de 0.000, generando que se rechazara Ho. Por lo cual, se infiere que la estrategia de material audiovisual y material escrito contribuyen positivamente y en diferente medida en la elaboración de tareas de cálculo vectorial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albano G. (2012). Conocimientos, destrezas y competencias: un modelo para aprender matemáticas en un entorno virtual. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento (RUSC), 9(1), 115-129.
2. Caicedo-Delgado, G. (2013). La enseñanza en ingeniería. Tecnológicas, 31.
3. Caro, R. (2006). Los recursos audiovisuales al servicio de las matemáticas. *Dialnet,* 5, 1-9.
4. Costa, V. y Arlego, M. (2011). Enseñanza del cálculo vectorial en el contexto de la ingeniería: una revisión bibliográfica. Congreso Internacional de Enseñanza de las Ciencias y la Matemática,88-92. Facultad de Ciencias Exactas, UNICEN, Tandil, Argentina.
5. Escribano, A. y Del Valle, A. (2008). El aprendizaje basado en problemas. Una propuesta metodológica en educación superior. *Narcea S.A. de Ediciones,* 14-18, 32-47.
6. Espeleta A., Fonseca, A., Zamora, W. y Wikerson, T. (2016). Estrategias para la enseñanza y el aprendizaje de la Matemática. *Universidad de Costa Rica. Facultad de Educación. Instituto de Investigación en Educación.* 31-50.
7. García, M. y López, A. (2016). Características de las tics para la enseñanza de las matemáticas: el estudio del cálculo vectorial. *Revista Electrónica AMIUTEM,* IV(2), 78-89.
8. Herrada, R. y Baños, R. (2018). Experiencias de aprendizaje cooperativo en matemáticas. *Revista multidisciplinaria de educación,* 11(23), 99-108.
9. Hinojo, F., Aznar, I, Romero, J. y Marín, J. (2019). Influencia del aula invertida en el rendimiento académico. Una revisión sistemática. Campus Virtuales, 8(1), 9-18.
10. Melo M. (2003). Las matemáticas en la ingeniería a través de la historia. *Ciencia e ingeniería neogranadina,* (13), 53-60.
11. Mora, D. (2003). Estrategias para el aprendizaje y la enseñanza de las matemáticas. Revista de pedagogía, 24-70.
12. Morales, L. y Guzmán, T. (2015). El Video como recurso didáctico para reforzar el conocimiento. *Memorias del Encuentro Internacional de Educación a Distancia,* 3(3), 1-10.

13. Orozco C., Morales E. y Campos R. (2016). Creación de objetos de aprendizaje basados en la teoría de los modelos mentales de Johnson-Laird. Série-Estudios, Campo Grande, MS, 21(42), 21-39.
14. Sánchez-Rosal, A. (2012). Incorporación de las TICs en el aprendizaje de la matemática en el sector universitario. Revista de educación matemática, 27(3), 26-38.
15. Schunk, D. (2012). Teorías del aprendizaje. Una perspectiva educativa. *México: Pearson.* Sexta edición.
16. Zalapa, H. (2022). Uso del software Derive como auxiliar didáctico para los procesos de enseñanza y aprendizaje en el Cálculo Vectorial. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 1, 5-14.

ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRECIPITACIÓN DE CARBUROS EN UN ACERO ASTM A387-G22 CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDA A TEMPERATURAS ENTRE 400, 500, 600 °C

Fernando Vazquez Maldonado[1], Dr. Víctor Manuel López Hirata[1], Dra. Maribel Leticia Saucedo Muñoz[1], M. en C. Valeria Miranda López[1]

[1]Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Instituto Politécnico Nacional, 07300, CDMX, México
fvazquezm1302@ipn.com.mx, vmlopezh@ipn.mx, msaucedom@ipn.mx, vmirandal1600@alumno.ipn.mx

RESUMEN

En este trabajo se analizó la evolución microestructural y las propiedades mecánicas del acero ASTM A387-G22 en condiciones de nuevo y después de ser tratado térmicamente mediante un envejecimiento a 3 diferentes temperaturas y 8 tiempos, simulando las condiciones de operación. Este acero presenta una matriz ferrítica y sus propiedades mecánicas están basadas principalmente en la distribución homogénea de carburos finos en la matriz. En un ciclo normal de operación este acero está sometido a altas temperaturas y periodos de operación por largo tiempo provocando un incremento en el tamaño de los carburos debido al crecimiento heterogéneo, alterando sus distribución y a su vez provocando la disminución de las propiedades mecánicas. Se utilizaron programas de cómputo de simulación numérica como Thermo-calc y TC-prisma, para obtener diagramas de tiempo-temperatura-transformación, diagramas transformación de enfriamiento continuo, y diagramas tiempo-temperatura-precipitación con la finalidad de conocer la cinética del acero. Las muestras se caracterizaron microestructuralmente mediante microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido convencional y alta resolución. También se caracterizaron mecánicamente mediante ensayos de dureza micro Vickers para observar los cambios de dureza para las tres diferentes temperaturas de tratamiento. La dureza disminuyó en el caso de mayor tiempo de envejecido. Este efecto se atribuye a la cinética de engrosamiento de los precipitados ya que es más notorio en el tiempos más largo del tratamiento térmico. Los datos obtenidos experimentalmente son consistentes con lo obtenido con los programas de simulación.

INTRODUCCION

La industria de energía térmica y nuclear requiere de componentes que soporten tiempos de trabajo prolongados, alta resistencia mecánica y temperaturas elevadas sin perder sus propiedades mecánicas. Es por eso que para estas condiciones de trabajo se utilizan los aceros resistentes a la termofluencia en la construcción de plantas de energía eléctrica y plantas de la industria petroquímica.

En este mismo sentido, los aceros ferríticos de baja aleación son utilizados extensamente ya que cumplen con propiedades mecánicas que son deseadas en dichas aplicaciones, las cuales son, buena maleabilidad, soldabilidad y alta resistencia a la termofluencia.

En la familia de aceros ferríticos, nos encontramos con los aceros de baja aleación concretamente los aceros Cr-Mo. Este grupo de aceros se caracterizan por tener una alta resistencia a la termofluencia. Dichos aceros son ampliamente utilizados en la fabricación de tuberías para el trasporte de fluidos, calentadores, rotores e intercambiadores de calor, estos componentes trabajan en un rango de temperaturas entre 450 y 600°C.

Las propiedades mecánicas de estos aceros se obtienen principalmente de tres formas; endureciendo por solución sólida, formación la fase bainita o martensita en la estructura y la presencia de obstáculos que dificulten el movimiento de dislocaciones. Estos obstáculos son principalmente carburos formados por los elementos de aleación, Cr, Mo, V, Ti, W, Nb [1,2].

Una herramienta útil que a demostrado ser de gran ayuda en el calculo y predicción de la cinética de precipitación, así como los cambios microestructurales en las aleaciones son los programas de simulación, concretamente los programas Thermo-Calc y TC-prisma. Estos se basan en algoritmos y cálculos utilizando bases de datos termodinámicos, teniendo resultados con aproximaciones cercanas a las reales [3].

Por lo tanto, el objetivo del trabajo es el estudio de la precipitación de carburos en un acero A387-G22 expuesto isotérmicamente a temperaturas de 400, 500 y 600°C a diferentes tiempos para entender sus propiedades mecánicas.

EXPERIMENTACION

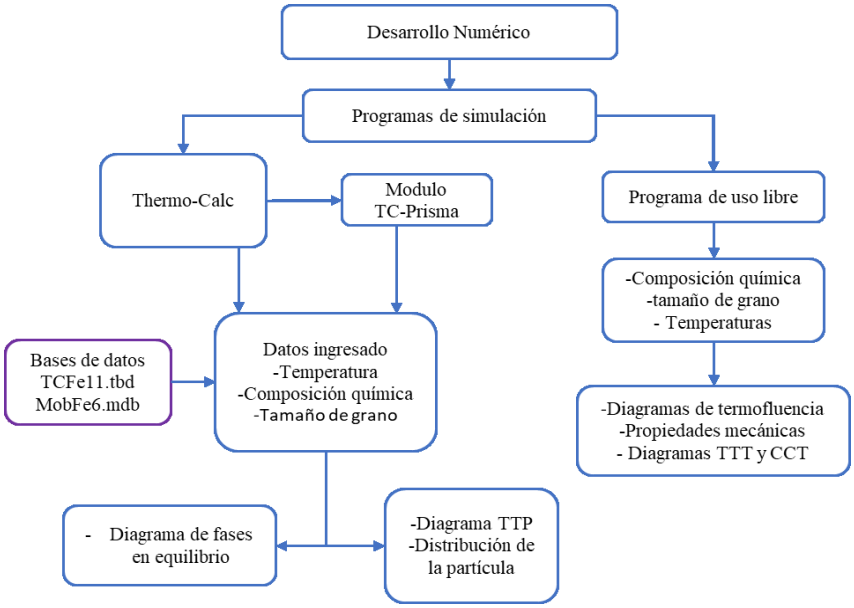


Figura 1. *Diagrama de bloques del desarrollo numérico.*

1. Metodología numérica

La metodología numérica se realizo siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la Figura 1 para obtener los diagramas de equilibrio y no equilibrio que describen el comportamiento del acero ASTM A387-G22.

Para para obtener estos diagramas se requirió la composición química del acero la cual se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. *Composición química del acero ASTM A387-G22 en %peso*

Composición química del acero ASTM A387-G22 en %peso						
C	Cr	Mo	Mn	Si	V	Ni
0.133	2.408	0.911	0.522	0.078	0.005	0.053
Al	Nb	Ti	Cu	Sn	P	S
0.023	0.002	0.01	0.041	0.007	0.005	0.009

Se obtuvieron los diagramas de porciento de fases en equilibrio, tiempo-temperatura-trasformación (TTT), transformación por enfriamiento continuo (CCT) y tiempo-temperatura-precipitación TTP, mediante simulación numérica. Estos diagramas predicen el comportamiento termodinámico del acero.

2. Metodología experimental

La metodología experimental se realizó de acuerdo con el diagrama de bloques descrito la figura 2.

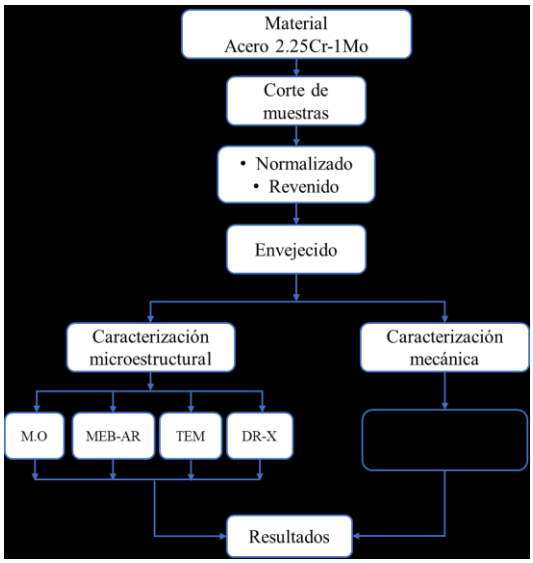


Figura 2. Diagrama de bloques del desarrollo experimental.

Partiendo de una placa de acero ASTM A387-G22, previamente normalizada y revenida, como condición inical, se cortaron muestras de aproximadamente 1 x 1 x 1 cm a las cuales se les realizo un tratamiento térmico de envejecido en una mufla eléctrica a temperaturas de 400, 500 y 600°C y tiempos de 10, 30, 50, 100, 300, 500, 700 y 1000 horas.

Se realizó una preparación metalográfica a las muestras tratadas térmicamente, el cual consistió en un desbaste con lija grado 1000, 1200 y 1500, seguido de un pulido con alúmina de 1 y 0.03 µm. Las muestras pulidas se atacaron químicamente con reactivo de ataque Nital 5.

Las muestras atacadas se observaron en un microscopio óptico de la marca Nikon modelo eclipse MA200 a 200x, 500x y 1000x. con la finalidad de observar los precipitados las muestras se analizaron mediante la técnica microscopia electrónica de barrido de alta resolución (MEB-AR).

La preparación metalográfica para microscopia electrónica de transmisión MET consistió en obtener muestras delgadas, con espesor menor a 0.2mm y diámetro de 3mm, mediante un corte con disco de diamante de las muestra tratadas térmicamente durante 1000 horas de cada temperatura de envejecido.

Las muestras obtenidas fueron electro pulidas mediante un pulido de doble jet con un dispositivo Twin-jet modelo 110 de la marca Fishione Instruments. Se uso reactivo de ataque universal, 2/3 de metanol 1/3 de ácido nítrico, en un baño de metanol enfriado con hielo seco a -50°C.

Se realizo una prueba de difracción de rayos X a la muestra original con condiciones de radiación Kα-Cu (1.52Å), velocidad de barrido un barrido de 0° a 100°. El patrón de difracción obtenido fue analizado con el programa de cómputo MATCH! 3 para identificar las fases presentes. Los difracto gramas obtenidos de la difracción de rayos X fueron confirmados mediante la técnica de microscopia electrónica de transmisión (MET).

Las muestras envejecidas fueron sometidas a ensayos de microdureza Vickers con una carga de 500 g_f y un tiempo de identación de 12 segundos.

RESULTADOS

Usando el programa de computo Thermo-Calc se obtuvo el diagrama de fases en equilibrio mostrado en la Figura 3.

Donde se observa que en el rango de temperatura de trabado del componente las fases presentes son ferrita, una pequeña cantidad de austenita, carburos del tipo $M_{23}C_6$ e intermetálicos Laves.

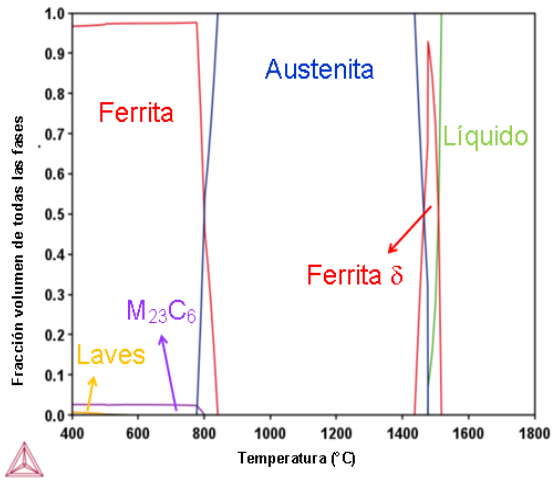


Figura 3. Diagrama de fases en equilibro vs temperatura del acero ASTM A387-G22.

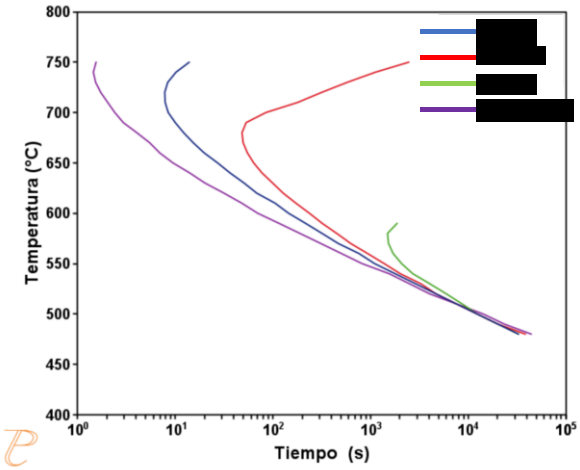


Figura 4. Diagrama Temperatura-Tiempo-Precipitación del acero ASTM A387-G22.

De acuerdo con el diagrama TTP, mostrado en la Figura 4. obtenido usando el programa TC-Prisma, el cual indica los precipitados que se obtendrán a una determinada temperatura, indica la presencia de precipitados M_7C_3 y cementita que se disuelven y precipitan en $M_{23}C_6$. lo cual corresponde con lo obtenido experimentalmente.

En la figura 5. se muestran las microestructuras obtenidas por MEB, en la cual se observa el crecimiento de los precipitados siendo la de mayor temperatura donde no se observa precipitados pequeños, también, estos precipitados están orientados con el crecimiento del grano.

De acuerdo con la forma de los precipitados se indexaron los patrones de difracción los cuales arrojaron presencia de carburos del tipo M23C6 es cual es un carburo de Cromo y el carburo M6C que es un carburo de molibdeno, esto cumple con lo obtenido numérica y experimentalmente.

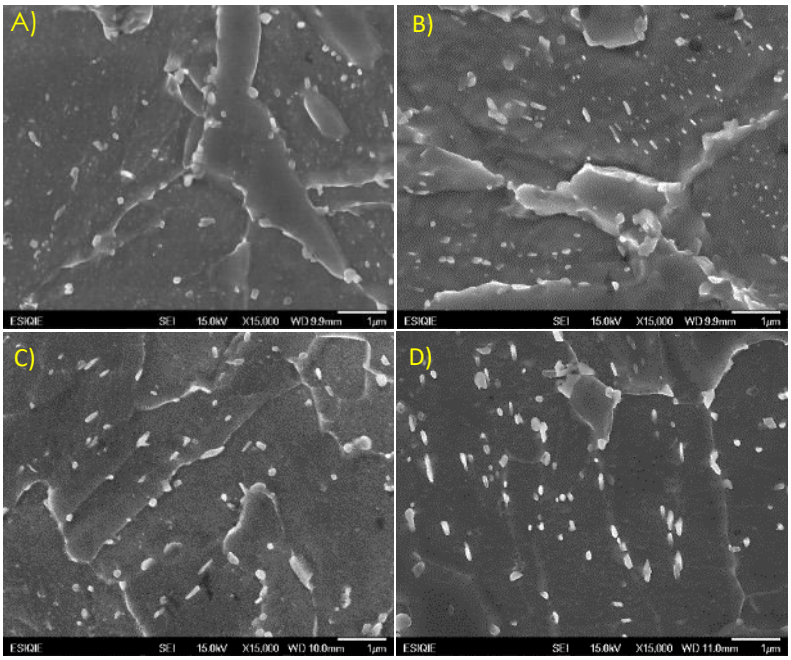


Figura 5. Micrografías obtenidas por MEB-AR a 15000X del acero ASTM A387-G22 en A) condición original y tratamiento térmico de envejecido a B) 400°C, C) 500°C D) 600 °C durante 1000 horas.

De los ensayos de dureza se obtuvo la grafica mostrada en la Figura 6 donde se observa una disminución en la dureza de acuerdo con el incremento de la temperatura siento a 400°C donde se obtuvo un dureza mayor y 600°C en las muestras envejecidas a 1000 horas, lo que supone una disminución en la dureza debido al incremento de los precipitados.

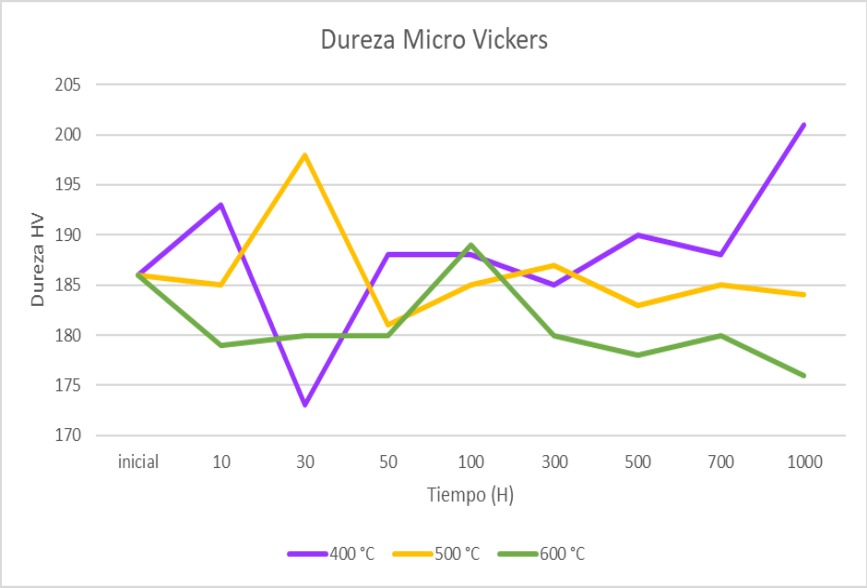


Figura 6. Grafica de dureza micro Vickers del acero ASTM A387-G22. envejecido a 400, 500 y 600°C

CONCLUSIONES

1. Las fases obtenidas en el rango de temperatura son Ferrita y precipitados del tipo M23C6, M6C e intermetálicos LAVES.
2. El crecimiento de los carburos fue mayor a 600°C y tiempo de envejecido de 1000 horas.
3. La dureza disminuye a mayor tiempo y temperatura siendo 600 °C y 1000 horas las menor dureza con 176 HV.
4. Se observa una orientación de los precipitados de acuerdo con la orientación del grano.

BIBLIOGRAFIA

1. Abe, F., Kern, T.-U., y Viswanathan, R. (2008). “Creep-resistant steels”, Woodhead Publishing y CRC Press, páginas 539 – 546.

2. Bhadeshia, H. K. D. H., Strang, A., & Gooch, D. J. (1998). “Ferritic power plant steels: remanent life assessment and approach to equilibrium”. International Materials Reviews, vol. 43 n°2, páginas 45–69.

3. Thermo-Calc software (2023). “Thermo-Calc: Thermodynamic Software” [recuperado el día 22 de 2024]. URL: https://thermocalc.com/products/thermo-calc/.

DEGRADACIÓN DE IBUPROFENO MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR

Claudia Adriana Pozos Escamilla[1], Juana Deisy Santamaría Juárez[1], Gabriela Pérez Osorio[1]
Guillermo Santamaría Juárez[1]

[1]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
claudia.pozos@alumno.buap.mx.

RESUMEN

La preservación y conservación del agua es fundamental en nuestro planeta. A pesar de los grandes esfuerzos por establecer sistemas de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) para su reutilización, gran parte de esta es vertida con contaminantes emergentes como los fármacos (ibuprofeno) [1] debido a la falta de procesos terciarios de tratamiento. La contaminación por fármacos en cuerpos de agua, trae como consecuencia problemas en la reproducción de diversas especies, inhibición y crecimiento de embriones, alteración en la reproducción y aparición de fenómenos como la bioacumulación y biomagnificación impactando negativamente en la salud humana [2]. El uso de la fotocatálisis solar es importante debido a que ha demostrado ser una técnica de degradación altamente eficaz, en la cual se utilizan con regularidad materiales semiconductores que, al ser iluminados con luz solar, catalizan una serie de reacciones de óxido-reducción de los sustratos orgánicos e inorgánicos, rompiendo los enlaces de estos y finalmente degradándolos [3].

Por tal razón en el presente trabajo se evalúa la degradación de ibuprofeno en muestras sintéticas mediante fotocatálisis solar (FS) considerando una concentración de solución de ibuprofeno de 10 ppm y utilizando un catalizador compuesto de nanomateriales como el Dióxido de Silicio y Dióxido de Titanio (TiO_2/SiO_2) a una concentración de 50 mg/L.

El catalizador se sintetizó mediante el método Sol-Gel el cual no genera residuos por lo tanto cumple con el principio #3 de la química verde: Síntesis de sustancias químicas menos peligrosas. Y se caracterizó mediante diferentes técnicas (DRX, MEB, EDS), posteriormente se realizaron pruebas de degradación del fármaco mediante FS que se llevó a cabo en periodos de 2 días, por 4 horas comenzando a las 11 am y finalizando a las 3pm, tomando alícuotas cada 2 horas, midiendo la degradación del fármaco mediante UV-Vis, considerando la longitud de onda máxima del mismo.

La degradación del ibuprofeno considerando la concentración de solución propuesta (10 ppm) es entre el 85-90%, se observa la formación de subproductos como el (ácido 2-[4-(1-hidroxisobutil) fenil] propionico y 4-etilbenzaldehído) [4]. Sin embargo, este es degradado en un tiempo de 8 horas.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, utilizado para satisfacer las necesidades básicas de la población, y empleada por los seres humanos en actividades sociales, económicas y ambientales, asegurando la integridad y sustentabilidad en el medio ambiente; debido a que su preservación es necesaria para que exista la vida en la tierra. Sin embargo, la mala gestión de esta al cumplir con su vida útil, pone en riesgo la salud de los seres vivos.

Por tal razón, se conocen diversas alternativas para tratar el agua contaminada, dentro de ellas se encuentran las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las cuales, tienen la función de descontaminarla por medio de tratamientos convencionales como coagulación, sedimentación y floculación, sin embargo estos no son suficientes para eliminar contaminantes emergentes (CE), estos tienen en común en su estructura química anillos aromáticos que hace que sean muy difíciles de degradar porque la tecnología no es tan eficiente eliminando este tipo de moléculas presentes en concentraciones muy pequeñas [5].

Los CE se pueden clasificar en pesticidas, colorantes y productos farmacéuticos, haciendo referencia a los últimos, al cumplir con su función y vida útil son desechados por los humanos mediante la orina, en el inodoro por falta de información, excretando etc. y al no poderlos degradar mediante los

tratamientos de las PTAR, estos llegan a ríos, mares y lagos, en donde las especies marinas y terrestres sufren las consecuencias.
Desde el punto de vista clínico, los fármacos están concebidos principalmente para llevar a cabo procesos fisiológicos y para resistir su inactivación antes de ejercer el efecto terapéutico para el cual fueron desarrollados. Estas mismas propiedades son también responsables de su baja biodegradabilidad y de los efectos tóxicos potenciales en ecosistemas acuáticos y terrestres, lo cual se acrecienta por la continua introducción de estos en el ambiente, lo que conlleva a exposiciones a largo plazo y al aumento de la susceptibilidad a otros tóxicos.

Uno de los fármacos con mayores posibilidades de convertirse en un riesgo en el futuro es el ibuprofeno porque es un contaminante recalcitrante y difícil de degradar debido a que es creado para poder metabolizarse en el cuerpo y resolver un problema médico, así como la formación de sus metabolitos como el 2-hidroxiibuprofeno, ya que además de ser muy tóxico (30-60%) genera resistencia a degradarse en el agua [6].

Por otro lado, es necesario que las PTAR cuenten con un tratamiento terciario, capaz de degradar CE, dentro de estos se conocen los procesos avanzados de oxidación, e inmerso en estos, se encuentra la fotocatálisis, la cual es una reacción de interés ambiental e industrial pues utiliza la luz solar y UV para llevar a cabo la transformación de reactivos a productos.

En esta reacción, un electrón contenido en la banda de valencia del material es excitado por la luz y "salta" a la banda de conducción generando un hueco en la banda de valencia. La presencia de un hueco en la banda de valencia genera una corriente eléctrica. La existencia de una corriente eléctrica, así como un hueco en la banda de valencia propician que la velocidad de reacción aumente. La energía necesaria para que el electrón "salte" de la banda de valencia a la banda de conducción es denominada energía de brecha prohibida o "band gap" y depende de la estructura electrónica del material, debido a esto, los materiales semiconductores son ampliamente usados como fotocatalizadores, como el dióxido de titanio (TiO_2) y soportes que ayudan a mejorar la estabilidad del material y facilitan su recuperación como el dióxido de silicio (SiO_2).

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de nanomateriales

Se sintetizaron mediante el método Sol-Gel, siguiendo el procedimiento reportado por [7 y 8]
Para realizar la síntesis de los nanomateriales se procedió a mezclar 17.33 ml del precursor de silicio (TEOS, Tetraetilortosilicato) (Marca: Sigma Aldrich, Pureza: 98%) en 40 ml de agua durante 15 minutos, al mismo tiempo se mezclaron 2.5 g de TiO_2 con 23 ml de etanol (Marca: Sigma Aldrich, Pureza: 99%) y se dejaron en agitación durante 15 minutos. Posteriormente se mezclaron ambos durante 30 minutos para la formación del sol. Se agregaron gota a gota 1.67 ml del agente gelificante (HF, ácido fluorhídrico) (Marca: Sigma Aldrich. Pureza: 90%) con temperatura y agitación controlada (80-90°) para la formación del gel. Se dejó secar por evaporación a 100 °C durante 24 horas hasta obtener cristales pequeños (Envejecimiento), finalmente el polvo obtenido se calcinó en una mufla durante 4 horas a 650 °C.

Caracterización de nanomateriales

Espectroscopia de Energía Dispersada (EDS):
Se determinó la composición química elemental de las muestras mediante la técnica de espectroscopia de energía dispersada (EDS) Para dichos análisis se empleó el microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-5610LV.
Microscopia Electrónica de Barrido (MEB):
Se utilizó la microscopía electrónica de barrido para evaluar la porosidad de la superficie y determinar el tamaño promedio de partícula en las muestras. Las imágenes obtenidas se tomaron en al menos tres zonas diferentes para obtener la mejor imagen [9].
Difracción de Rayos X (DRX):

Se analizaron las muestras con la técnica de Difracción de Rayos X en un Difractómetro con radiación de cobalto (1.78901 A) a 40 kv y 35 mA con tamaño de paso de 0.0167 grados y tiempo por paso de 45s.

Proceso fotocatalítico

La primera etapa consistió en mantener los catalizadores (50 mg/L) en contacto con la solución sintética durante 24 horas en ausencia de luz. Después, la solución se colocó sobre una base de aluminio, conectada a bombas de difusión de aire (1.5 L/min). Las pruebas se analizaron por duplicado bajo exposición a la luz solar durante dos días (4 horas cada día), y se tomó una alícuota cada 2 horas. La degradación del ibuprofeno se evaluó después de la prueba en oscuridad y cada dos horas del proceso fotocatalítico con un espectrómetro UV-Vis y una curva de calibración.

La remoción de ibuprofeno se determinó mediante la ecuación 1.

Donde:

$$D\% = \frac{(Ci - Cf)}{Ci} x100 \qquad (1)$$

Ci concentración inicial (ppm)
Cf concentración final (ppm)

RESULTADOS

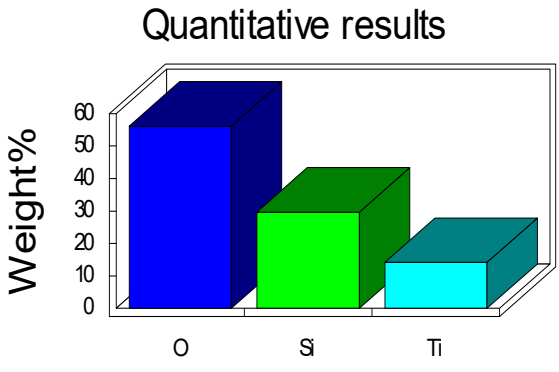
Síntesis de nanomateriales

Se realizó la síntesis de los materiales obteniendo un polvo fino color blanco, con una relación 1:3

Figura 1. Catalizadores sintetizados mediante sol-gel (Elaboración propia)

Caracterización de nanomateriales

Espectroscopia de energía dispersada (EDS)



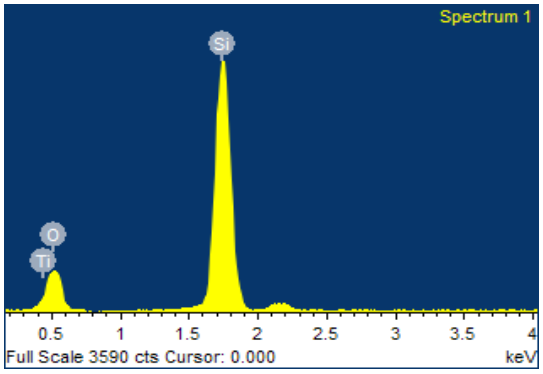


Figura 2. Resultados de EDS para el catalizador TiO_2/SiO_2

Los resultados de EDS muestran que el oxígeno se encuentra en proporción de 56.84%, el silicio en 29.48% y finalmente el titanio en 13.68%, esto se debe a que el método sol gel, implica la hidrólisis de precursores de titanio y silicio, lo que puede generar grupos hidroxilo (-OH) en la superficie del material. Estos grupos hidroxilo contribuyen a la señal de oxígeno en el análisis EDS, por otro lado, el nanomaterial sintetizado por sol-gel puede tener una superficie porosa que adsorbe agua o gases del ambiente [10] Por otra parte, el silicio se encuentra en mayor proporción que el titanio, esto se debe a que es el soporte del mismo y la relación de síntesis es 1:3.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

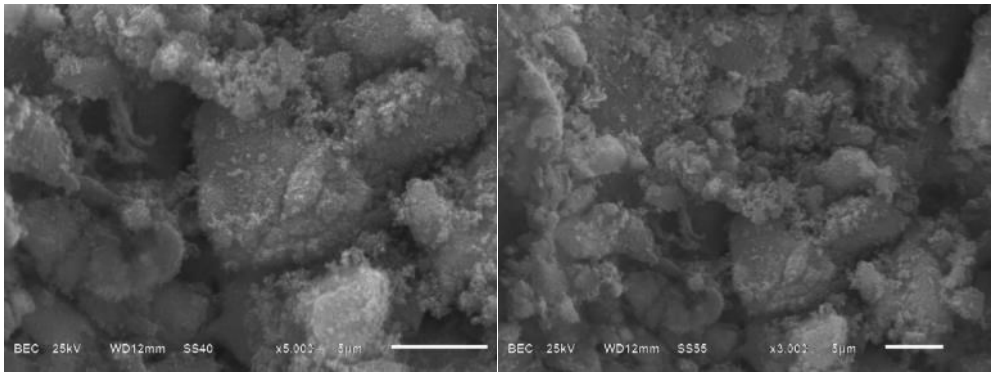


Figura 3. Micrografía de catalizador TiO_2/SiO_2

Las imágenes mostradas por MEB, muestran puntos finos y esféricos asociados al TiO_2, y partículas de mayor tamaño y geometría irregular correspondientes al soporte de SiO_2. Sin embargo, este aumento en las partículas, beneficia considerablemente la actividad fotocatalítica porque existe un aumento en el área superficial del catalizador y mayor retención de contaminantes [9].

Difracción de Rayos X (DRX)

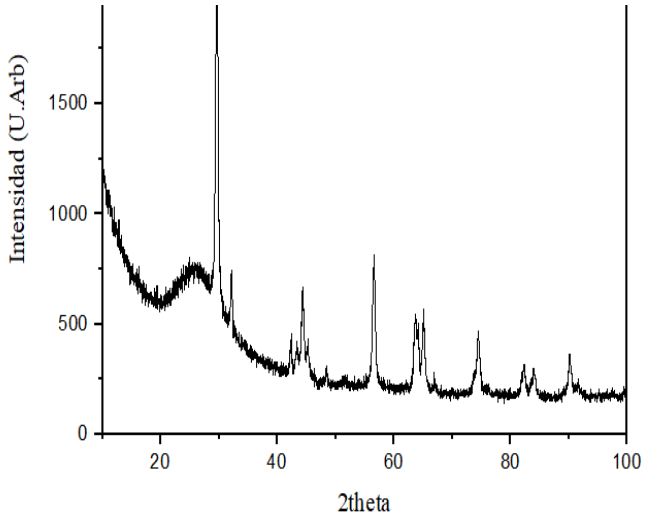


Figura 4. Difractograma del catalizador TiO_2/SiO_2

De acuerdo a la **figura 4** se encuentra el silicio amorfo en la síntesis del material porque se observa una curvatura similar al inicio. Los valores característicos de 2theta determinados y los planos [hkl] para el catalizador son: 25.354° (101), 38.575° (112), 48.049° (200), 53.890° (105), 55.060°, (211),

62.688° (204), 68.760 (116), 70.309 (220), 75.029 (215) los cuales corresponden a ficha JCPD Card No.21-1272, TiO_2 en fase anatasa.

Proceso fotocatalítico

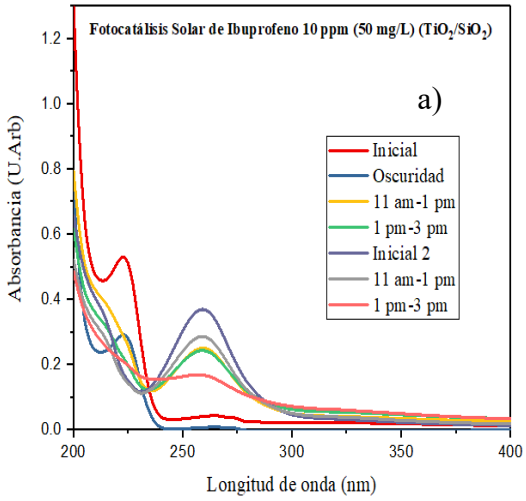


Figura 5. Espectros UV-Vis de una solución de ibuprofeno (10 ppm).

En la **figura 5** se muestran los espectros UV-Vis de una solución de ibuprofeno (10 ppm) del seguimiento del proceso fotocatalítico, de ambos catalizadores durante 8 horas de exposición a la luz solar, se observa una degradación de 85-90% de acuerdo a la curva de calibración ($\boldsymbol{y = 0.1125x + 17.49}$) y el cálculo de la degradación mediante la ecuación 1, utilizando como catalizador TiO_2/SiO_2. Espectroscopia UV-vis de absorción muestra un decremento de la banda de máxima absorción de un anillo aromático localizada en 220 nm y un incremento de la banda de máxima de absorción del ácido carboxílico localizada en 280 nm [11] infiriendo la formación de subproductos del ácido 2-[4-(1-hidroxisobutil)fenil] propionico y 4-etilbenzaldehído y siendo degradado el segundo día del proceso fotocatalítico [11].

CONCLUSIONES

- El método sol-gel es eficaz para la síntesis de nanomateriales TiO_2/SiO_2, permitiendo un control preciso sobre el tamaño y la distribución de partículas.
- Los nanomateriales sintetizados presentan propiedades fotocatalíticas mejoradas debido a la alta superficie específica y la estabilidad térmica proporcionada por la matriz de SiO_2.
- Se logró una remoción de 85-90% de ibuprofeno utilizando TiO_2/SiO_2.
- La síntesis de los nanomateriales no genera residuos hacia el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Kumar, A., & Pal, D. (2018). Antibiotic resistance and wastewater: Correlation, impact and critical humanhealth challenges. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(1), 52–58.https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.059Fuchigami, K., Taguchi, Y., & Tanaka, M.
[2] Carmona Martínez, E. (2018). Contaminants of emerging concern in the environment. Turia River as studycase. Universidad de Valencia.
[3] Gotipamul, P. P., Rajan, K. D., Khanna, S., Rathinam, M., & Siva, C. (2021). Bandgap Engineering and Plasmonically Enhanced Sun Light Photocatalyis in Au/Cd1-xZnxS Nanocomposites. En Research Square.

https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-167826/v1
[4] Zeng, J., Yang, B., Wang, X., Li, Z., Zhang, X., & Lei, L. (2015). Degradation of pharmaceutical contaminant ibuprofen in aqueous solution by cylindrical wetted-wall corona discharge. Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996), 267, 282–288. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.030
[5] Carmona Martínez, E. (2018). Contaminants of emerging concern in the environment. Turia River as study case. Universidad de Valencia.
[6] Salcedo, M. J., tes.), M. T. T. V. de la T. (2021). Photocatalytic degradation of pharmaceuticals in water: Design of nanocatalysts and study of by-products and mechanism. https://investigacion.unirioja.es/documentos/6184c37d2b9f274a4b5b097d
[7] Masuda, R., Takahashi, W., &Ishii, M. (1990). Particle size distribution of spherical silica gel produced by sol-gel method. Journal of Non-crystalline solids, 121(1-3), 389-393.
[8] Bedolla, R., & García-Rivero, M. (2011). Immobilization of Aspergillus Niger sp. in sol gel and its potential for production of xylanases. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 57(1), 6-11.
[9] Walton KS, Snurr RQ (2007) Applicability of the BET method for determining surface areas of microporous metal-organic frameworks. Journal of the American Chemical Society.
[10] Zou, L., Ye, J., Zhang, Q., & Zhao, X. (2016). Synthesis and characterization of TiO_2/SiO_2 nanocomposites for photocatalytic degradation of organic pollutants.
[11] Verrocchi y Julia Medina, A. (s/f-a) (2019) Estudios preliminares de remoción de ibuprofeno de medios acuosos utilizando sïlidos regionales modificados.

MATERIALES DE CAMBIO DE FASE COMO ALMACENADORES DE ENERGÍA: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PCM-BIORGÁNICO

Adolfo Daniel Amezquita Puga[1], Alfredo Cortés López[1], Andrés Madriñan Peralta[1], Mercedes Salazar-Hernández[2], Carmen Salazar-Hernánez[1], Juan Manuel Mendoza-Miranda[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional-Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías Campus Guanajuato. [2]Universidad de Guanajuato-Departamento de Minas, Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato. [3]Instituto Politécnico Nacional-Doctorado en Energía ESIME-Culhuacan; jmendozami@ipn.mx

RESUMEN

Hoy en día, el almacenamiento de energía es vital para mejorar diferentes procesos energéticos entre los cuales se encuentran la mejora de dispositivos térmicos como son las pilas de litio empleadas en los autos eléctricos. Donde se requiere colocar sistemas removedores de calor para evitar el calentamiento del dispositivo, es por ello que en este proyecto se propone estudiar la capacidad de almacenamiento de un PCM biorgánico encapsulado en nanopartículas de sílice, obtenidas a partir de silicato de sodio (MS) y su modificación con magnetita (MS-Fe_3O_4). El PCM se integró a la sílice por impregnación y la espectroscopia de infrarrojo indicó la presencia de los principales grupos funcionales de éste; por otra parte, se obtuvieron las curvas de caracterización térmica observando un efecto en el tiempo de sostenimiento de temperatura cuando se absorbe el PCM en la sílice modificada con la magnetita.

INTRODUCCIÓN

Las baterías de litio han revolucionado numerosas industrias, desde la electrónica de consumo hasta los vehículos eléctricos, debido a su alta densidad de energía y su capacidad de recarga. Sin embargo, enfrentan varios desafíos, siendo el aumento de temperatura uno de los más significativos. Cuando una batería de litio se calienta excesivamente, puede experimentar una serie de problemas que comprometen su funcionamiento y seguridad. Uno de los efectos más graves es la degradación acelerada de los componentes internos, como los electrolitos y los electrodos. Esto puede resultar en una pérdida de capacidad de almacenamiento y una reducción en la vida útil de la batería [1-5].

La BIL como se muestra en la Figura 1 se constituye de acuerdo con una celda electroquímica donde se compone por un cátodo y ánodo separados entre sí para evitar un cortocircuito. Como cátodo (carga positiva) se coloca el óxido de litio (Li_2O) y diferentes cantidades de metales de transición (níquel, Ni; magnesio, Mg y cobalto, Co); mientras que, el ánodo (carga negativa) se constituye de grafito; los electrones pasan del ánodo al cátodo a través de un medio electrolito (portadores de carga) que son iones de Li+ disueltos en un medio aprótico; como carbonato de dietilo o polímeros conductores (polímero de fluoruro de poli vinilideno, hexafluoropropano de fluoruro de polivinilo). El flujo de los electrones del ánodo al cátodo permite generar el voltaje de la pila; donde el flujo de los iones Li+ a través de los electrodos equilibra el flujo de la corriente externa manteniendo neutro el sistema; cuando la carga positiva de los iones Li+ no neutralizan la carga externa [3].

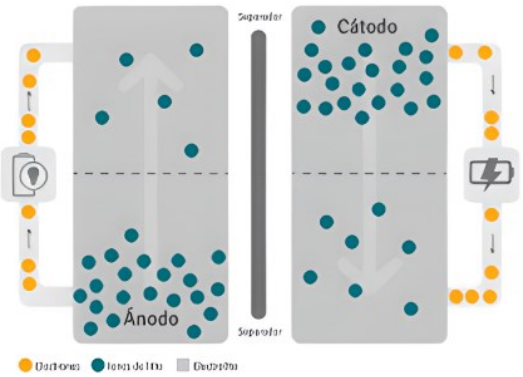


Figura 1. Funcionamiento de una BIL [3]

Una problemática de este sistema de almacenamiento de energía es la generación de calor durante el ciclo de carga y descarga de la BIL; lo cual a corto tiempo genera daños en algunos componentes. Además de que si la temperatura alcanza el punto de fusión del Li (180ºC) se genera la explosión del metal. Estas temperaturas se pueden alcanzar en los sistemas de almacenamiento de alto voltaje. Lo cual hace necesaria la introducción de sistemas de regulación de temperatura (60-85ºC) [4]; como lo son; los materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM) estos tienen un elevado calor latente (fusión o ebullición) o sensible; los cuales son empleados como almacenador de energía térmica [5].

Entonces, estos materiales han sido propuestos como nuevos sistemas de almacenamiento de energía (Thermal Energy Storage, TES). La Figura 2 muestra el principio de almacenamiento, donde el material absorbe la energía para almacenarla (calor latente o sensible) para posteriormente con un cambio de temperatura poder liberarla. El almacenamiento empleando el calor sensible ($Q=Cp\Delta T$) requiere que el material tenga un valor de Cp alto y la cantidad de energía almacenada dependerá de la diferencia de temperatura (ΔT) a la cual se exponga el PCM; por lo que la temperatura tanto de almacenamiento como de liberación de energía no son constantes. Sin embargo, el almacenamiento a través del calor latente (cambio de fase) se realiza a la temperatura a la cual se genere el cambio de estado de la materia (sólido-líquido; sólido-gas; líquido-gas) lo cual ocurre a una temperatura constante o en un rango muy limitado de temperatura para todos los materiales [5,6]

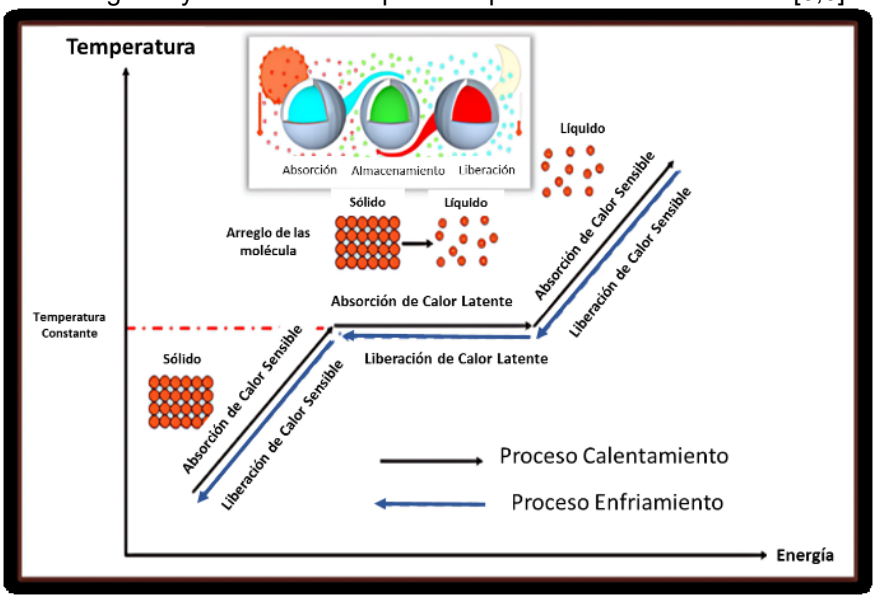


Figura 2. Funcionamiento de PCM como almacenador de energía [5,6]

PARTE EXPERIMENTAL

Para la implementación del proyecto se realizaron varios pasos con la finalidad de poder llegar a un material adecuado para la función de controlador de temperatura. A continuación, en la Figura 3 se indica la metodología general que se desarrolló, el cual consiste en una Etapa 1 donde se realizó el encapsulamiento del PCM en los sistemas de SiO2; Fe3O4 y SiO2/Fe3O4. En la Etapa 2 se realizó la adaptación del equipo para la obtención de datos y finalmente en la Etapa 3 se realizó la caracterización térmica de los materiales y la obtención de los resultados en forma de graficas en donde se compararon los materiales.

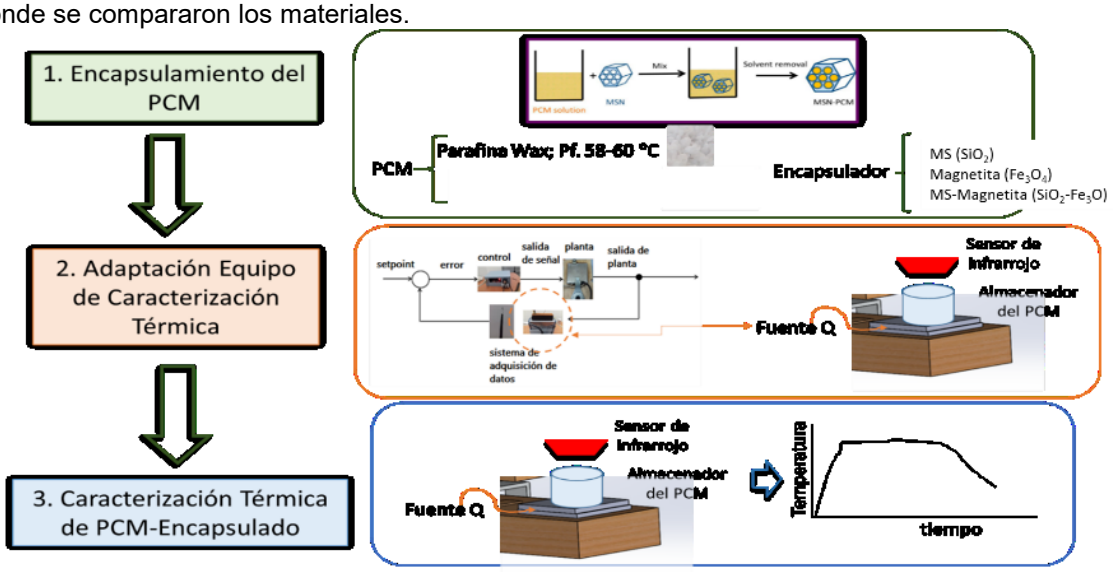


Figura3. Metodología general del proyecto

Síntesis y Caracterización de la magnetita

La síntesis de la magnetita, se realizó mediante técnicas de precipitación de acuerdo a la Ecuación 1, con una relación 2Fe3+:Fe2+ [7,8]. En un matraz de 250 mL son disueltos en 200 mL de agua 5.27 g de FeSO4 y 2.7 g de FeCl3 bajo agitación constante, posteriormente se ajusta el pH a 10-11 con NH4OH y el sistema es colocado a reflujo por 24h, al término de este tiempo, es recuperada la magnetita por filtración y secada a 75°C por 12 h. La magnetita, fue caracterizada por DRX en polvo, la cual se llevó a cabo en un difractómetro de rayos X modelo ULTIMA IV de RIGAKU.

(1)

$$2FeCl_3 + FeSO_4 + 8\,NH_4OH \longrightarrow Fe_3O_4 + (NH_4)_2SO_4 + 6\,NH_4Cl + 4\,H_2O$$

Síntesis y modificación de la MS con magnetita

La síntesis de los materiales mesoporosos de sílice, se realizó a partir de silicato de sodio utilizando como tamiz molecular el P-123 de acuerdo a Salazar y colaboradores [9]. Donde se obtiene ácido silícico para envejecer por 24 h y emplearlo como precursor en la formación de la red del inorgánico; para anclar la magnetita en la sílice esta se modifica con grupos amino para suspendió 0.167 moles de la sílice mesoporosa en 100 mL de etanol y se adicionaron 0.0416 moles del agente modificante 3-aminopropiltrimetoxisilano (90%, Aldrich), se adiciona 1 mL de NH4OH y el sistema se deja bajo reflujo por 24 h. Al término del tiempo el sólido es recuperado y lavado con 2 porciones de 10 mL de etanol y 10 mL de acetona, para posteriormente ser secado en la estufa por 12 h a 75ºC. El anclaje de la magnetita en las sílices modificadas se realizó colocando bajo reflujo 1g de la Fe3O4 sintetizadas con 10 g de la MS-NH2 por 12 h, posteriormente, el material es recuperado por filtración y secado a 70ºC por 12 h.

Encapsulamiento de la parafina wax

El PCM empleado fue parafina wax (99%; Aldrich) con punto de fusión entre 58-60ºC; el encapsulamiento se realizó por impregnación; empleando las cantidades especificadas en la Tabla 1. La PW se colocó en un vaso de precipitado y se calienta hasta lograr su fusión completa entonces se adicionó el encapsulador mezclando homogéneamente y se dejó enfriar a temperatura ambiente.

RESULTADOS

IMPREGNACIÓN DEL PCM EN ENCAPSULADORES

El método de encapsulamiento que se empleó fue impregnación simple; la Figura 4a muestra los espectros de infrarrojo para la parafina wax; presenta las señales correspondiente a un hidrocarburo C-H a 2900 cm^{-1}; □ y 1400cm^{-1}; □, además de identificarse el C=C a 680cm^{-1}. Mientras que la MS, presento las señales correspondientes para la red del inorgánico, si-O-Si a 1100 y 780 cm^{-1}y un hombro a 980 cm^{-1} que corresponde al Si-OH. La magnetita no es activa en infrarrojo por lo que la modificación de la MS con la magnetita solo se observa un ensanchamiento en la banda Si-O-Si (1100 cm^{-1}). La Figura 4b se muestra el difractograma para la magnetita; donde se identificaron los planos característicos para este material 2q a 30.1, 35.4, 43.1, 54.5, 57.6, 62º, que corresponden a la magnetita de acuerdo a Mohammadi y col. [10].

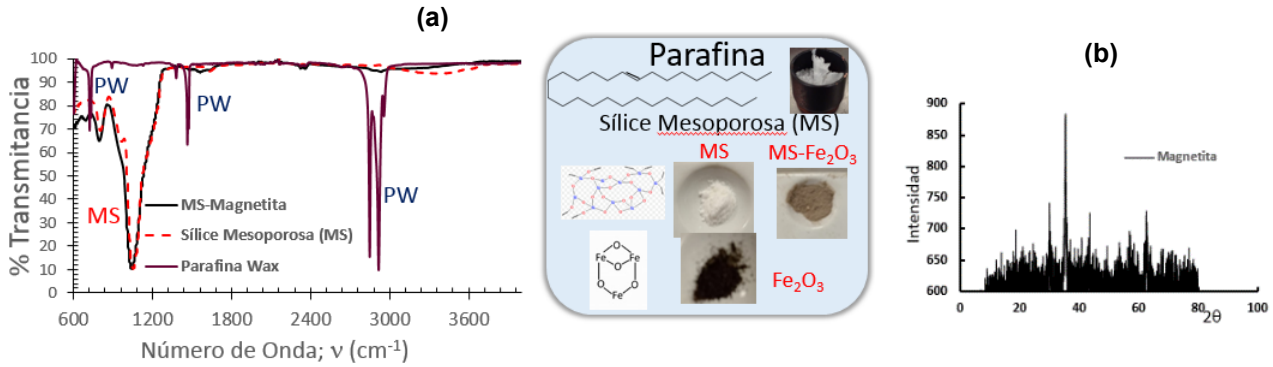


Figura 4. Materiales de partida (a) Espectro de infrarrojo para encapsuladores y PCM (b) DRX de la magnetita

La Figura 5a muestra la magnetita modificada con el PCM donde se observan todas las señales correspondientes para el hidrocarburo (PW) y una banda ancha de 700-1100 cm-1 que corresponde a la interacción del Fe_3O_4 con la parafina; por otra parte el sólido formado con baja (1:0.2) y alta (1:2) concentración de PCM se obtuvieron pastas sólidas. Por su parte la sílice mesoporosa (Figura 5b) forma sólidos tipo polvo para la concentración baja de PCm (1:0.5); se genera un sólido granulado con la concentración 1:1 y finalmente una pasta para la concentración 1:2; en los espectros la intensidad de las señales de PW se incrementa acorde con el incremento de PW en el material; predominando las señales de la PW para la concentración de 1:2. Para la MS-Magnetita la PW forma sólido granulado con la concentración 1:0.5 y la pasta se observó en las otras dos concentraciones 1:1 y 1:2; en los espectros para la concentración 1:0.5 se tiene similar intensidad en las señales de sílice y PW; el predominio en la intensidad de las señales de PW se observó desde la concentración 1:1.

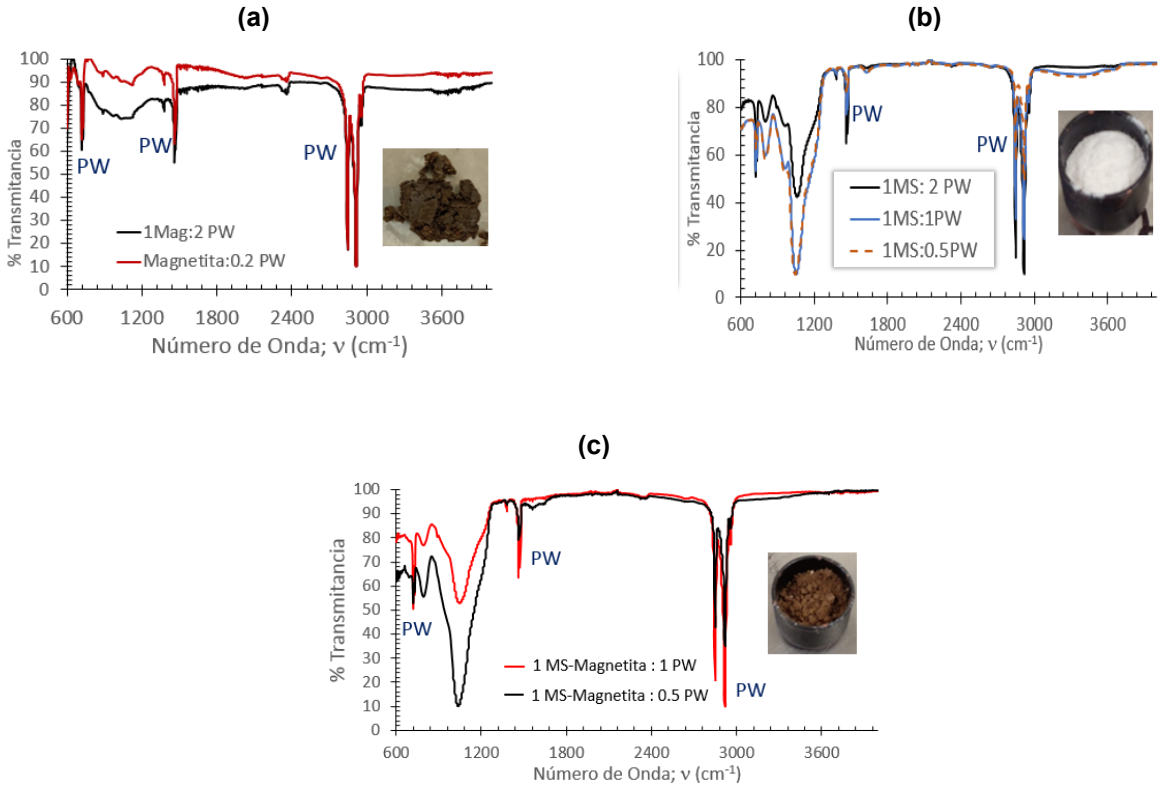
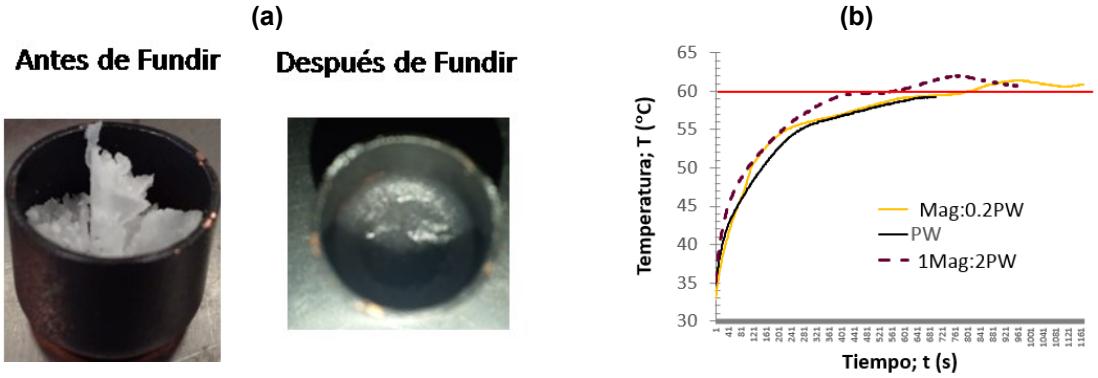


Figura 5. Encapsulamiento del PCM (a) Magnetita (b) sílice mesoporosa (c) MS-Magnetita

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

Una vez que se logra fundir la PW esta forma una cubierta en el recipiente y no puede recuperar su volumen inicial (Figura 5a); comportamiento que se observó también con la magnetita como encapsulador; sin embargo para la MS y MS-Magnetita los volúmenes se mantienen constantes. Como se observa en la Figura 5b la parafina se calienta para alcanzar los 60ºC; esta temperatura se alcanzó hasta los 761 s (12.68 min) en la PW y la Magnetita con 20% PW (1:0.2) alcanza los 60ºC a los 792 s (13.2 min) después de este tiempo comienza a incrementar la temperatura incrementando entre 1ºC; esto se debe a la capacidad conductora de la magnetita (Fe_3O_4). Mientras que en la mezcla 1:2 se tiene una mayor velocidad de adsorción de calor; los 60ºC se alcanzaron a 418s (6.97 min) y después de este tiempo se mantiene la temperatura oscilando entre 1-2 ºC por arriba de los 60ºC.



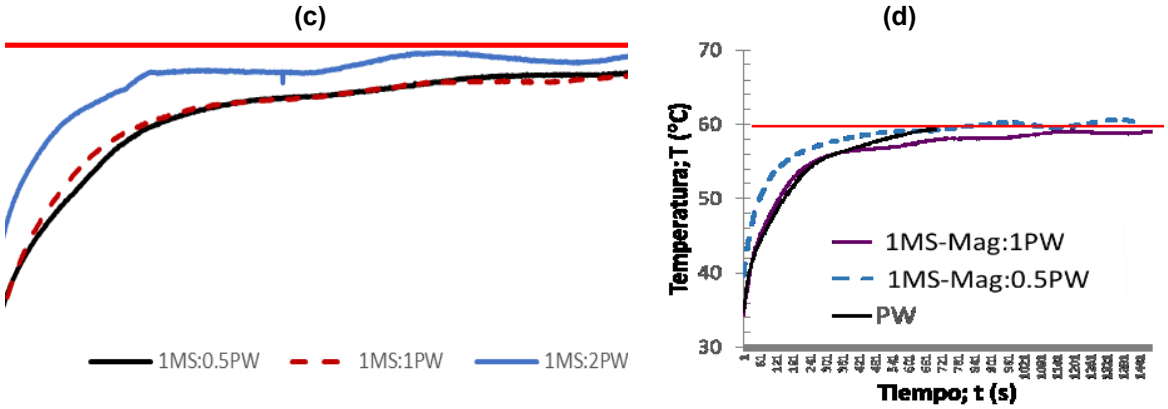


Figura 6. Comportamiento térmico (a) Cambio de volumen del PCM por el ciclo de calentamiento-enfriamiento (b) Curva de carga térmica en PCM encapsulado en magnetita (b) Curva de carga térmica en PCM encapsulado en sílice mesoporosa (d) Curva de carga térmica en PCM encapsulado en sílice mesoporosa modificada con magnetita

La sílice mesoporosa es un aislante térmico (baja conductividad térmica) no permite que se alcance la temperatura de 60 ºC; por lo que a la relación de 1:0.5 la diferencia de temperatura fue de 5-1.39ºC; mientras que para 1:1 de 5-2ºC y la relación 1:2 fue de 2-1. El comportamiento de la sílice encapsulada con magnetita fue un hibrido entre conductor y aislante térmico observando ΔT menores a $\pm$ 0.5 ºC.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización por espectroscopía de infrarrojo; la modificación de la sílice con la magnetita favorece la adsorción del PCM en la superficie del sólido; lo cual se ve reflejado en el comportamiento térmico; observando un comportamiento hibrido entre aislante (SiO_2) y conductor de la magnetita.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado a través del proyecto **SIP-2024/1947**

BIBLIOGRAFÍA

1. E. Oró, A. Gil, L. Miró, G. Peiró, S. Álvarez y L. F. Cabeza (2024) Thermal Energy Storage Implementation Using Phase Change Materials for Solar Cooling and Refrigeration Applications, *Energy Procedia*, 30, 947–956
2. W. Villasmil, L. J. Fischer , J. Worlitschek (2024) *Renewable Sustain; Energy Rev.*, 103, 71–84
3. Mohammadian, S. K., & Zhang, Y. (2017) Cumulative effects of using pin fin heat sink and porous metal foam on thermal management of lithium-ion batteries, *Applied Thermal Engineering*, *118*, 375–384
4. Z. Rao, S. Wang, G. Zhang (2011) Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO4 power battery, *Energy Convers. Manage,* 52; 3408–3414.
5. D. H. Jeon y S. M. Baek (2011)Thermal modeling of cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle, *Energy Convers. Manage,* 52, 2973–2981.
6. A. Hussain, C. Y. Tso y C. Y. H. Chao (2016) Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite, *Energy*, 115, 209–218.

7.] Jae H. Kwon, Lee D. Wilson, R. Sammynaiken “Synthesis and characterization of magnetite and activated carbon binary composites” Synthetic Metals (2014) 197: 8-17
8. Jos J. M. Lenders, Guilia Mirabello, Nico A. J. Sommerdijk “Bioinspired magnetite synthesis via olid precursor phases” Chem. Sci. (2016) 7: 5624-5634
9. Salazar-Hernández, Mercedes, Salazar-Hernández, Carmen, Rangel-Porras, Gustavo, Corona-Arroyo, Mario “Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoroprosos de silica. Revista de Ingeniería” Industrial (2020), 4(11): 24-30
10. Mohammadi HR, Nekobahr E, Akhtari J, Saeedi M, Akbari J, Fathi F. “Synthesis and Characterization of Magnetite Nanoparticles by Co-precipitation Method Coated with Biocompatible Compounds and Evaluation of In-Vitro Cytotoxicity” Toxicology Reports (2021). Doi: https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.01.012.

EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE EL ACABADO Y PROPIEDADES FÍSICAS Y ANTICORROSIVAS DE RECUBRIMIENTOS TIPO SIO2/PDMS

Rogelio Vázquez Camacho[1], Juan Efrén Carranco González[1], Alfredo Cortés López[1], Andrés Madriñan Peralta[1], Mercedes Salazar Hernández[2], Enrique Elorza Rodríguez[2], Carmen Salazar Hernández[1*]

[1]Instituto Politécnico Nacional-Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías Campus Guanajuato. [2]Universidad de Guanajuato-Departamento de Minas, Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato.
msalazarh@ipn.mx

RESUMEN

La corrosión es un fenómeno físico-químico que afecta en diferente grado a los sectores industriales; no siendo la excepción la industria aeronáutica. Actualmente, existen diferentes métodos que mitigan los efectos de la corrosión, entre los cuales se encuentran los recubrimientos anticorrosivos. Estos se aplican sobre la superficie metálica que se desea proteger formando una barrera que impide el contacto del sustrato con el agente corrosivo (humedad, ácidos, álcalis). Previamente C. Salazar-Hernández y colaboradores han propuesto la formulación de un recubrimiento cerámico base sílice/PDMS que actúa como agente anticorrosivo en superficies de Al-6061; observando resistencia a la corrosión que va de buena a excelente de acuerdo con los criterios de la NACE-International (organismo internacional que estudia los fenómenos de corrosión). Sin embargo, aún no se han investigado el efecto de la viscosidad, concentración del PDMS, grupo funcional en la cadena siloxano; por lo que en este proyecto se realizaran los estudios faltantes antes mencionados; empleando como sustrato metálico AL-6061 y como agente corrosivo una solución salina acidificada a pH de 3.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno físico-químico que provoca la degradación de los metales ocasionando la pérdida de propiedades físicas como son la resistencia mecánica y llegando a generar su degradación; afectando a metales y aleaciones en todos los ámbitos industriales. La Figura 1a muestra los efectos de la corrosión en una aeronave; donde el fuselaje está fabricado de aleaciones de aluminio-silicio (Al-6061); que a condiciones salinas y de humedad presenta corrosión intergranular (Figura 1b) [1,2]. Para mitigar los efectos de la corrosión en este metal se emplean los recubrimientos anticorrosivos, la Figura 1c muestra los diferentes componentes de éstos, los cuales inician con una capa de anodizado o anticorrosivo (base cromo y cromatos) seguida de un primer (fase orgánica con trazas de cromatos) y el top-coat (fase orgánica) o acabado final [3,4].

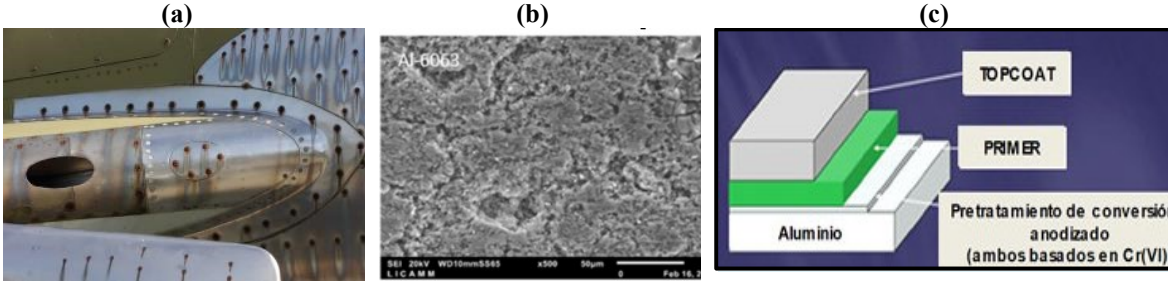


Figura. 1 (a) Efefctos de la corrosión en un aeronave [5] (b) corrosión intergranular en el Al-6061 de uso en aeronaves [6] (c) Composición de recubrimiento anticorrosivo comercial [7]

El agente anticorrosivo empleado a nivel industrial son los anodizados de cromo; es decir se adiciona una capa de cromo que actúa como ánodo de sacrificio (se corroe por el metal que se protege). Aunque el cromo presenta excelentes propiedades anticorrosivas [8]; este es un elemento tóxico que debe ser remplazado para emplear recubrimientos más amigables [9]. Recientemente, C. Salazar-

Hernández y colaboradores han desarrollado recubrimientos híbridos base sílice y polidimetilsiloxano (PDMS). Donde el PDMS se entrecruza en la red de sílice (véase Figura 2) permitiendo obtener recubrimientos con alta estabilidad mecánica, adherencia y buena resistencia a la corrosión en el Al-6061 [7, 10,11].

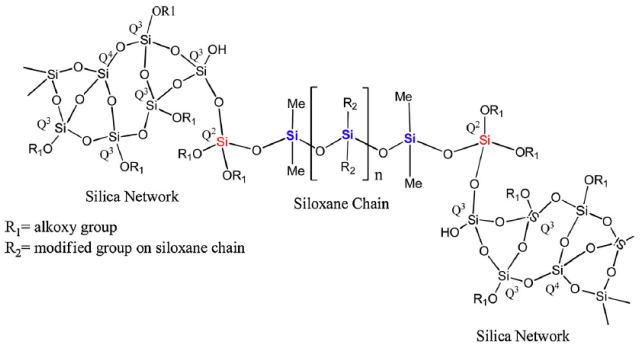


Figura 2. Estructura química del material híbrido SiO_2/PDMS [11]

Sin embargo, no se ha estudiado el efecto de la viscosidad sobre la formación del recubrimiento, evaluando su efecto sobre propiedad anticorrosiva y propiedades físicas como la dureza y adherencia que controlan el buen funcionamiento del mismo; lo cual es el objetivo de este proyecto.

PARTE EXPERIMENTAL

SÍNTESIS DE LOS CERÁMICOS SIO_2/PDMS

Los recubrimientos fueron obtenidos a partir de la metodología sol-gel empleando tetra-etil-orto-silicato, TEOS (99%; Fluka) como reactivo de partida para la formación de la sílice y polidimetilsiloxano hidroxi terminado (PDMS-OH; GELEST; 9912-32cst), copolímero difenilsiloxano-dimetilsiloxano hidroxi terminado (PDS; GELEST 40-80 cst) y el polidimtilsiloxano-dimetilamina terminado (PDMS-N; Gelest; 15-30 cst). Para ello se realizó una solución sol mezclando las cantidades indicadas en la Tabla 1; adicionando el 1%peso con respecto al TEOS de dibutildilaurato de estaño, DBTL (95%; Aldrich) que actuó como catalizador de policondensación promoviendo el entrecruzamiento de la fracción de sílice y las cadenas siloxana del PDMS. Las soluciones sol se calentaron a 50ºC manteniendo la temperatura constante y determinando el cambio de la viscosidad con el tiempo midiendo con un viscosímetro Brookfield DV2RLV empleando el adaptador UL y controlando la temperatura a 50ºC con un re-circulador TC-650.

Tabla 1. Cantidades empleadas para la síntesis de la solución sol

TEOS (g)	10	10	10
PDMS-OH (g)	1	2	40

APLICACIÓN DE LOS SIO_2/PDMS-FUNCIONALIZADOS

Se cortaron laminillas de Al-6061 con espesor de 3 mm en dimensiones de 2X3 cm. Antes de aplicar el recubrimiento se sometieron a abrasión con lija de agua de 600 para eliminar suciedad presente, posteriormente se realizaron 2 lavados con agua destilada y finalmente 1 con etanol grado reactivo para secar en la estufa a 50ºC por 3 hr. Los recubrimientos se depositaron empleando la técnica de inmersión controlando la velocidad de inmersión en 1mm/min, para colocar a secar a temperatura ambiente por 24 hr.

Caracterización de los Recubrimiento

Espectroscopía Infrarrojo.- Los especrtros de infrarrojo se obtuvieron en un equipo ATR-FTIR Thermo Scientific Nicolet iS10; midiendo el promedio de 32 scans en una ventana espectral de 4000-600 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1}.

Caracterización física: Dureza Leeb.- La dureza Leeb fue medida con un equipo UNI-T UT-347A siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM A956/A956M-17a [12].

Determinación de la Adherencia.- se determinó la Fuerza requerida para lograr el desprendimiento del recubrimiento empleando el método de Pull of test usando un equipo PosiTest AT-A siguiendo la norma ASTM D4541 [13].
Evaluación de la corrosión.- Los ensayos de corrosión fueron realizados en un banco Peak Tech DIT-105 con DCpower supply-2250 adapter. Donde se controla el voltaje y corriente generada en la pila galvánica formada por la placa de Al/6061 con y sin los recubrimientos como ánodo y se empleando grafito como cátodo. Se utilizó una solución de NaCl 3.5% w con pH de 3; para acidificar se adicionó HCl concentrado gota a gota. Se aplicó una corriente constante de 0.5A por 2 hr para posteriormente medir la pérdida de peso generado y determinar la velocidad de corrosión de acuerdo con la Ec. 1 y 2 [6,10-11].

$$V_c = \frac{\Delta m}{A \cdot t}[=]\frac{kg}{m^2 \cdot s} \quad (1) \qquad V_{cp} = \frac{V_c}{\rho} = \left[\frac{mm}{año}\right] \quad (2)$$

RESULTADOS

EFECTO DE LA VISCOSIDAD EN EL ACABADO y PROPIEDADES FÍSICAS DEL RECUBRIMIENTO

La Figura 3 muestra el efecto de la viscosidad en el acabado del recubrimiento; sí como el contenido de la cadena siloxao. A un tiempo de mezclado o gelificación de 10 min las soluciones se comportan como fluidos Newtonianos con viscosidad alrededor de los 5mPa.s; formando recubrimientos delgados para la concentración con el 10 y 20% pesos de PDMS. Conforme la red del sólido se forma la viscosidad incrementa y para los 20 min se tiene una viscosidad entre 10-15 mPa·s; formando recubrimientos gruesos con formación de grupos en la concentraciones del 20 y 40% p observando una mayor capacidad para recubrir la superficie del metal.

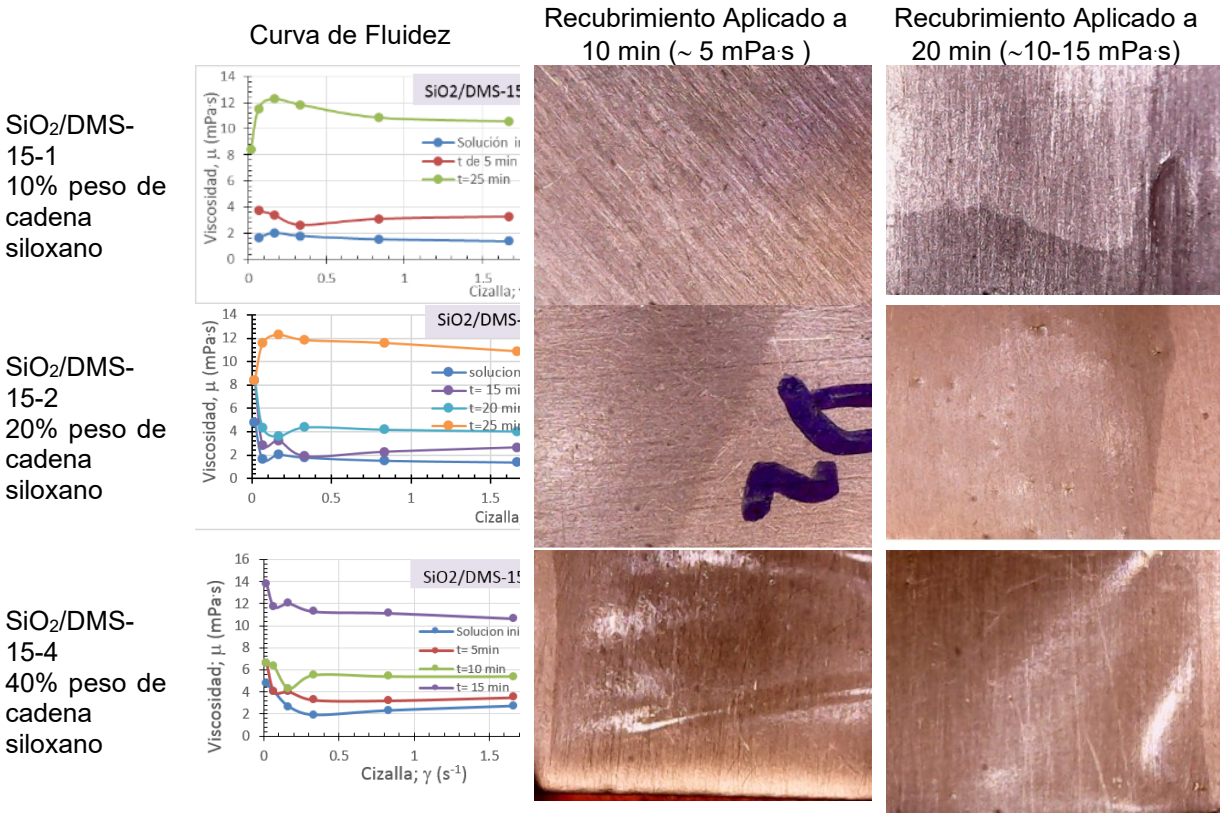


Figura 3. Efecto de la viscosidad en el acabado del recubrimiento SiO_2/PDMS

La Figura 4a muestra el efecto de la cantidad de PDMS en la red del cerámico sobre la adherencia del mismo; donde se observó que a menor cantidad de PDMS mayor es la adherencia del cerámico hibrido con la superficie del meta; mientras que la dureza (Figura 4b) se comportó de forma contraría; mayor dureza se determinó para los recubrimientos con mayor contenido de PDMS en la estructura del cerámico. Si bien ambas propiedades son importantes, la adherencia debe ser un factor importante a considerar en un recubrimiento ya que si no se une fuertemente a la superficie del metal se elimina con facilidad y no cumple el efecto de protección deseado.

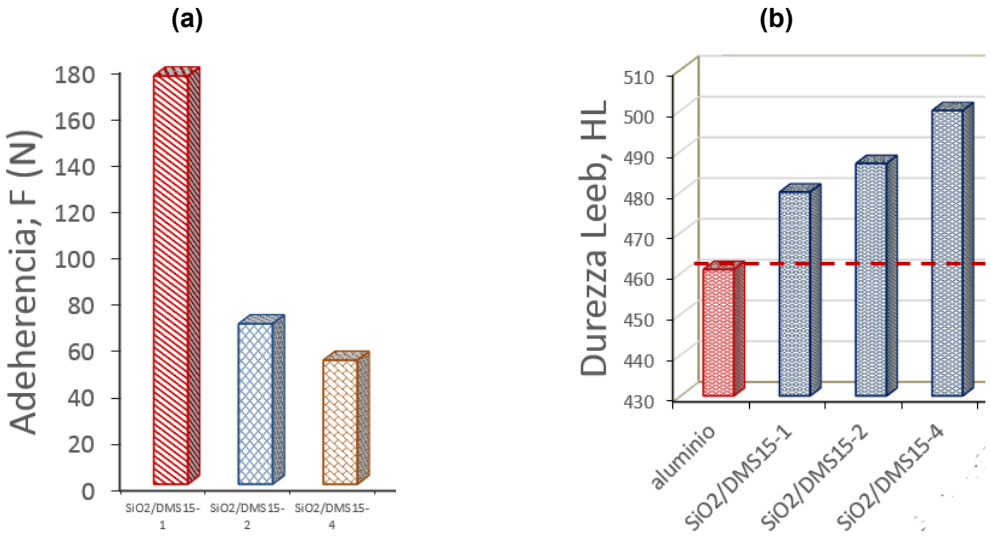


Figura 4. Propiedades físicas de los recubrimientos aplicados con viscosidad de 10-15 mPa.s (a) Adherencia (b) Dureza Leeb

CAPACIDAD ANTICORROSIVA

El efecto de la viscosidad sobre la resistencia a la corrosión se muestra en la Figura 5; donde se puede observar la mayor resistencia a la corrosión se obtiene en la viscosidad de ~10 mPa.s (10-15 min de gelificación) para la concentración de PDMS del 10% en la cadena siloxana; donde se tiene el mejor acabado; mientras que para el cerámico con 20 y 40% se observó el mayor incremento en la resistencia a la corrosión para una viscosidad de ~5 mPa.s que corresponde a un tiempo entre 5-10min de gelificación.

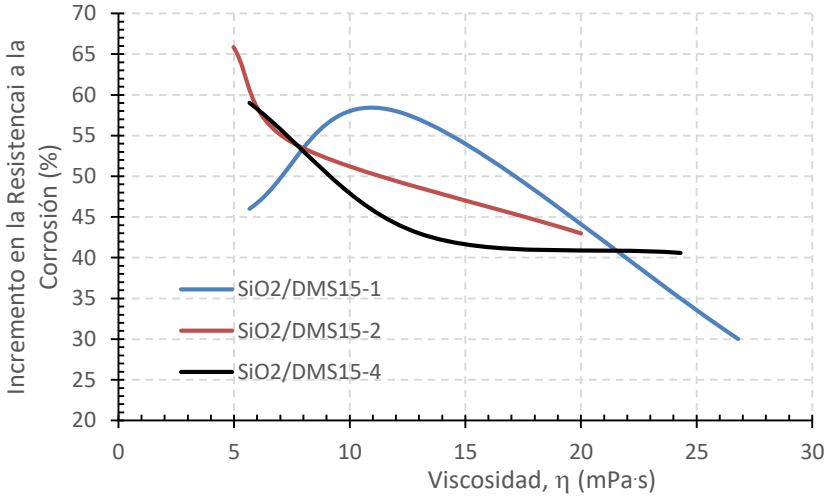


Figura 5. Efecto de la viscosidad en la resistencia a la corrosión del Al-6061

CONCLUSIONES

La viscosidad en la solución sol empleada para la obtención de los recubrimientos tiene efecto en la adherencia y dureza del cerámico depositado sobre el sustrato metálico; dando mayor adherencia y estabilidad mecánica en los recubrimientos depositados entre los 5-10 min de gelificación (~5-12 mPa·s); donde se forman recubrimientos homogéneos libres de grupos o muy delgados que no alcanzan a recubrir por completo la rugosidad del metal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado a través del proyecto **SIP-2024/1420**

BIBLIOGRAFÍA

1) S. Benavides, "Corrosion in the aerospace industry," in Corrosion Control in the Aerospace Industry, Woodhead Publishing Series in Metal and Surface Engineering, 2009, pp. 1-14.
2) R. Cortés, J. Villanueva, E. Ponce, M. Rojas, E. Rojas, Revista Facultad de Ingenierías, UTA (Chile), 2004, 12(2), 43
3) A.S. Cushman, H.A Garder, The corrosión and perservation of iron and steel, Mac Graw Hill, New York (1910)
4) Swagelock, "Tipos de Corrosión,". Available: https://www.swagelok.com/es/toolbox/material-selection-guide/corrosion-types.
5) Aircraft; Types of aircraft corrosion to be wary of. https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-corrosion/
6) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, R Carrera-Cerritos, E. Elorza, J.M. Mendoza-Miranda, R. Navarro, "DBTL as neutral catalyst on TEOS/PDMS anticorrosive coating", J. Sol-Gel Sci and Technol, 2017, 81, pp. 405-412.
7) N. International, "Nace International Impact," http://impact.nace.org/economic-impact.aspx
8) P.O. Olorunniwo y O. Ige, "Corrosion resistance through the application of anticorrion coatings," In Developments in corrosion protection, M. Aliofkhazraei, Ed., Intech, 2014, pp. 242-270.
9) Pellerin, S. Booker, "Reflection on hexavalent chromium: health hazards of an industrial heavyweight", Environmetal Health Perspectives, 2000, 08 (9)
10) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, J.M Mendoza-Miranda, R. Miranda-Avilés, E. Elorza-Rodríguez, R. Carrera-Cerritos, M.J. Puy-Alquiza, "Organic modified silica obtained from DBTL polycondensation catalyst for anticorrosive coating", J. Sol-Gel Sci and Technol, (2018) 87 (2) pp. 229-309.

11) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, R. Carrera-Cerritos, J. Mendoza-Miranda, E. Elorza-Rodríguez, R. Miranda-Avilés y C. Mocada-Sánchez, “Anticorrosive properties of PDMS-Silica coatings: effect of methyl, phenyl and amino groups” Progress in Organic Coatings, (2019) 136, p. 105220
12) Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel products. ASTM-A956/A956M-17a.
13) Standard TEST Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. ASTM D4541-22.

AUTOMATIZACIÓN DE TRITURADORA DE PLÁSTICO (PEAD)

Abner Adalid Salgado Soto, Ramon Hernandez Sanchez, Bryan Heiler Lomberg Moreno Arturo Serrano Campos, Alan Nogueda Hernandez, Fermin Rubi Abarca

Universidad Tecnológica De La Costa Grande De Guerrero, Programa Educativo de Ingeniería en Metal Mecánica.
r_hernandez@utcgg.edu.mx

RESUMEN

La trituración es el proceso de descomposición de producto hechos en base a ***Polietileno de Alta Densidad (PEAD),*** el cual se lleva a cabo con un mecanismo triturador con fines de reducir el tamaño, quedando así una partícula plástica denominada hojuela, este proceso se hace de manera mecanizada, donde el objetivo de este estudio es analizar y automatizar la operatividad de la trituradora de PEAD.

Este triturador contiene un motor eléctrico monofásico de tipo abierto con una potencia de 2 HP a baja velocidad y su encendido es mecánico, accionado inicialmente por la conexión de la maquina a la fuente eléctrica, seguido de la pulsación de un botón de encendido y apagado. Se pretende diseñar y estructurar un circuito electrónico que contiene un sensor de proximidad que funcione en base a una programación de Arduino, facilitando el encendido y apagado, así como la operatividad.

Colocando un sensor que detecte el ingreso de materia prima y otro sensor que detecte la salida de material procesado; todo esto conectado al diagrama eléctrico de apagado de emergencia. Obtenemos un equipo de trituración autónomo debido a que eliminamos el accionamiento de botones, haciendo rápida su utilización.

INTRODUCCIÓN

Las trituradoras de PEAD son máquinas especialmente diseñadas para cortar y moler plásticos, específicamente aquellos elaborados con polietileno de alta densidad (PEAD). Estas trituradoras pueden ser útiles en el proceso de reciclaje de este tipo de plástico, ya que reducen el tamaño del material para facilitar su posterior tratamiento por ende se busca mejorar el funcionamiento de nuestra trituradora implementando los conocimientos adquiridos.

TEORIA

Plásticos:

Los plásticos son sustancias orgánicas formadas por macromoléculas llamadas polímeros. Estos polímeros son grandes agrupaciones de monómeros unidos mediante un proceso químico llamado polimerización. Los plásticos proporcionan una serie de propiedades que no pueden lograrse con otros materiales, por ejemplo: color, baja densidad, buen aislante eléctrico y resistencia a la degradación ambiental y biológica. Carecen de punto fijo de ebullición, son elásticos y flexibles, permiten ser moldeados, adaptarse a diferentes formas y aplicaciones.

Clasificación de los plásticos:

En la actualidad existen más de 50 tipos de plásticos, pero para facilitar su reciclaje se aplica el Código de Identificación de Plástico; se trata de un sistema utilizado internacionalmente en el sector industrial para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos. Esto fue realizado por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) en el año 1988, con el fin de propiciar y dar más eficiencia al reciclaje.

PEAD

La siguiente variable independiente es este tipo de plástico obtenido también del etileno, utilizado a temperaturas inferiores a los 70 °C y a bajas presiones, a comparación con el polietileno tereftalato, es más duro y rígido. El polietileno de alta densidad se obtiene por adición, es decir, sumando distintas unidades de etileno.

Tipos de PEAD:

1. Frascos PEAD
2. Botellas PEAD
3. Envases PEAD
4. Envases para alimentos
5. Tanques de combustible
6. Depósitos de líquidos
7. Paragolpes y revestimiento interiores
8. Conductos de aire y sistema de refrigeración
9. Asientos y compartimientos interiores de almacenaje
10. Elementos de sujeción y fundas de protección

Placa arduino 1

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite escribir, cargar y ejecutar programas en la placa. Arduino ha ganado popularidad en el ámbito de la electrónica de aficionados, la educación y el prototipado rápido debido a su facilidad de uso y su flexibilidad.

La placa Arduino 1 puede referirse a varias placas de la familia Arduino, como Arduino Uno, que es una de las placas más comunes y populares. Aquí tienes información sobre Arduino Uno:

- Microcontrolador: Arduino Uno utiliza un microcontrolador ATmega328P de Atmel (ahora parte de Microchip Technology). Este microcontrolador tiene 32 KB de memoria flash para almacenar el programa, 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM.
- Puertos de E/S (Entrada/Salida): Arduino Uno tiene 14 pines digitales de E/S, de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y 6 como entradas analógicas. Además, tiene un puerto USB para la comunicación con la computadora y un conector de alimentación.
- Alimentación: Puede ser alimentado a través del puerto USB de la computadora o mediante un adaptador de corriente externo. El voltaje de entrada recomendado es de 7 a 12 voltios.
- Entorno de Desarrollo: Para programar la placa Arduino Uno, se utiliza el Arduino IDE, un entorno de desarrollo basado en Processing y en la plataforma de software Wiring. Es compatible con los sistemas operativos Windows, macOS y Linux.
- Conexiones: Arduino Uno tiene una variedad de conectores, incluyendo pines digitales, pines analógicos, puerto USB, conector de alimentación, pines de comunicación serie (RX y TX), entre otros.
- Compatibilidad: Es compatible con una amplia variedad de shields (placas de expansión), módulos y sensores diseñados para la plataforma Arduino.
- En resumen, la placa Arduino Uno es una plataforma versátil y fácil de usar que es adecuada para una amplia gama de proyectos de electrónica, desde simples tareas de control hasta proyectos más avanzados de robótica e IoT (Internet de las cosas).

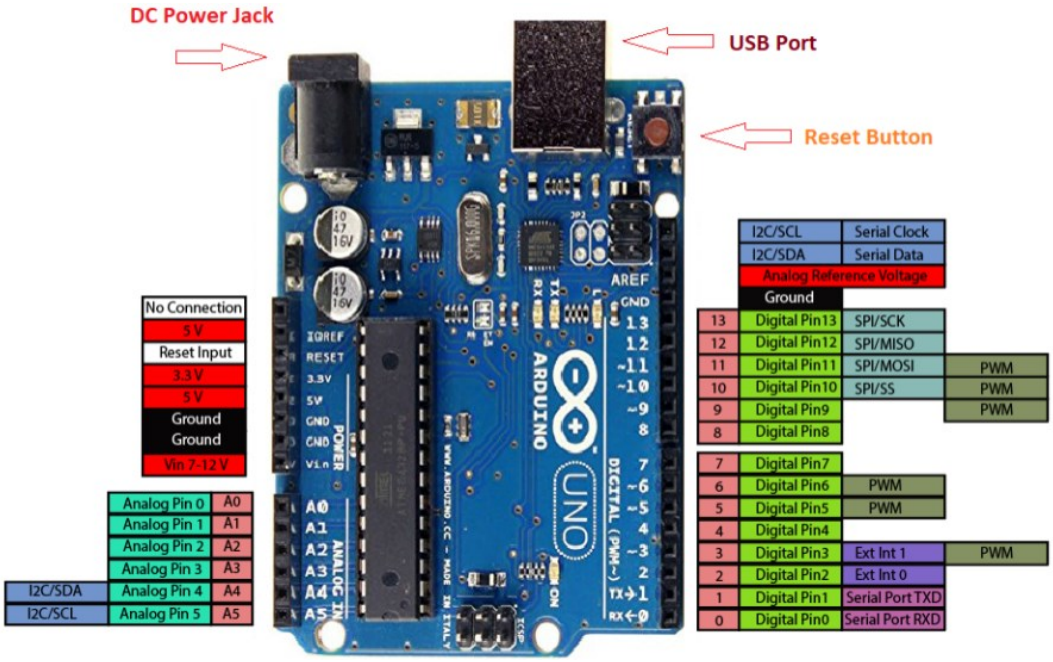


Figura 1.- Placa de Arduino Uno. Fuente: www.arduino.com

PARTE EXPERIMENTAL

Se lleva a cabo por trabajo mecánico, aplicando fuerzas de tensión, compresión y corte. Los plásticos separados son molidos y tamizados. Es importante verificar que los plásticos que sean sometidos a este proceso no se encuentren contaminados con objetos metálicos, ya que esto dañaría las cuchillas del molino. Según el polímero a tratar se elegirá la máquina más apropiada para reducirlo a pequeños fragmentos

Básicamente se compone de una boca de entrada más o menos grande, que permite el acceso a las piezas de plástico y que está preparado para evitar, en la medida de lo posible, proyectar piezas al exterior. Todo esto automatizado por la implementación de un circuito electrónico que funciona gracias a un sensor de proximidad

Después, pasa por un tamiz o por una rejilla que únicamente permite el paso a los trozos de un tamaño deseado. Por último, pasa por una cinta hasta un depósito donde se almacena el producto. Existen muchos tipos de trituradores, con diferentes tamaños, potencias y velocidades. Elegir entre uno y otro dependerá del tipo de material que vayamos a querer triturar.

Tabla 1.- Propiedades mecánicas del PEAD.

Propiedad	Valor típico
Resistencia a la tracción (M	20-40
Dureza (Shore D)	60-70
Tenacidad ($^{KJ}/_{m^2}$)	10-30
Rigidez (Modulo de elasticidad) (GPa)	0.8-1.5
Resistencia al desgaste	Buena
Resistencia a la flexión	500-1000 MPa
Resistencia al impacto ($^{J}/_{m}$)	50-200
Resistencia a la fatiga	Buena

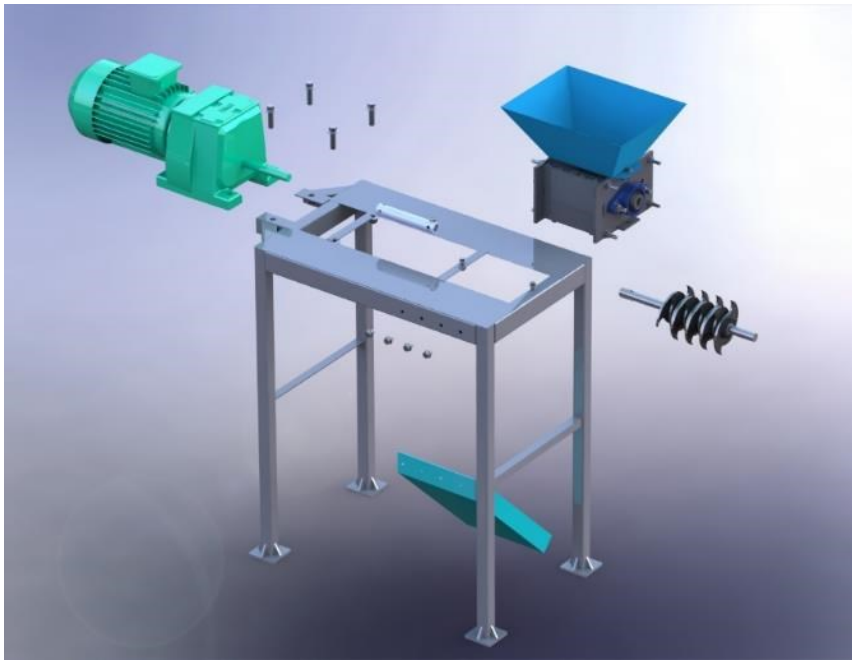
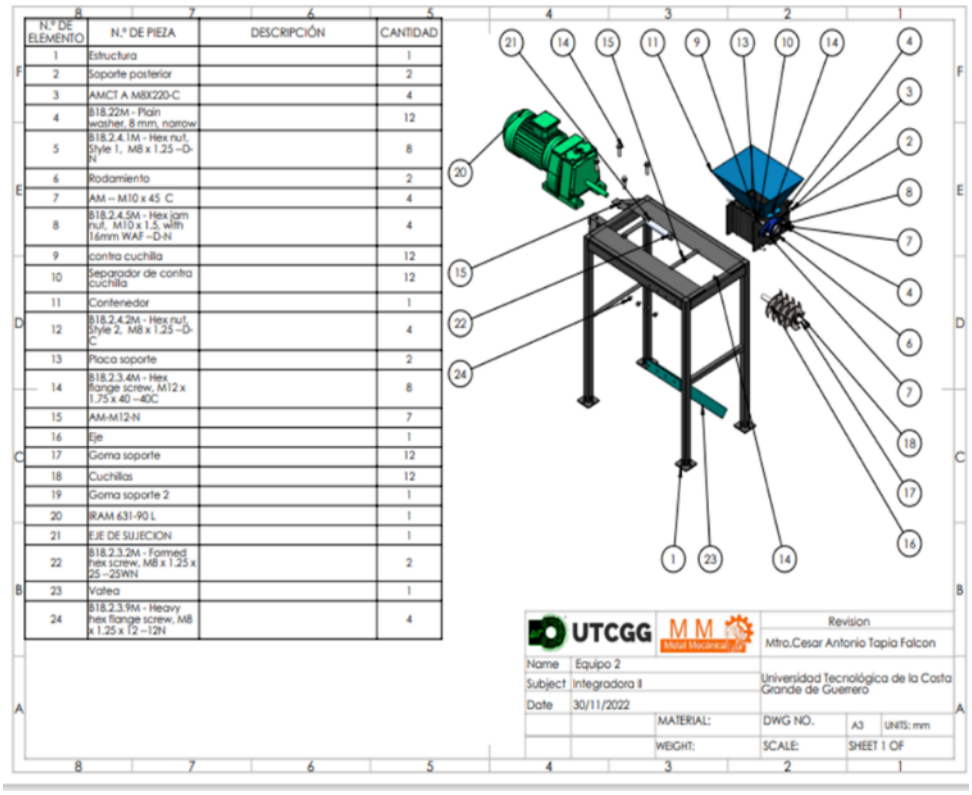
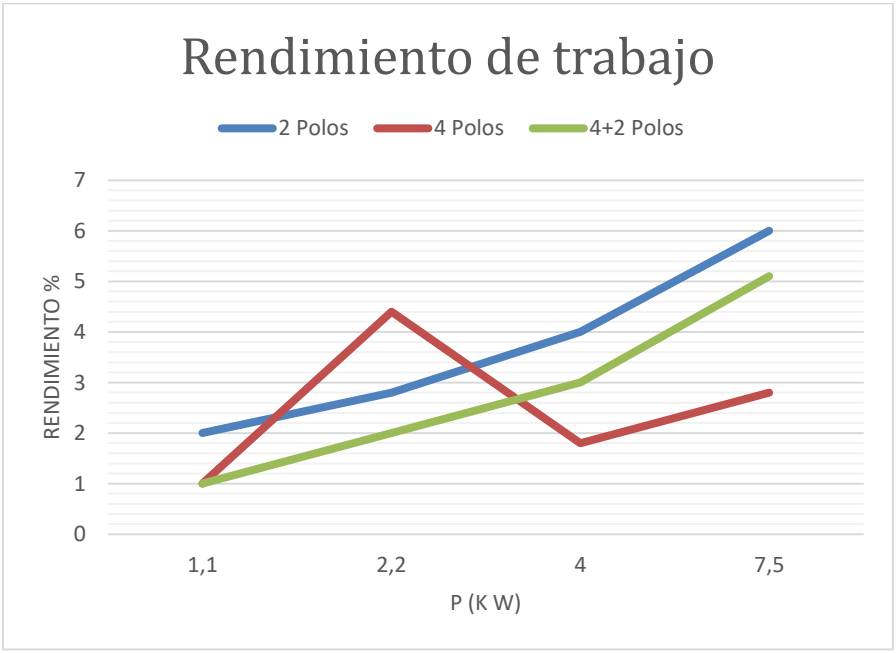


Figura 2.- Componentes y ensamblaje. Fuente: el autor.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Estructura		1
2	Soporte posterior		2
3	AMCT A M8X220-C		4
4	B18.22M - Plain washer, 8 mm, narrow		12
5	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M8 x 1.25 –D-N		8
6	Rodamiento		2
7	AM – M10 x 45 C		4
8	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M10 x 1.5, with 16mm WAF –D-N		4
9	contra cuchilla		12
10	Separador de contra cuchilla		12
11	Contenedor		1
12	B18.2.4.2M - Hex nut, Style 2, M8 x 1.25 –D-C		4
13	Placa soporte		2
14	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M12 x 1.75 x 40 –40C		8
15	AM-M12-N		7
16	Eje		1
17	Goma soporte		12
18	Cuchillas		12
19	Goma soporte 2		1
20	IRAM 631-90 L		1
21	EJE DE SUJECION		1
22	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M8 x 1.25 x 25 –25WN		2
23	Varea		1
24	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M8 x 1.25 x 12 –12N		4

Figura 3.- Componentes y cantidades. Fuente: el autor.



Grafica 1. —Rendimientos de motores eléctricos. Fuente: el autor.

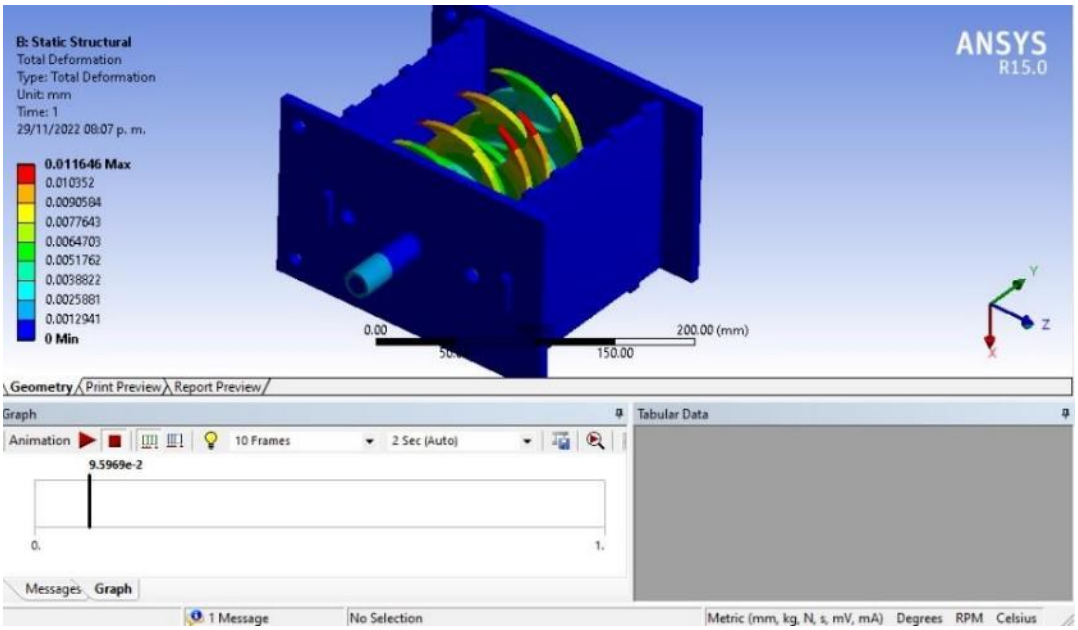


Figura 4.- Calculo de deformación estructural mediante el uso del software ANSYS. Fuente: el autor.

Tabla 2.- Códigos de programación para la automatización

Códigos de programación

int PIR= 8;
 	
int mot=7;
 	
void setup()
{
Serial.begin(9600);
pinMode(PIR, INPUT);
pinMode(mot, OUTPUT);
}
 	
void loop()
{
int value= digitalRead(PIR);
 	
if (value == HIGH)
{
Serial.println("alto");
digitalWrite(mot, 1);

```
}
else
{
Serial.println("bajo");
digitalWrite(mot, LOW);
}
delay(100);
}
```

RESULTADOS

CONCLUSIÓN

Para este proyecto la etapa de trituración esta culminada, tomándonos en promedio molienda de 100 kg por cada hora de trabajo, por lo que se pretende colocar un control con un sistema automatizado para llevar a cabo un mejor control en la operación de este. Se pretende con esta participación iniciar un camino hacia el prototipo experimental con la intención de reforzar los conocimientos y la experiencia en los diferentes eventos. Se inscribió la participación de este prototipo experimental en dos congresos mas a los que esperamos llevar de manera física, con la intención de obtener retroalimentación de instituciones que se dedican a este rubro de molienda.

BIBLIOGRAFÍA

Wordpress.com. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://silviatecno.files.wordpress.com/2012/03/tema8_plasticos.pdf

(S/f). Upv.es. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_6.html

MATERIALES PLÁSTICOS. (s/f). Slideplayer.es. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de https://slideplayer.es/slide/1078054/

PLANIFICACIÓN DE EVACUACIÓN ANTE RIESGOS VOLCÁNICOS EN TOLUCA: UN ENFOQUE BASADO EN REDES

Alejandra Ibarra Morales[1], Mitzi Alejandra Cuin Neri[1], Sofía Quirós González[1], Saul Demian Salinas Urbano[1], Yazmín de las Nieves Téllez Montes[1], Oscar Ivan Torres Mena[2]

[1]Instituto Politécnico Nacional – Unidad Profesional Intersiciplinaria de Energía y Movilidad,
[2]Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Física.
aibarramo@ipn.mx

RESUMEN

El Nevado de Toluca es un estratovolcán cercano a la ciudad de Toluca de Lerdo, Estado de México. Aunque parece inactivo, estudios indican que está dormido, con un gran volumen de magma. A diferencia de otros volcanes activos en México, no existe un plan de evacuación para Toluca, con casi un millón de habitantes. Dada la peligrosidad de las erupciones volcánicas, se propone desarrollar un plan de evacuación. Basándose en el mapa de peligros volcánicos de Aceves-Quesada et al. (2006), se utilizó la teoría de redes para identificar rutas de evacuación. Esta red dirigida se construyó identificando municipios y vialidades clave, y aplicando un árbol de expansión mínimo para determinar los caminos más cortos hacia zonas seguras. Es crucial abordar esta problemática para proteger a la población en caso de una erupción del Nevado de Toluca.

INTRODUCCIÓN

El Volcán Nevado de Toluca, un estratovolcán y el cuarto más alto de México con una elevación de 4680 metros sobre el nivel del mar, tuvo su última erupción registrada hace aproximadamente 13,000 años, sin embargo D'Antonio et al. (2008) [1] señala: que este volcán no está extinto sino que se encuentra en un estado de quietud, estudios recientes hecho con cristales de circonio de piedra pómez realizados por Weber et al. (2020) [2] señalan: "solo un pequeño porcentaje del magma suministrado entró en erupción (en el evento anterior), y actualmente hay un volumen de fusión de hasta 350 km³ almacenado bajo el volcán". Además, advierte que, si la entrada de magma se reanuda, el volcán podría reactivarse en unos pocos años, potencialmente desencadenando una gran erupción.

La proximidad de la ciudad de Toluca, capital del Estado de México, al Nevado de Toluca agrava el riesgo. Toluca, según el censo del INEGI de 2020, alberga a 910,608 habitantes y se encuentra a solo 22 km del volcán. Además, otras comunidades cercanas, como San Francisco Putla, San Pedro Tlanisco y Zaragoza de Guadalupe, también estarían en peligro en caso de una erupción. La gran densidad de población y la cercanía al volcán requieren una planificación meticulosa para garantizar la seguridad de los residentes.

En este contexto, la Ingeniería en Movilidad Urbana, una carrera recientemente creada en el Instituto Politécnico Nacional juega un papel crucial. El objetivo de esta carrera es formar profesionales con conocimientos avanzados en movilidad urbana, abarcando aspectos sociales, medioambientales, económicos y tecnológicos, con el fin de contribuir al desarrollo social y sustentable del país. Utilizar las estrategias y metodologías de la Ingeniería en Movilidad Urbana para desarrollar un plan de evacuación en caso de erupción volcánica es esencial. Este enfoque no solo aborda la evacuación local, sino que también implica la movilización de miles de personas a través de decenas de kilómetros, integrando técnicas avanzadas de planificación y logística para proteger a la población vulnerable.

TEORÍA

Riesgos Volcánicos

El volcán Nevado de Toluca presenta una variedad de riesgos volcánicos, determinados a través de estudios exhaustivos que emplean técnicas de evaluación multicriterio (EMC) y sistemas de información geográfica (SIG). Aceves-Quesada, López-Blanco y Martin del Pozzo (2006) [3] identificaron peligros como la lluvia de ceniza, avalanchas, flujos de bloques y ceniza, flujos de pómez, y lahares. La metodología utilizada implica la evaluación y combinación de criterios mediante reglas de decisión basadas en el análisis y jerarquización de alternativas, lo cual permitió determinar las zonas más afectadas. Los flujos piroclásticos, especialmente los flujos de bloques y ceniza fueron identificados como los más destructivos debido a su energía y frecuencia.

Los flujos volcánicos comprenden diversos tipos de fenómenos peligrosos. La ceniza volcánica, según Reckziegel, Arango y Viramonte (2019) [4], tiene un alcance geográfico superior al de partículas más grandes y su composición varía según el volcán y la erupción. Los lahares, descritos por López-Ruiz y Cebrá (2007) [5], son flujos de derrubios y fango generados por la fusión de nieve y hielo durante una erupción o por lluvias torrenciales en áreas tropicales. Los flujos de bloques y ceniza, como parte de los flujos piroclásticos, transportan material volcánico a grandes distancias. Los flujos de lava, según Griffiths (2000), son corrientes de roca parcialmente fundida que se enfrían y solidifican gradualmente, presentando una amplia gama de regímenes de flujo.

Las zonas geográficas de riesgo en el área del Nevado de Toluca incluyen áreas que han sido afectadas por erupciones anteriores. Las áreas más vulnerables abarcan la ciudad de Toluca y los centros industriales de Toluca–Lerma–San Mateo Ateneo y Ocoyoacac–Tianguistengo, debido a su importancia económica y ubicación geográfica [3]. En caso de una nueva erupción, las áreas al noreste y sur del volcán serían las más afectadas debido a la topografía y el desarrollo de barrancos. Los lahares afectarían principalmente las áreas al este y sur, como los barrancos de los ríos San Jerónimo, Chontalcuatlán, Arroyo Grande y El Zaguán. Las avalanchas de escombros, aunque menos probables, podrían impactar áreas al sur y este del volcán debido a las fallas activas y la topografía [3].

Teoría de Redes

La teoría de redes, también conocida como teoría de grafos, es una rama de las matemáticas y la informática que se centra en el estudio de las relaciones entre entidades. Estas entidades, llamadas nodos o vértices, pueden representar personas, objetos, ideas o cualquier otro elemento que se desee analizar. Las relaciones entre estos nodos se representan mediante enlaces o aristas, que pueden ser de naturaleza física, social, informacional o de cualquier otro tipo.

Según Caparrini, F. S. (2020) [6], una red se define como una representación de la relación entre distintos elementos, ya sean objetos, personas, conceptos, etc. Esta definición pone de relieve el aspecto fundamental de las redes: su capacidad para modelar las interconexiones entre entidades de diversa índole.

Componentes de una red:

Los dos componentes básicos de una red son los nodos y las aristas:

- Nodos (o vértices): Representan las entidades individuales que se analizan en la red. Pueden ser personas, objetos, ideas, eventos, etc.
- Aristas (o enlaces): Representan las relaciones entre los nodos. Las aristas pueden ser dirigidas o no dirigidas, ponderadas o no ponderadas, y pueden representar diferentes tipos de relaciones, como amistad, colaboración, flujo de información, etc.

El árbol de peso mínimo es un concepto fundamental en la teoría de redes y la investigación de operaciones. Según Aquino Dominguez (2018) [7] se trata de un subconjunto de aristas de un grafo que conecta todos sus nodos formando un árbol, es decir, una estructura sin ciclos, con el menor peso total posible. En otras palabras, el objetivo es encontrar la forma más económica de conectar todos los puntos de una red.
El problema del árbol de peso mínimo tiene numerosas aplicaciones prácticas en diversos campos, como (Legrá-Quintero 2009) [8]:

- Redes de transporte: Encontrar la ruta más económica para construir una red de carreteras, ferrocarriles o tuberías.
- Diseño de redes de telecomunicaciones: Diseñar la topología de una red de comunicaciones minimizando el costo de los cables.
- Sistemas distribuidos: Conectar los nodos de un sistema distribuido de la manera más eficiente posible.
- Bioinformática: Analizar las relaciones entre genes o proteínas en una red biológica.

Existen diversos algoritmos para resolver el árbol de peso mínimo, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Algunos de los algoritmos más conocidos son (Aquino Dominguez (2018)) [7]:

- Algoritmo de Prim: Este algoritmo comienza con un nodo arbitrario y va agregando aristas sucesivamente de menor peso hasta que se conecta toda la red.
- Algoritmo de Kruskal: Este algoritmo ordena las aristas por su peso y las va agregando sucesivamente al árbol hasta que se conecta toda la red, evitando ciclos.
- Algoritmo de Dijkstra: Este algoritmo es similar al algoritmo de Prim, pero utiliza una cola de prioridad para seleccionar la siguiente arista a agregar.

En nuestro caso, utilizamos el algoritmo de Dijkstra, así que procederemos a describirlo. Salas, A. (2008) señalan que un dígrafo es una pareja $\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E})$, en donde $\boldsymbol{V}$ es un conjunto y $\boldsymbol{E}$ es una relación binaria irreflexiva sobre $\boldsymbol{V}$, es decir, un subconjunto de $\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{V}$ tal que $(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}) \in / \boldsymbol{E}$ para todo $\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{E}$. Decimos que $\boldsymbol{V}$ es el conjunto de vértices y que $\boldsymbol{E}$ es el conjunto de aristas (eng. Edges). En los sucesivo supondremos que $\boldsymbol{V}$ es finito. Dada una arista $(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v})$, decimos que los vértices $\boldsymbol{u}$ y $\boldsymbol{v}$ son adyacentes y que la arista es incidente en ellos $(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v})$. Se llama camino de $\boldsymbol{U}$ a $\boldsymbol{v}$, denotado por $\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}$, a toda sucesión finita de vértices [9]

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{x_1}, \ldots \boldsymbol{x_i}, \boldsymbol{x_{i+1}}, \ldots, \boldsymbol{x_{m-1}}, \boldsymbol{x_m} = \boldsymbol{v}, \quad (\mathbf{1})$$

De modo que $(\boldsymbol{x_i}, \boldsymbol{x_{i+1}})$ es una arista para cada $\boldsymbol{i} = \mathbf{0}, \mathbf{1}, \ldots, \boldsymbol{m} - \mathbf{1}$. Sea $\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E})$ un dígrafo ponderado con pesos positivos de n vértices. Supongamos que $\boldsymbol{A}$ y $\boldsymbol{Z}$ Son dos vértices en $\boldsymbol{V}$, de modo que $\boldsymbol{z_6} = \boldsymbol{a}$ y existe al menos un camino de $\boldsymbol{a} - \boldsymbol{z}$. Nuestro principal objetivo consiste en hallar un camino $\boldsymbol{a} - \boldsymbol{z}$ de coste mínimo. Este problema se resuelve de manera eficiente mediante el algoritmo de Dijkstra. El algoritmo inicia en el vértice a y construye un camino de coste mínimo $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{u_0}, \boldsymbol{u_1}, \ldots \boldsymbol{u_{m-1}}, \boldsymbol{u_m} = \boldsymbol{Z}$, Tal que $\boldsymbol{a} - \boldsymbol{u_i}$ es un camino de coste mínimo para cada $\boldsymbol{i} = \mathbf{0}, \mathbf{1}, \ldots, \boldsymbol{m}$. [9]

Networkx

NetworkX es un paquete de Python diseñado para la creación, manipulación y estudio de la estructura, dinámica y funciones de redes complejas. Proporciona clases para representar varios tipos de redes y una implementación de muchos de los algoritmos utilizados en la ciencia de redes. NetworkX es relativamente fácil de instalar y usar, y ofrece una gran cantidad de funcionalidades integradas, lo que lo hace ideal para aprender sobre la ciencia de redes y realizar análisis en redes pequeñas o medianas. Este paquete incluye estructuras de datos para gráficos, dígrafos y multígrafos, así como muchos algoritmos gráficos estándar [10]. Además, permite la generación de gráficos clásicos, gráficos aleatorios y redes sintéticas. Los nodos en NetworkX pueden ser de cualquier tipo, como texto, imágenes o registros XML, y los bordes pueden contener datos arbitrarios,

como pesos o series de tiempo. NetworkX se distribuye bajo la licencia BSD de código abierto de 3 cláusulas, y está bien probado con más del 90% de cobertura de código. Para la creación de este trabajo se diseñó un código usando Netwrokx y el algoritmo de Dijkstra

PARTE EXPERIMENTAL

Para identificar un plan de evacuación para los poblados afectados ante una potencial erupción del volcán Nevado de Toluca, partimos del mapa de riesgos volcánicos generado por Aceves-Quesada et al. (2006). En dicho mapa, los autores identifican cuatro niveles de riesgo, que van de muy alto a bajo. Basándonos en este mapa y en los poblados identificados, generamos una red con las siguientes consideraciones.

- Agrupación de poblaciones: Se agruparon los poblados que se encontraban a menos de 5 km de distancia entre sí y que no tenían acceso directo a una carretera principal. Estos grupos se denominaron 3N, 4N, etc., y se consideraron como nodos en la red.
- Nodos en intersecciones: Las intersecciones de las carreteras se consideraron como nodos adicionales para utilizar el algoritmo de Dijkstra. Estos nodos se identificaron con letras del abecedario.
- Carreteras como enlaces: Las carreteras principales se consideraron como enlaces que conectan los nodos entre sí.

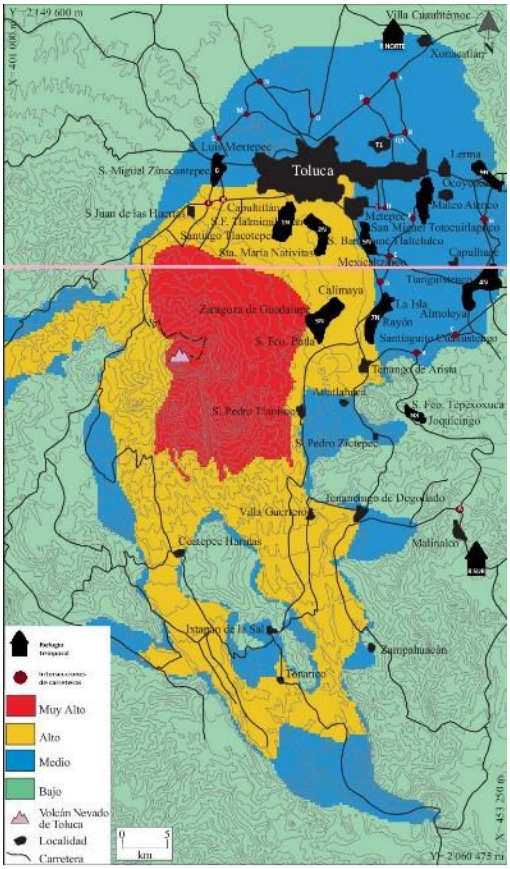


Figura 1. Mapa de riesgos volcánicos modificado de Aceves-Quesada et al. (2006) [3], destacando los refugios, los nodos en las intersecciones de carreteras, y la división en dos regiones: norte y sur, esta señalada con la línea horizontal rosa. Los colores indican el nivel de riesgo volcánico.

Dado que el radio de la zona de alto riesgo abarca más de 35 km, se propuso dividir el mapa en dos zonas, una norte y otra sur, para evitar que alguna población se acercara al volcán en su ruta de

evacuación. Como se muestra en la Figura 1, que es una modificación del mapa de Aceves-Quesada et al. (2006), la línea rosa indica nuestra división en las regiones norte y sur. Con esta división, propusimos tener un refugio en cada región: Villa Cuauhtémoc para la zona norte y Malinalco para la zona sur.

En la creación de nuestra red dirigida, encontramos la problemática de los poblados de Tonatico, Ixtapan de la Sal y Coatepec Harina. Debido a su ubicación y la gran distancia que tendrían que recorrer para llegar al refugio sur, decidimos omitir estos poblados de la red principal. Se considera que se deberá crear una alternativa específica para la evacuación de estos tres poblados.

Mediante un código de Python que utiliza las librerías NetworkX y Pandas (para el manejo de bases de datos), se creó un script que lee un archivo CSV donde se guarda la información sobre la dirección de los enlaces que conectan a los poblados. Este script se ejecuta de forma separada para cada región (norte y sur) y convierte la información en un grafo. Una vez cargada la base de datos como un grafo con NetworkX, se le pregunta al usuario desde qué punto desea partir (poblado a evacuar) y a qué nodo desea llegar (el refugio).

Dado que en caso de un desastre volcánico es probable que algunas carreteras o vialidades sufran daños, se decidió que el código permitiría eliminar un poblado seleccionado por el usuario para proporcionar una ruta de evacuación alternativa en caso de que dicho poblado sea una vía directa.

Una vez que se selecciona el poblado a eliminar de la red, el código aplica el algoritmo de Dijkstra y proporciona la lista de poblados que se deben recorrer para llegar al refugio, así como la longitud de dicho camino. Esta ruta es la más corta entre el poblado a evacuar y el refugio.

RESULTADOS

Una vez generada nuestra red dirigida y almacenada en un archivo CSV, se procedió a ejecutarla con el código anteriormente descrito. Para verificar que la red fuera conexa, el código generó el grafo correspondiente, como se muestra en la Figura 2.

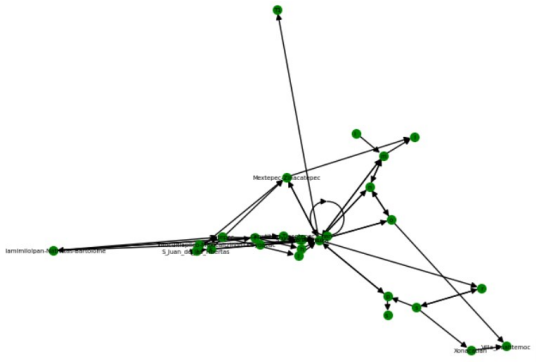


Figura 2. Grafo correspondiente a la región Norte.

El código nos pregunta sobre los poblados de salida y de llegada, así como el nodo que deseamos eliminar considerando un potencial corte en la vialidad que conecta a este. Figura 3.

```
Ingrese el nodo de origen: Tenango_de_Arista
Ingrese el nodo de destino: Malinalco
Ingrese el nodo a eliminar: Texpexoxuca-Joquicingo
```

Figura 3. El código solicitando el nodo de origen (población a evacuar) el nodo destino (refugio) y el nodo a eliminar (corte en la conexión)

Con esto, el código aplicaba el algoritmo de Dijkstra en la nueva red que omitía el nodo eliminado y nos proporcionaba el camino más corto para la evacuación en forma de lista. Para ejemplificar la capacidad del código de proporcionar dicho camino, veamos el resultado al evacuar el poblado de Tenango de Arista, que se encuentra en la región sur, por lo que debe dirigirse al refugio de Malinalco, asignado como el nodo destino.

Suponiendo un problema vial que corta la conexión con Texpexoxuca y Joquicingo, que según nuestros criterios se consideraron como un único nodo, el código nos propone la siguiente ruta:

'Tenango_de_Arista', 'Atlatlahuca', 'S_Pedro_Zictepec', 'Tenancingo_de_Degollado', 'a', 'Malinalco'

Es decir, partimos de Tenango de Arista hacia el poblado de Atlatlahuca, de ahí al poblado de San Pedro Zictepec, luego continuamos a Tenancingo de Degollado, después a la conexión denotada como "a", y finalmente llegamos a Malinalco. De esta manera, el poblado evacuado recorre el camino más corto, que mide 43.40 km. El resultado tal como lo arroja el código se muestra en la Figura 4.

```
Ingrese el nodo de origen: Tenango_de_Arista
Ingrese el nodo de destino: Malinalco
Ingrese el nodo a eliminar: Texpexoxuca-Joquicingo
Nodo Texpexoxuca-Joquicingo eliminado del grafo.
El camino más corto desde el nodo Tenango_de_Arista al nodo Malinalco es: ['Tenango_de_Arista', 'Atlatlahuca', 'S_Pedro_Zictepec', 'Tenancingo_de_Degollado', 'a', 'Malinalco']
La distancia del camino más corto es: 43.400000000000006
```

Figura 4. Camino propuesto por el código al implementar el algoritmo de Dijkstra

Veamos en el mapa cual es dicho camino para identificar gráficamente la propuesta del código. Esto se observa en la figura 5. Donde con el tache naranja se señala la población omitida, En el circulo rojo la población a evacuar y las flechas rojas el camino propuesto.

Figura 5. Representación grafica del camino propuesto por nuestro código.

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la efectividad del uso de la teoría de redes y la implementación de algoritmos de rutas óptimas para la planificación de evacuaciones ante una posible erupción del volcán Nevado de Toluca. A través de la creación de una red dirigida basada en el mapa de riesgos volcánicos de Aceves-Quesada et al. (2006), se identificaron las rutas de evacuación más seguras para los poblados cercanos, minimizando la distancia y el riesgo de exposición a peligros volcánicos.

La división de la zona en dos regiones, norte y sur emerge como una estrategia clave que facilita la organización y el control efectivo de la evacuación ante una erupción del volcán Nevado de Toluca.

Esta división permite una gestión más eficiente de los recursos y una respuesta coordinada en caso de emergencia. La agrupación de poblaciones, basada en criterios de proximidad y accesibilidad, se revela como una medida efectiva para reducir la complejidad del modelo de evacuación. La selección estratégica de nodos y refugios es de vital importancia para optimizar el tiempo y la distancia de evacuación. Así como el uso de una red dirigida permite al código poner el camino más corto y seguro.

Es recomendable incorporar al modelo factores adicionales, como la capacidad de las vías de evacuación y la disponibilidad de recursos, para mejorar su precisión y utilidad en situaciones de crisis. Considerar estos factores permitiría una planificación más realista y adaptable a diferentes contextos y escenarios de riesgo. Se propone desarrollar un sistema de información geográfica (SIG) que integre el modelo de evacuación con datos geográficos y demográficos de la zona. Esta integración facilitaría la visualización y el análisis de la información relevante para la toma de decisiones en situaciones de emergencia, mejorando la capacidad de respuesta y la coordinación entre las autoridades y organismos de protección civil.

Este trabajo representa un avance en el desarrollo de herramientas y estrategias para la planificación y ejecución de planes de evacuación ante emergencias volcánicas en la zona del Nevado de Toluca. Se espera que los resultados obtenidos sean de utilidad para las autoridades y organizaciones responsables de la protección civil, contribuyendo a mejorar la seguridad y el bienestar de la población en riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

1. D'Antonio, M., Capra, L., Sarocchi, D., & Bellotti, F. (2008). Reconstrucción del evento eruptivo asociado al emplazamiento del flujo piroclástico El Refugio hace 13 ka, volcán Nevado de Toluca (México). Revista mexicana de ciencias geológicas, 25(1), 115-134.
2. Weber, G., Caricchi, L., Arce, J. L., & Schmitt, A. K. (2020). Determining the current size and state of subvolcanic magma reservoirs. Nature communications, 11(1), 5477.
3. Aceves-Quesada, F., López-Blanco, J., & Martin del Pozzo, A. L. (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. Revista mexicana de ciencias geológicas, 23(2), 113-124.
4. Reckziegel, F., Arango Palacios, E., & Viramonte, J. (2019). Ceniza volcánica: dispersión y caída. Impactos, riesgos y mitigación. Temas de Biología y Geología del NOA, 9(3), 72-83.
5. López-Ruiz, J., & Cebriá, J. M. (2007). Procesos y riesgos volcánicos. Estudios Geológicos, 63(2), 41-65.
6. Caparrini, F. S. (2020). Una metodología desde la teoría de redes para las redes culturales. Universitas Humanística, 90. https://doi.org/10.11144/Javeriana.uh90.mtrr
7. Aquino Dominguez, J. R. (2018). Reducción de costos en las instalaciones de redes eléctricas usando árboles de expansión mínima en una edificación de la región Áncash–2018.
8. Legrá Quintero, A. (2009). Sistema informático para la solución de Problemas de Árbol de Expansión Mínima (Doctoral dissertation, Departamento de Informática).
9. Salas, A. (2008). Acerca del algoritmo de dijkstra. arXiv preprint arXiv:0810.0075.
10. Platt, E. L. (2019). Network science with Python and NetworkX quick start guide: explore and visualize network data effectively. Packt Publishing Ltd.

LA ENSEÑANZA STEAM Y LA COMPRENSIÓN DE SÓLIDOS DE REVOLUCIÓN EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA EN METAL MECÁNICA

Manuel Arciga Vargas[1], Rafael Pantoja Rangel[2]

[1]Universidad Tecnologica de la Costa Grande de Guerrero, [2]Ciencia Exactas e Ingeniería; Universidad de Guadalajara
m_arciga@utcgg.edu.mx, rafael.prangel@academicos.udg.mx.

RESUMEN

La propuesta didáctica se relaciona con la comprensión matemática del cálculo de volúmenes de sólidos de revolución, a partir de los datos obtenidos de la fotografía digital con una medida real incluida. La investigación se desarrolló en la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero en los programas educativos de Ingeniería en Metal Mecánica del cuarto cuatrimestre. Las actividades se ejecutaron en modo hibrido en la plataforma CANVAS apoyadas con videos explicativos, el GeoGebra, Tracker y UltiMaker Cura con base en los resultados, se concluye que lograron interpretar los datos, gráficas y funciones ajustadas al contorno de botella de uso comercial (500 y 600 ml).

INTRODUCCIÓN

La propuesta consistió en relacionar la comprensión matemática del empleo de los acercamientos numérico, gráfico y analítico con la obtención del volumen de solidos de revolución en botellas de uso común (500 y 600 ml) utilizando herramientas tecnológicas como GeoGebra, Tracker y la impresión 3D para analizar y evaluar la capacidad practica de los estudiantes del objeto matemático, mediante la presentación de proyectos que involucren el diseño y la creación de objetos tridimensionales con aplicación en su área de formación. El estudio se realizó con alumnos del cuarto cuatrimestre de Ingeniería Metal Mecánica en la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero (UTCGG), en la hoja de asignatura de Cálculo Integral incluye el tema de Solidos de Revolución, en la que se incluye explicar la construcción y el cálculo de volumen de solido de revolución con software, área en la que se ubica la situación problema de la vida cotidiana (Arrieta & Díaz, 2015; Pantoja et al., 2016) tratada en la investigación.

ELEMENTOS TEÓRICOS O CONCEPTUALES

El Enfoque Ontosemiótico del Conocimiento y la Instrucción Matemática (EOS) fue el sustento teórico de la investigación (Godino, 2002), relacionando la situación problema con los seis objetos matemáticos primarios presentes en la actividad matemática: la situación problema, el lenguaje, los conceptos, sus propiedades, los procedimientos y argumentos. Cada uno de estos objetos se identificaron durante la fase experimental y se discutieron en el análisis de los resultados del estudio, por ejemplo, en cuanto al lenguaje empleado es de los objetos primarios más importantes, en el que se distinguen el algebraico para la manipulación de expresiones simbólicas, el gráfico para representaciones geométricas, numérico para el tratamiento de los datos, verbal con el cual el alumno describe en términos propios el trabajo matemático que lleva a cabo y el escrito referenciado en los reportes. Se realizó una investigación cualitativa, pues se estudiaron principalmente los procesos de aprendizaje en la interacción y experiencia de los alumnos durante el desarrollo de las actividades propuestas, la motivación al trabajar con una situación problema del contexto de la vida cotidiana, en el que lograron identificar la relación existente entre los datos recopilados con los programas GeoGebra, Tracker, UltiMaker Cura y el objeto matemático.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

El proceso de construcción y transformación desde el EOS, involucra actividades conocidas como registros, tratamiento y conversión, que emergen y que se trabajan al desarrollar las acciones planteadas para cada uno de los ejemplos involucrados.
Los registros identificados:

- Registro analítico. La determinación de las funciones ajustadas a los datos.
- Registro visual. La fotografía o el video del objeto de la vida cotidiana.
- Registro gráfico. Las diferentes gráficas representativas de la situación problema.
- Registro escrito. Las respuestas al cuaderno de trabajo, el informe de la puesta en
- escena y la elaboración de la presentación.
- Registro verbal. Discusión cuando realizan las actividades y la presentación de sus
- resultados ante el grupo.

Los procesos de conversión y tratamiento, que se espera emerjan del trabajo de los alumnos con los ejemplos que se tratan en el taller, durante la puesta en escena son:

- Gráfica-Analítica. Al determinar la ecuación que modela la situación problema a
- partir de la gráfica mostrada en la pantalla del Tracker.
- Gráfica-Numérica. Cuando marcan la forma gráfica sobre la pantalla del
- computador para obtener la tabla de coordenadas (x, y).
- Analítica-Gráfica. Al trazar la gráfica asociada a la ecuación.
- Verbal-Escrita. En la discusión verbal en el equipo y la elaboración del informe.
- Escrito-Verbal. Mediante la elaboración del informe y presentación ante el grupo.
- Las distintas gráficas que se obtienen con el Tracker y GeoGebra.
- La transformación de las funciones que se ajustan a los datos obtenidos con el
- Tracker y GeoGebra.

La actividad 1 fue tomar la fotografía de una botella con una medida real incluida e iniciar la toma de datos, que se grabaron en un archivo, se exportaron a GeoGebra y se graficaron. Posteriormente se pidió a los estudiantes de manera individual y colaborativa que analizarán la gráfica (Figura 1). De inicio tuvieron problemas en relacionar la gráfica obtenida con el contorno de la botella, pues la primera acción fue trata de ajustar un polinomio a los datos, sin tomar en consideración del extremo superior (tapa) e inferior de la botella o recipiente.

La actividad 2 es ejecutar el programa Tracker e incluir el video o la fotografía para ser procesada como se indica:

a. Abrir Tracker y para integrar un video son dos las opciones: a) seleccionar ***Archivo*** ➔ ***Abrir*** y b) ***video*** ➔ ***Importar***. Una vez ubicado el video, se procede manipular el ***deslizador de tiempo*** para seleccionar la parte del video de interés para analizar. Con la opción ***Ajustes del Corte*** (Clic botón derecho sobre el video), el usuario selecciona cada cuántos cuadros se marcan los puntos.

b. La unidad de medida que se incluyó en el video o fotografía se empareja en el Tracker con la rutina ***Vara de Calibración***: ***Trayectoria*** ➔ ***Nuevo*** ➔ ***Calibration Tools*** ➔ ***Vara de Calibración***.

c. La ubicación del plano cartesiano queda a criterio del usuario, quien selecciona la posición para colocar los ***ejes de coordenadas***.

d. El objeto en movimiento o fijo, se reconoce como ***Masa Puntual*** en el Tracker y para activarlo las instrucciones son: ***Trayectorias*** ➔ ***Nuevo*** ➔ ***Masa Puntual.***

e. Por último, se marcan las coordenadas de la trayectoria del movimiento mediante la combinación de teclas ***Shift+Clic*** tantas veces como de haya programado en la rutina de ajuste del corte.

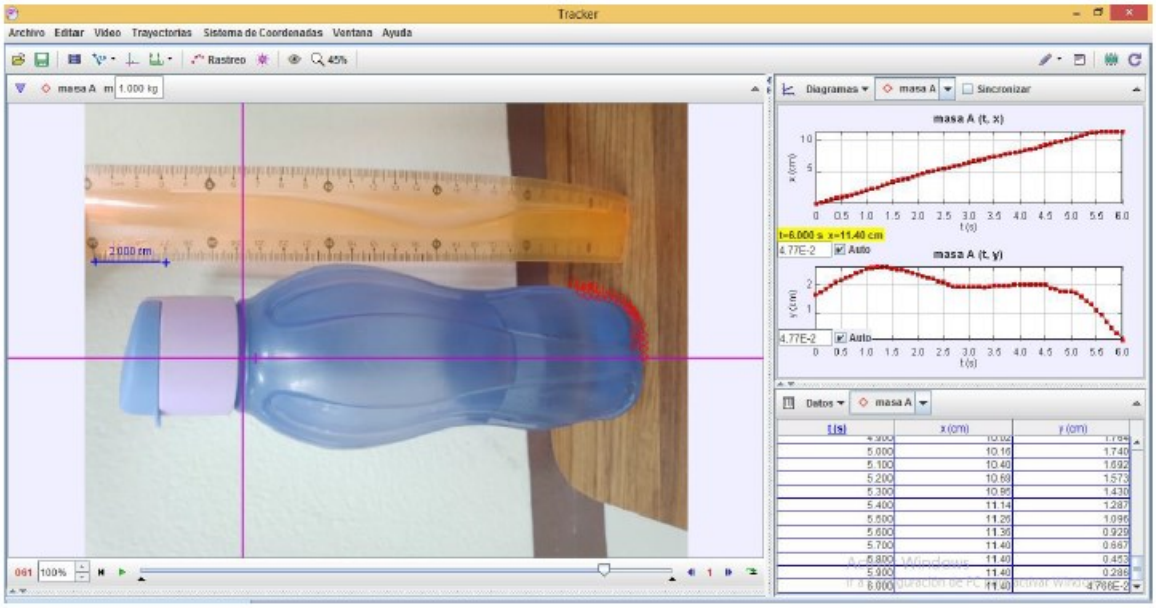


Figura 1: Matematización de la botella con el programa Tracker.

La actividad 3 corresponde al empleo del software GeoGebra para ajustar las funciones al conjunto de coordenadas calculadas con el Tracker, por ejemplo, para aproximar la longitud de arco del borde de la botella (Figura 3), como se describe a continuación:

a. **Abrir GeoGebra.** Al abrir GeoGebra aparece la ventana principal con una Vista Algebraica y una Vista Gráfica.
b. **Insertar datos numéricos en GeoGebra.** Se abre una Hoja de Cálculo en GeoGebra y se insertan los datos numéricos calculados con el Tracker.
c. **Análisis de Regresión de dos variables.** De acuerdo a la forma en que están ordenados los puntos se busca la gráfica de una función que más se aproxime.
d. Si se quiere que GeoGebra solo muestre la parte de la curva que corresponde a la longitud del pasamanos, se emplea el comando Función.
e. Se emplean las rutinas de Derivadas e Integrales para determinar la longitud de arco.

Luego de trabajar con los tratamientos numéricos, gráficos y analítico del objeto o datos en dos dimensiones, los estudiantes mostraron interés y motivación para crear modelos tridimensionales. Para esto se trabajó de la siguiente manera: A) combinando los datos obtenido de la fotografía mediado por el Tracker y GeoGebra en modelos bidimensionales. B) Rotando Funciones. C) Usando el comando “Spline” (Figura 2).

Por último, que tenemos finalizado el objeto para imprimir para la representación tridimensional debemos hacer clic en *Menú➔Archivo➔Descargar como➔STL* (esto puede variar un poco dependiendo de la versión de GeoGebra que se use; Se recomienda la versión GeoGebra classic 6 online.) Luego dependerá de su impresora y de qué programa utiliza para preparar el archivo que será impreso (uno de los más usados por ser libre y gratuito es UltiMaker Cura).

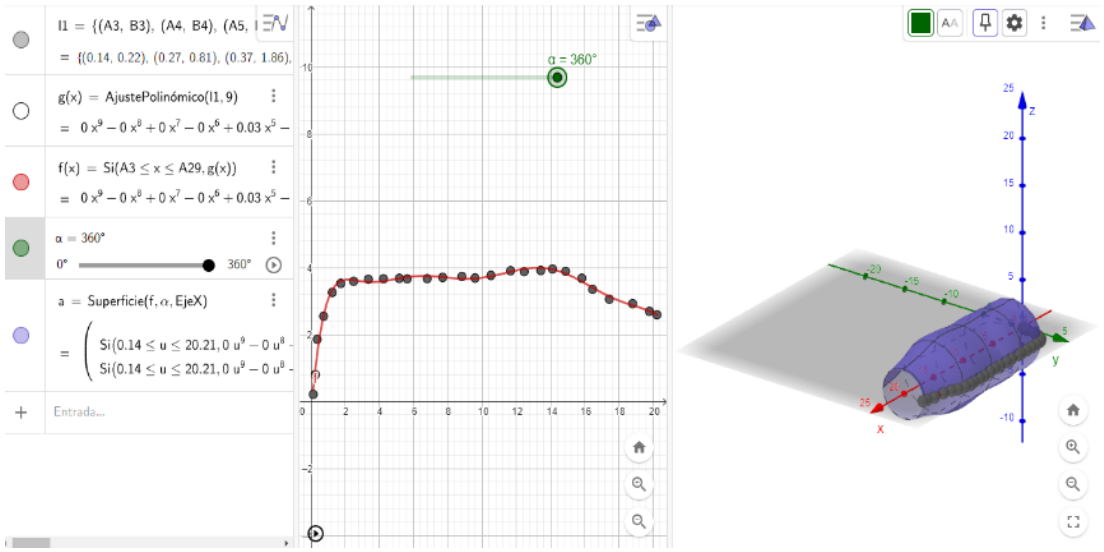


Figura 2: Ejemplo botella.

CONCLUSIONES

Se han diseñado estas actividades con el propósito de motivar al profesor a emplear este tipo de situaciones problema en el aula, y al estudiante, a motivar el aprendizaje de las matemáticas en un entorno cotidiano, en el que se involucre en un ambiente de aprendizaje adecuado con las TIC, con trabajo individual y colaborativo, en el que tome la iniciativa y sea el responsable de lograr un aprendizaje significativo, que se espera emerja una vez desarrollada la secuencia didáctica.

El trabajo colaborativo será una estrategia que se espera favorezca y fomente la habilidad para tomar decisiones y que surja la argumentación la cual es uno de los objetos emergentes que son una piedra angular para lograr el aprendizaje y comprensión de los diversos temas de matemáticas incluidos en los ejemplos.

De la misma forma se espera que el empleo de la tecnología sea un gran estimulante para los alumnos al facilitar la interpretación de datos obtenidos a partir de las situaciones cotidianas, como su sustento que le permite construir su conocimiento y reflexionar sobre los procedimientos usados, así como de ser consciente sobre las variables y los parámetros que intervienen en las situaciones reales y que son importantes para el logro de la comprensión del concepto matemático y su aplicación en el entorno de su vida cotidiana.

REFERENCIAS

1. Arrieta, J., Díaz, L. (2015). Una perspectiva de la modelación desde la socioepistemología. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, 18(1), 19-48.*
2. Godino, J. (2002). Un Enfoque Ontológico y Semiótico de la Cognición Matemática. *Recherches en Didactique des Mathématiques, 22.* Recuperado de:http://www.ugr.es/~jgodino/funcionessemioticas/04_enfoque_ontosemiotico.pdf
3. Pantoja, R. Guerrero, L., Ulloa, R. Nesterova, E. (2016*). Modeling in problem situations of daily life. Journal of Education and Human Development, 5*(1),62 76. Recuperado de http://jehdnet.com/

SISTEMA DE SEGMENTACIÓN AUTOMÁTICO DE MENINGIOMAS CEREBRALES BASADO EN IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Gerardo Trejo Caballero [1], Andrea Cázares Tafoya [2], Lizeth Alejandra Hernández Rodríguez [3], Marcos Jesús Villaseñor Aguilar[1], Miroslava Cano Lara[1]

[1]TecNM / ITS de Irapuato, [2]Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, [3]TecNM / IT de Tepic.
gerardo.tc@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Un meningioma cerebral es un tumor intracraneal que se desarrolla en las meninges y puede provocar síntomas y complicaciones graves. Los meningiomas cerebrales se clasifican principalmente de acuerdo a su grado de malignidad y ubicación anatómica. El diagnóstico y tratamiento oportuno dependen de la correcta clasificación, para lo cual es fundamental la segmentación precisa del meningioma sobre imágenes médicas como la resonancia magnética. La segmentación manual de los meningiomas es un proceso laborioso sujeto a errores que pueden derivar en resultados inexactos y/o retrasos en el diagnóstico y tratamiento. En este contexto, se presenta un sistema de segmentación automático de meningiomas basado en Inteligencia Artificial integrado en una interfaz gráfica de usuario bajo el entorno de MATLAB® App Designer. El sistema se ha probado sobre imágenes de una base de datos estándar y los resultados muestran su potencial utilidad como una herramienta para asistir al especialista de la salud en la elaboración oportuna de diagnósticos y tratamientos de pacientes con tumores cerebrales de tipo meningioma.

INTRODUCCIÓN

Un meningioma es un tumor intracraneal común que se desarrolla en las meninges, las membranas que rodean el cerebro y la médula espinal. Aunque son generalmente benignos, pueden crecer y ejercer presión sobre el cerebro, lo que puede provocar síntomas y complicaciones graves (Wiemels et al., 2010). El meningioma representa un poco más de un tercio de todos los tumores del sistema nervioso central. Los meningiomas cerebrales se clasifican principalmente según su grado de malignidad y su ubicación anatómica en el cerebro. La clasificación más común se basa en la escala de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que categoriza los meningiomas según su severidad como: benignos, atípicos y malignos o anaplásicos.

Los meningiomas benignos o de Grado I, constituyen la mayoría de los meningiomas y son generalmente de crecimiento lento. Suelen ser curables con cirugía y tienen un pronóstico favorable. Los meningiomas atípicos o de Grado II, tienen características anormales que los hacen un poco más agresivos que los benignos. Pueden requerir un tratamiento más agresivo y tienen un pronóstico menos favorable que los anteriores. Finalmente, los meningiomas malignos (anaplásicos) o de Grado III, son los más raros pero también los más agresivos. Tienen una alta tasa de crecimiento y son difíciles de tratar. El pronóstico suele ser menos favorable y a menudo se requiere un tratamiento muy agresivo. Un diagnóstico temprano del meningioma, además de una correcta clasificación de la severidad del tumor o malignidad, resulta vital en un mejor manejo del plan de tratamiento del paciente (Alruwaili, 2022).

Para clasificar el grado de severidad o malignidad de los meningiomas, resulta primordial determinar de forma precisa las variaciones en la forma, tamaño y apariencia. Para ello, resulta necesario delinear con precisión el contorno del tumor sobre las imágenes de resonancia magnética, es decir, segmentarlo. La segmentación manual de tumores, resulta ser un proceso demandante que conlleva un considerable tiempo y que a menudo está sujeto a errores que en ocasiones derivan en diagnósticos tardíos e imprecisos, y/o retrasos en el tratamiento. En este contexto, resulta de interés desarrollar un sistema de segmentación automático capaz de detectar y delinear con precisión los meningiomas en imágenes de resonancia magnética (MRI) del cerebro. Este sistema supondría una herramienta para asistir al especialista de la salud en la elaboración oportuna de diagnósticos y tratamientos de pacientes con tumores cerebrales de tipo meningioma.

TEORÍA

Una imagen en espacio de color RGB se puede describir como una matriz tridimensional donde cada píxel tiene un valor de intensidad para cada una de las componentes de color. El espacio de color RGB se basa en la mezcla aditiva de tres colores primarios: rojo (R), verde (G) y azul (B). En el campo de las imágenes médicas, como las resonancias magnéticas (MRI) y las tomografías computarizadas (CT), se capturan típicamente en escala de grises para resaltar contrastes en tejidos y estructuras internas, facilitando así el diagnóstico y análisis.

Las imágenes en espacio de color RGB se pueden transformar en imágenes en escala de grises mediante un método basado en la suma ponderada de las componentes de color (Ec. 1).

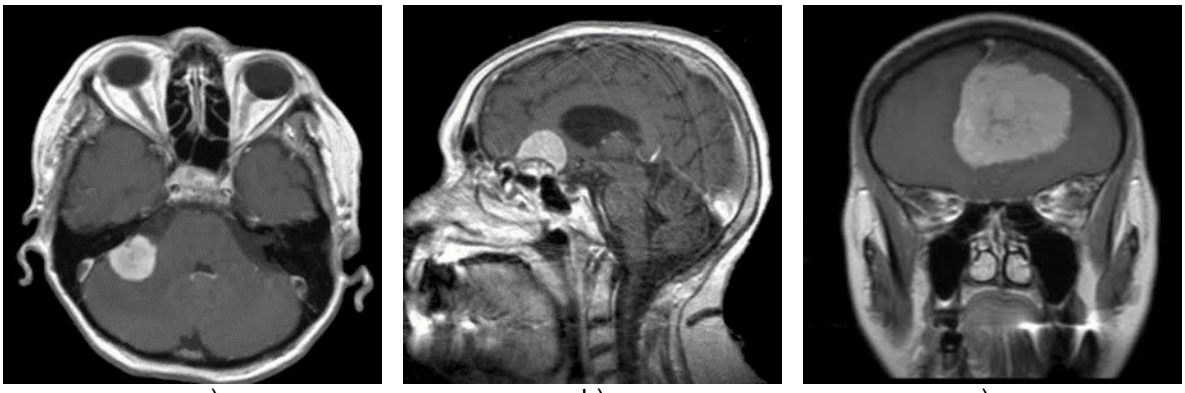
$$\boldsymbol{I = 0.299\,R + 0.587\,G + 0.114\,B} \qquad \text{Ec. 1}$$

Al usar coeficientes ponderados que reflejan la percepción humana del brillo, esta conversión asegura una representación precisa de la luminancia en las imágenes. La conversión del espacio de color RGB a escala de grises facilita la extracción de características y la implementación de algoritmos de análisis de imagen gracias a la disminución de la dimensionalidad de la información.

La ecualización de histograma es una técnica fundamental en el procesamiento de imágenes que se utiliza para mejorar el contraste de las imágenes. Esta técnica redistribuye los niveles de intensidad de los píxeles para que el histograma de la imagen resultante sea aproximadamente uniforme (Gonzalez, 2008). Este proceso es particularmente útil en imágenes con contraste limitado, donde los niveles de intensidad están agrupados en un rango estrecho.

La ecualización de histograma puede resaltar detalles ocultos y mejorar la calidad visual de la imagen, lo cual es crucial en diversas aplicaciones como la fotografía y la medicina, donde se mejora la calidad de imágenes médicas como las resonancias magnéticas y tomografías, permitiendo una mejor visualización de los detalles anatómicos.

METODOLOGÍA



a) b) c)

Figura 1. Imágenes de resonancias magnéticas cerebrales de pacientes con meningiomas confirmados: a) corte axial, b) corte sagital y c) corte coronal.

Se seleccionó un subconjunto de imágenes médicas de resonancia magnética de tumores cerebrales de la base de datos *Brain Tumor Classification* (Bhuvaji, 2020), específicamente un subconjunto de las imágenes de entrenamiento formado por un total de 30 MRI seleccionadas aleatoriamente de pacientes con meningiomas cerebrales confirmados, subconjunto que incluyó imágenes de diferentes cortes (axial, sagital y coronal), tal y como se ilustra en la Figura 1.

Las imágenes de la base de datos en espacio de color RGB, son transformadas para obtener imágenes en escala de grises, utilizando para ello un método basado en la suma ponderada de las componentes de color (Ec. 1). A continuación, las imágenes son pre-procesadas con el objetivo de eliminar ruido y mejorar la calidad de la imagen mediante el ajuste del brillo y el contraste utilizando la técnica de ecualización de histograma de frecuencias.

Enseguida, la imagen pre-procesada es binarizada con el objetivo de clasificar los pixeles en función de su intensidad como pixeles de información y pixeles de fondo, utilizando para ello el método de umbralización local de Otsu (Otsu, 1979), tal y como se aprecia en la Figura 2b. Después, los pixeles considerados como pixeles de información son etiquetados mediante un algoritmo identificación de regiones conexas basado en la conectividad de los pixeles o pixeles vecinos (8-vecinos). Estas regiones obtenidas son ordenadas de forma descendente utilizando como criterio de clasificación el momento de orden cero (área). Aquellas de mayor área son consideradas como las regiones de interés, ROI (ver Figura 2c).

A continuación, mediante Inteligencia Artificial (Ramesh et al., 2004), se calcula el momento de primer orden o centroide de cada una de las ROI. Específicamente se emplea la lógica difusa mediante un sistema de inferencia difuso tipo Mamdani de 2 entradas y 1 salida, la probabilidad de que una ROI sea clasificada como meningioma en función de la ubicación espacial de su centroide con respecto a sí misma, y de su ubicación espacial con respecto a la imagen. La ROI que obtenga el mayor valor es clasificada como meningioma y es segmentada del resto de las ROI como se muestra en la Figura 3a.

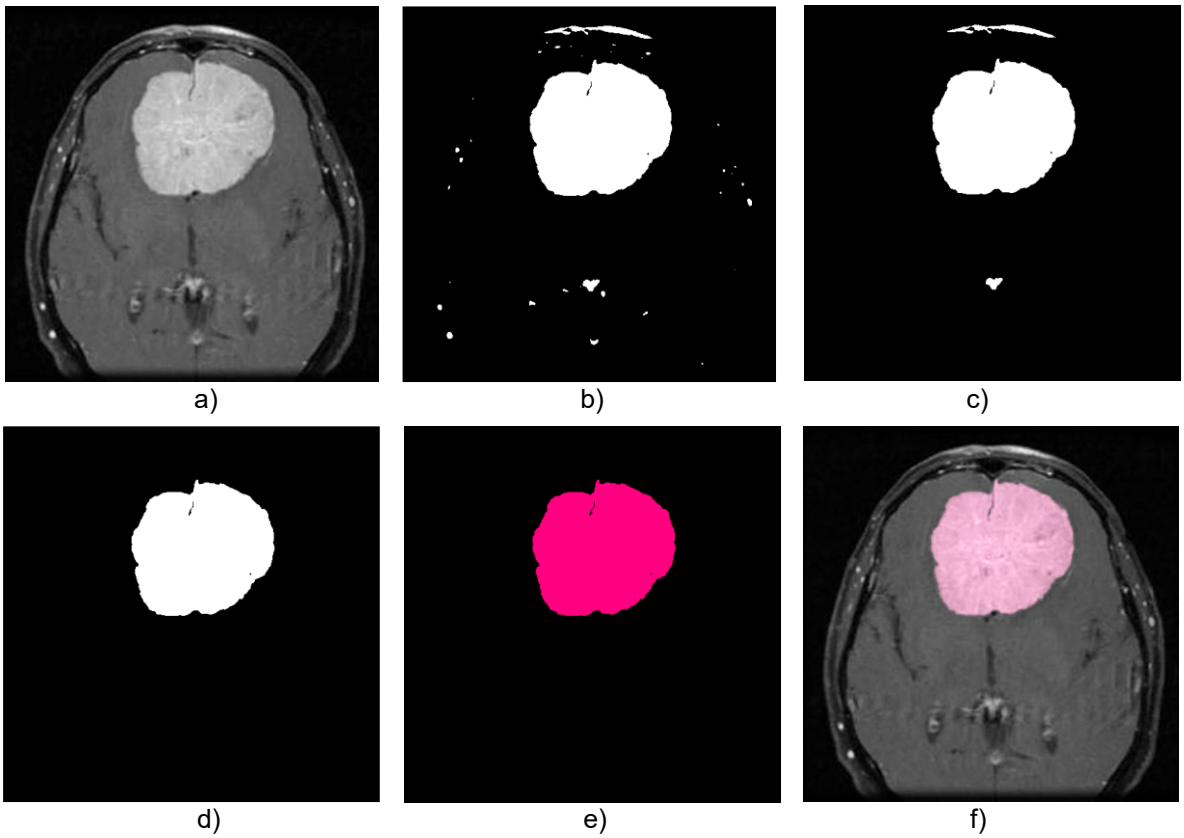


Figura 2. Etapas del procesamiento: a) MRI con mejora de contraste, b) imagen binarizada mediante Otsu, c) selección de ROI's, d) clasificación de región como tumor,
f) segmentación con pseudocolor, f) fusión de MRI y tumor segmentado.

RESULTADOS

El sistema de segmentación descrito se ha evaluado sobre el subconjunto de imágenes de prueba de la base de datos *Brain Tumor Classification* conformada por 115 MRI de pacientes con meningiomas cerebrales confirmados. Los resultados obtenidos se ilustran de manera resumida en la gráfica de la Figura 3.

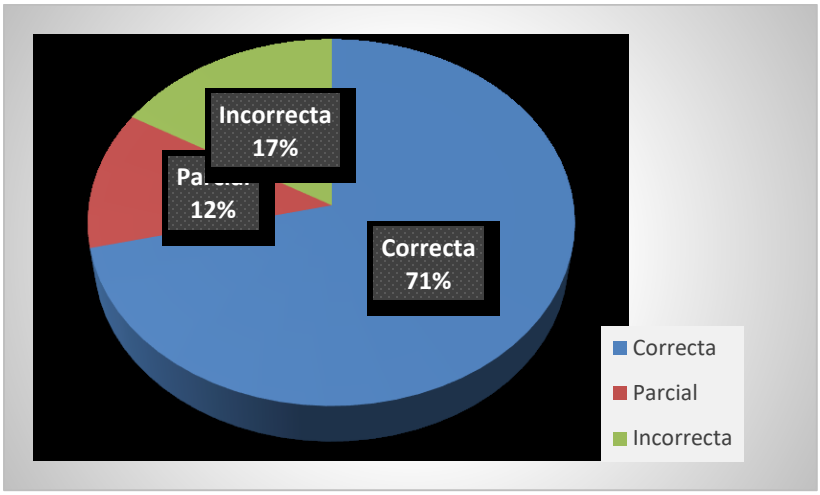


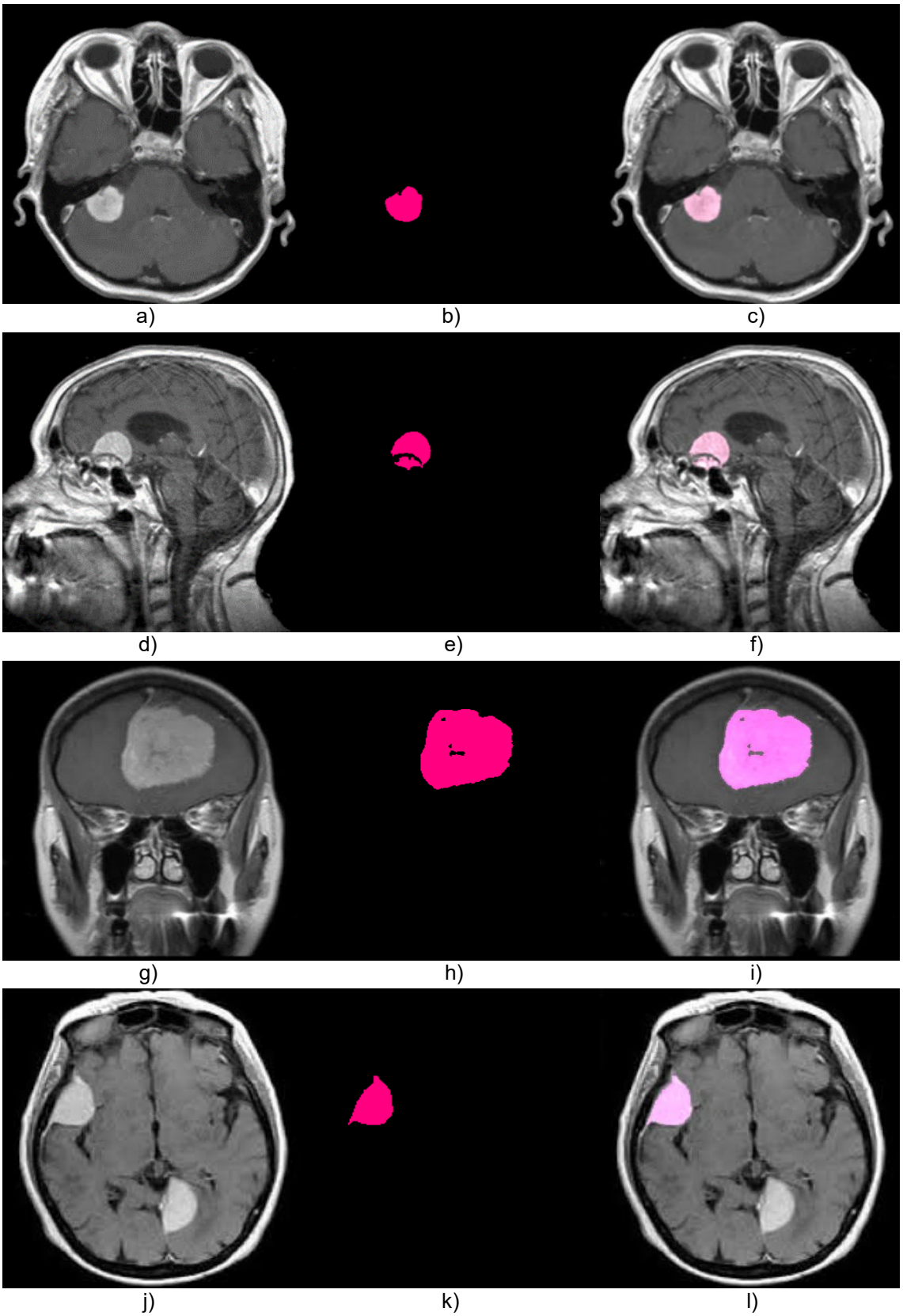
Figura 3. Desempeño del sistema de segmentación de meningiomas sobre el subconjunto 115 MRI de prueba de la base de datos.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha desarrollado y evaluado un sistema de segmentación automática de meningiomas cerebrales utilizando técnicas de Inteligencia Artificial, integrado en una interfaz gráfica de usuario en MATLAB® App Designer. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema propuesto es una herramienta prometedora para asistir a los especialistas de salud en el diagnóstico y tratamiento de meningiomas. La segmentación precisa y automática de meningiomas no solo reduce el tiempo y el esfuerzo necesarios en comparación con la segmentación manual, sino que también minimiza la posibilidad de errores humanos, mejorando así la precisión del diagnóstico.

El sistema se ha probado con éxito sobre imágenes de una base de datos estándar, mostrando su eficacia y potencial en un entorno clínico real. La integración en una interfaz gráfica de usuario facilita su adopción por parte de los profesionales médicos, permitiendo una interacción más intuitiva y rápida con las imágenes y los resultados de segmentación. Este avance tecnológico tiene el potencial de mejorar significativamente el manejo clínico de los pacientes con meningiomas, asegurando diagnósticos más rápidos y precisos, y facilitando la planificación de tratamientos más efectivos.

En conclusión, la implementación de sistemas de segmentación automática basados en Inteligencia Artificial representa un avance significativo en el campo del diagnóstico por imágenes, ofreciendo una herramienta valiosa que puede transformar la práctica clínica y mejorar los resultados de los pacientes. Futuras investigaciones y desarrollos podrían centrarse en la mejora continua del algoritmo de segmentación y su validación en conjuntos de datos más amplios y variados, así como en la integración con otros sistemas de diagnóstico y tratamiento médico.



a) b) c)

d) e) f)

g) h) i)

j) k) l)

Figura 4. Resultados obtenidos para 4 casos diferentes. Se muestran por renglón cada uno de los casos de izq. a der. respectivamente: IMR, tumor segmentado y fusión de las anteriores.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alruwaili AA, De Jesus O. Meningioma. In: StatPearls. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL); 2022. PMID: 32809373.
2. Sartaj Bhuvaji, Ankita Kadam, Prajakta Bhumkar, Sameer Dedge, and Swati Kanchan. (2020). Brain Tumor Classification (MRI) [Data set]. Kaggle. https://doi.org/10.34740/KAGGLE/DSV/1183165.
3. Ogasawara, C., Philbrick, B. D., & Adamson, D. C. (2021). Meningioma: A review of epidemiology, pathology, diagnosis, treatment, and future directions. In Biomedicines (Vol. 9, Issue 3). MDPI AG.
4. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 9(1), 62-66.
5. Ramesh, A. N., Kambhampati, C., Monson, J. R. T., & Drew, P. J. (2004). Artificial intelligence in medicine. In Annals of the Royal College of Surgeons of England (Vol. 86, Issue 5, pp. 334–338).
6. Wiemels, J., Wrensch, M., & Claus, E. B. (2010). Epidemiology and etiology of meningioma. In Journal of Neuro-Oncology (Vol. 99, Issue 3, pp. 307–314).
7. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). Digital Image Processing. Pearson Prentice Hall.

CARACTERIZACIÓN DE BARRAS DE ACERO ASTM A36 A PARTIR DE TÉCNICAS DE IMPACTO ACÚSTICO

Itzel Luviano Soto[1], Yajaira Concha Sánchez[2], Rodolfo Gaytán Rodríguez[3], Gabriel Arroyo Correa[4], José Vega Cabrera[5].

[1,2,3] Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. [4,5] Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UMSNH 1
itzel.luviano@umich.mx

RESUMEN

Dadas sus características mecánicas, el acero ASTM A36 es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, ya que este tipo de acero se utiliza en la fabricación de estructuras metálicas soldadas, atornilladas o bridadas en la construcción industrial y civil, así como de varillas corrugadas que son diseñadas especialmente para la construcción de elementos estructurales a base de concreto armado. Al ser un elemento industrial de suma importancia, este material cuenta con características de manufactura definidas que deben tenerse en cuenta para su correcta evaluación mecánica. Sin embargo, dado el constante aumento en el costo de este material es necesario la aplicación de técnicas no invasivas que permitan una correcta evaluación sin comprometer sus características mecánicas. Este trabajo tiene como finalidad el uso de técnicas de impacto acústico para la evaluación de la elasticidad de tracción y compresión del acero A36 mediante la prueba de tres diferentes tipos de varillas corrugadas: varillas 3949, varillas 3964 y varillas 3965, cuya variación radica principalmente en el tipo de sección transversal de cada barra. La determinación de módulo de elasticidad de estas barras de acero se obtiene a través de la frecuencia dominante del espectro de Fourier de la respuesta acústica al impacto. Dentro de los resultados obtenidos se muestra una buena correlación entre el módulo de elasticidad a partir de las pruebas de impacto acústico y la información reportada por la industria acerera para cada uno de los elementos bajo estudio, concluyendo que esta técnica no invasiva puede aplicarse como una alternativa a las técnicas destructivas que se utilizan actualmente para poder determinar el comportamiento mecánico del acero.

INTRODUCCIÓN

El acero A36, conocido comúnmente como el ASTM A36, es el acero laminado en caliente más comúnmente disponible, el cual típicamente se utiliza en varillas redondas, barras cuadradas, barras rectangulares, así como vigas tipo I, vigas con perfil H, ángulos y canalones. El acero dulce A36 es sumamente utilizado en la ingeniería dadas sus propiedades mecánicas, ya que este material ha demostrado buena respuesta a la tensión, flexión y torsión, siendo un elemento indispensable para la edificación [1].

Actualmente el análisis del rendimiento de estos componentes estructurales utilizados en la Ingeniería Civil se determina típicamente a través de ensayos destructivos, como la tracción, la resistencia a la fatiga, al impacto y a la fractura. Sin embargo, el lograr evaluar un material en servicio sin dañarlo como cortar muestras estructurales en funcionamiento es impráctico, por lo tanto, se requiere el uso de técnicas que permitan evaluar las propiedades mecánicas de los elementos que experimentan deformación y fractura sin comprometer la integridad de los elementos estructurales; para esto existen las Pruebas No Destructivas, NDT por sus siglas en ingles. Existen diversos NDT basados en diferentes principios físicos y matemáticos como son las pruebas electromagnéticas, microdureza o acústica que permiten estimar la degradación de las propiedades mecánicas de los elementos. Por lo anterior, este trabajo estudia una NDT basada en el comportamiento acústico del acero A36 para poder lograr caracterizar este material [2], mediante la prueba de tres diferentes tipos de varillas corrugadas: varillas 3949, varillas 3964 y varillas 3965, cuya variación radica principalmente en el tipo de sección transversal de cada barra.

TEORÍA

Las técnicas acústicas se basan en la propagación de ondas sonoras y de la frecuencia de las señales emitidas y detectadas. Para la mayoría de los métodos acústicos se mide el tiempo de propagación de impulsos, para algunos otros métodos la intensidad de la señal es la analizada [3]. Algunas de las NDT más utilizadas en el área ingenieril son los métodos de pulso ultrasonido, técnicas de eco-impacto (impacto acústico), emisión acústica, velocidad de pulso entre otras.

Las ondas sónicas están directamente relacionadas con el comportamiento mecánico de los materiales, por ello los métodos acústicos son muy utilizados como técnicas no destructivas.
Una de las técnicas no destructivas más antiguas es el test de impacto acústico (I.A.), esta metodología se ha implementado desde la antigüedad en su forma más sencilla, golpeando a un medio con un martillo o cualquier otro elemento que pueda generar una propagación de ondas, y dependiendo del resultado sonoro se puede hacer una evaluación del objeto [4].

El método de impacto acústico se basa en el análisis de frecuencia de respuesta de una estructura cuando se somete a un impacto y se ha demostrado que tiene una variación de ±3% respecto a los métodos destructivos, es por ello que sobre todo en Ingeniería Civil, es muy utilizado para caracterizar diversos materiales tales como el concreto, mortero, tabiques y otros materiales. Esta metodología es recomendada para el análisis de muestras con espesor pequeño [5].

El test de impacto acústico involucra realizar un análisis de la onda sonora, en el cual se determina un tiempo dado desde el inicio del impacto y como se propaga la onda en el medio a través de frecuencias.

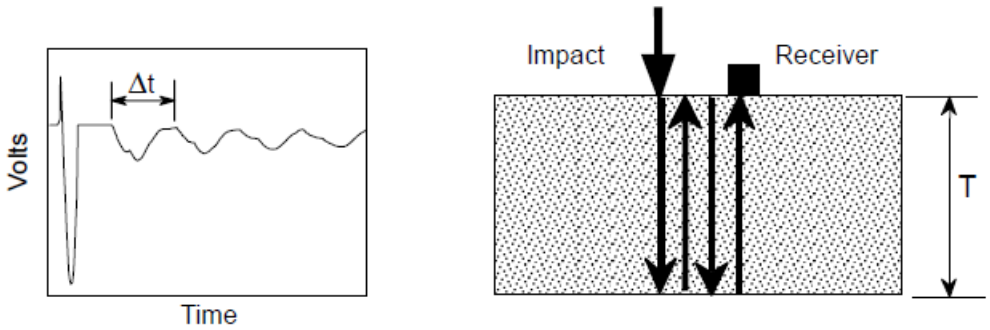


Figura 1. Principio de análisis de la frecuencia.

El principio de análisis por frecuencia se muestra en la Figura 1, en donde una onda “P” producida por el impacto sufre múltiples reflejos entre la superficie de la prueba y la interfaz reflectante, y cada vez que la onda “P” regresa a la superficie de prueba, provoca un desplazamiento característico, por lo tanto, la forma de onda tiene un patrón periódico que depende de la distancia de ida y vuelta de la onda “P”. Si el sensor receptor de onda está cerca del punto de impacto, la distancia de viaje de ida y vuelta es 2T, donde T es la distancia entre la superficie de prueba y la interfaz reflectante. Como se muestra en la Figura 1 el intervalo de tiempo entre llegadas sucesivas de la onda “P” reflejada de forma múltiple es la distancia del viaje dividida por la velocidad de onda, de esta forma, la frecuencia $\boldsymbol{f}$, de la llegada de la onda “P” es la inversa del intervalo de tiempo y está dada por la ecuación (1)

$$\boldsymbol{f = \frac{C_{pp}}{2T}} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde:
$\boldsymbol{Cpp}$ = la velocidad de la onda “P”
$\boldsymbol{T}$ = la profundidad o longitud de la interface reflectante.
La ecuación (1) permite determinar la frecuencia de la onda, sin embargo, es necesario realizar un análisis del espectro de amplitudes de la onda en donde el objetivo es determinar la frecuencia dominante de la onda registrada, este análisis se logra mediante el uso de la Transformada de Fourier para convertir la forma de la onda registrada a la frecuencia dominante.

La base matemática principal para la técnica de impacto acústico es la Transformada Rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés. La FFT descompone una señal en sus componentes espectrales individuales y así proporciona información sobre su composición.

PARTE EXPERIMENTAL

En este trabajo se analizó el acero A36 dulce mediante tres diferentes probetas de varillas de acero, cuya diferencia principal es el diámetro de cada una de ellas (Fig. 2); las varillas probadas fueron las varillas 3964, 3965 y 3949, utilizadas típicamente como material tensor de construcciones en casas habitación.

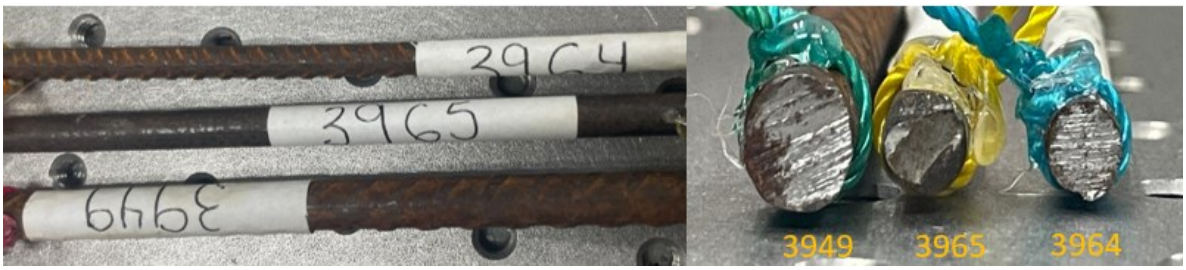


Figura 2. Acero A36 analizado por impacto acústico.

Estas barras de acero se probaron con técnicas de impacto acústico, en donde, por medio de una llave de acero se les golpeó, el registro sonoro se captó mediante dos sensores sónicos de la marca PASCO®, que a su vez se conectan a una tarjeta de adquisición de datos, la cual se conecta a una computadora y mediante el software DataStudio® se obtiene la respuesta al impacto en volts. Los sensores S1 y S2 son colocados en sentido transversal y longitudinal al impacto generado por la llave de acero (Fig. 3), este proceso se realizó en tres sesiones y posteriormente en cuatro sesiones para disminuir la propagación de errores.

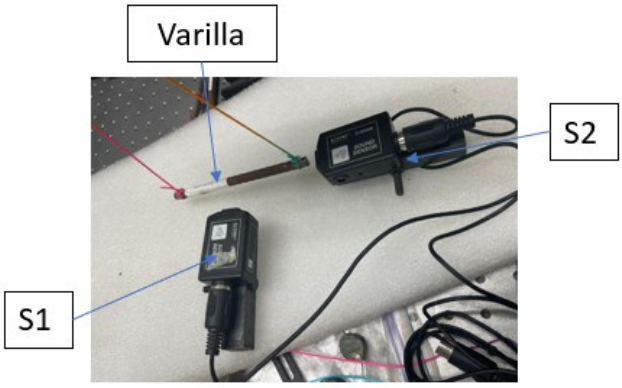


Figura 3. Arreglo experimental para impacto acústico.

La respuesta al impacto se obtuvo en volts y se procesó en Matlab y OriginLab 9.0 para obtener la Trasformada Rápida de Fourier (FFT) a partir de la siguiente expresión.

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-ik\omega n} \qquad (2)$$

donde $k = 2\pi/N$. Con la frecuencia dominante se determinó el índice de firmeza a partir de la masa y la densidad de la muestra, dado por la siguiente ecuación

$$S_c = f^2 m^{\frac{2}{3}} \qquad (3)$$

donde $\mathbf{S_c}$ representa el índice de firmeza, $\boldsymbol{f}$ la frecuencia dominante obtenida a partir de los espectros de Fourier medido en Hertz, y $\boldsymbol{m}$ la masa del espécimen en kilogramos.

RESULTADOS

La respuesta al impacto acústico se presenta en la Figura 4, en donde se aprecia un comportamiento similar a un oscilador armónico amortiguado, en donde los volts obtenidos al inicio del impacto son los que presentan mayor amplitud y ésta se disipa al pasar el tiempo; este comportamiento se presenta en cada una de las barras de acero analizadas, sin embargo la varilla 3949 es la varilla que presenta la mayor amplitud y la que más tarda en disipar su amplitud, pudiendo asociar este comportamiento al diámetro de la sección transversal.

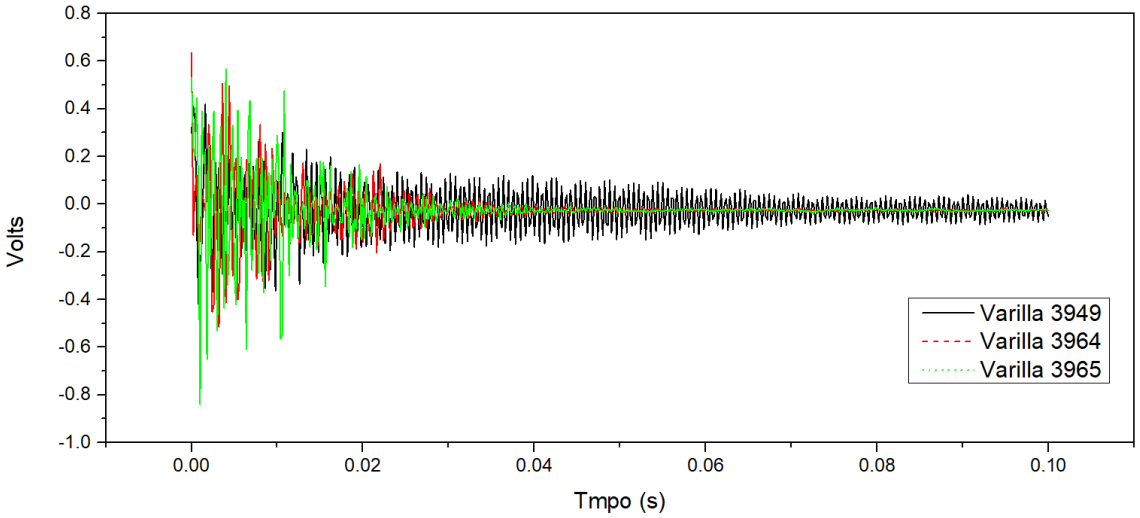


Figura 4. Respuesta al impacto acústico de las barras de acero.

Los espectros de Fourier obtenidos a partir de la Ec. (2), se muestran en la Figura 5, en donde se observa el corrimiento de la frecuencia dominante de cada una de las varillas analizadas. Para la varilla 3949 se tiene una frecuencia dominante de 1606.49 Hz, para la varilla 3964 una de 1357.29 y para la de 3965 una de 1487.03, de las cuales se deduce que el acero A36 tiene una frecuencia dominante que varía entre los 1200 y 1600 Hz.

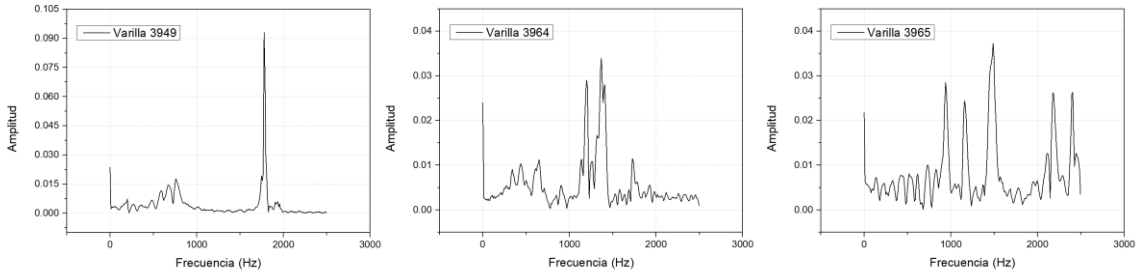


Figura 5. Espectros de Fourier determinados por impacto acústico.

Para la obtención de la resistencia mecánica de cada una de las varillas se utilizó el índice de firmeza como indicador para poder determinar el comportamiento de cada una de las varillas a partir de su masa, como describe la Ec (3). En la Tabla 1 se muestran los resultados de los índices obtenidos, en donde la barra 3949, es la que presenta el mayor índice de firmeza y la barra con menor índice de firmeza es la varilla 3964, esto puede asociarse al diámetro de cada una de las barras analizadas, ya que su sección transversal varia y por ende la masa de cada una de las piezas modifica el índice de firmeza obtenido en el análisis.

Tabla1. Índice de firmeza de barras de acero.

Muestra	Frecuencia (Hz)	Masa (gr)	Índice de firmeza ($Hz.Kg^{2/3}$)
Varilla 3949	1606.79	57.00	382383.86
Varilla 3964	1357.29	27.50	167840.79
Varilla 3965	1487.03	36.00	241086.06

De acuerdo a lo reportado en literatura, en la Tabla 2 se muestran los valores típicos del acero A36, sin embargo, es importante mencionar que estos valores provienen de paletas de acero industrial fabricado en caliente y que en cada proceso puede verse afectado por diversos factores ambientales.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero según literatura.

Propiedades mecánicas	Valores
Módulo de Young	200 Gpa
Coeficiente de Poisson	0.26
Módulo de corte	75 Gpa
Resistencia a la Tracción	250,000 kPa

CONCLUSIONES

De acuerdo a los datos obtenidos, se puede apreciar que las barras de acero presentan una frecuencia dominante similar, que oscila entre 1200 Hz y 1600 Hz, esto se atribuye a que el acero analizado corresponde a un mismo tipo de mezcla en caliente, denominada típicamente como acero dulce, sin embargo, el índice de firmeza varía en cada una de las secciones transversales a partir de la masa que presenta cada barra y esto puede atribuirse al tipo de refuerzo del que cada una de las varillas esta constituida, referidas principalmente a la corrugación en su superficie ya que ésta varía en cada una de las secciones trasversales, por ello, es importante la corroboración de los resultados obtenidos con pruebas destructivas a compresión axial simple, torsión, fatiga y módulo de corte, para comparar el comportamiento de cada una de las barras respecto a lo obtenido a partir de la frecuencia dominante.

Cabe mencionar que en el proceso de manufactura de la industria acerera se presentan ciertas impurezas en la elaboración de cada uno de los lotes de varillas y esto influye en las propiedades mecánicas del material, y pese a que la industria del acero tenga los valores convencionales, éstos pueden variar a partir de la manufactura de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1 Márquez-Herrera, A., & Moreno-Palmerin, J. (2022). Corrosion resistance evaluation of boron-carbon coating on ASTM A-36 steel. *Rev. Mex. Fís.*, *68(1),* pp. 011001 1-6.

2 Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D., & Studman, C. J. (1997). The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of agricultural engineering research*, *66*(4), 251-259.

3 Maierhofer, C., Reinhardt, H.-W., & Dobmann, G. (2010). Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. In Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. https://doi.org/10.1533/9781845699536

4 Carino, N. J. (2004). The impact-echo method: An overview. Structures - A Structural Engineering Odyssey, Structures 2001 - Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition, 109. https://doi.org/10.1061/40558(2001)15

5 Balayssac, J. P., & Garnier, V. (2017). Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures. In Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures. https://doi.org/10.1016/c2016-0-01227-5

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE GRANOS DE CAFÉ RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA

Héctor Miranda Pacindo, Nelly Flores Ramírez, Salomón Ramiro Vásquez García.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
nelly.flores@umich.mx.

RESUMEN

El reciclaje y la reutilización de residuos para la creación de nuevos materiales y dispositivos funcionales son aspectos cruciales en la protección del medio ambiente y la promoción de recursos sostenibles. Entre estos residuos se encuentra el café, que anualmente genera aproximadamente seis mil millones de kilogramos en forma de granos gastados, constituyendo así una fuente significativa de contaminación para los cuerpos de agua. No obstante, también representa una excelente fuente de biomasa que puede ser de forma innovadora reutilizada para fortalecer diversos materiales. Por otro lado, el método de electrohilado destaca por su alta eficiencia en la producción de nanofibras continuas con diámetros nanométricos, mediante la aplicación de un campo eléctrico de alto potencial. Este proceso induce una inestabilidad en las gotas de polímero bajo un campo electrostático elevado, lo que provoca que estas sean proyectadas hacia un colector, formando así las fibras. En este estudio, se exploró el interés de obtener nanofibras de celulosa (Cell) combinadas con granos de café gastados (GCG), utilizando polivinil alcohol (PVA) como vehículo, mediante la aplicación de un campo electrostático, con el propósito de proporcionar un refuerzo a las nanofibras de celulosa utilizando un enfoque ecológico y sustentable. Los resultados de las mediciones de viscosidad intrínseca indicaron un aumento con la integración de los granos de café gastados en las soluciones, lo que sugiere una interacción entre los elementos constituyentes. Las observaciones realizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostraron fibras de celulosa con diámetros heterogéneos en un rango de 0.1-1.0 µm, siendo menores para las fibras con residuos de café. Además, mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se identificó la presencia de asociaciones de grupos -OH de varios tipos con grupos polares en interacciones intra e intramoleculares. La disminución del enlace glucosídico al incrementarse los GCG indica interacciones polares de la Cell/PVA con los residuos de café, sugiriendo así una alta compatibilidad entre la celulosa y los GCG. Los resultados demuestran la viabilidad de producir nanofibras de celulosa reforzadas con granos de café gastado mediante un proceso de electrohilado de un solo paso. La capacidad de electrohilado de estas fibras reforzadas es de importancia debido al gran potencial para el desarrollo de productos en la industria papelera con diversas aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

La celulosa, uno de los materiales orgánicos más abundantes en la naturaleza, se destaca por su disponibilidad y su carácter renovable y biodegradable, convirtiéndose en una fuente primaria de materia prima ampliamente investigada tanto en su forma pura como derivada. Este biopolímero de cadena lineal, compuesto por unidades de poli-β (1,4)-D-glucosa con una configuración cristalina, ha encontrado aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la producción de papel, textiles, aditivos alimenticios y envasado de alimentos. Sin embargo, el procesamiento de la celulosa presenta desafíos significativos debido a su limitada solubilidad en solventes comunes y su incapacidad para fundirse.

La necesidad de superar estas limitaciones ha impulsado investigaciones dirigidas a desarrollar métodos versátiles para la disolución de la celulosa y la producción de microfibras a bajo costo, conservando las propiedades originales del material. Entre las técnicas más prometedoras se encuentra el uso de líquidos iónicos para disolver celulosa y obtener fibras mediante electrohilado. El electrohilado, también conocido como electrospinning, es un método versátil que emplea fuerzas eléctricas para generar fibras de polímeros a escala nanométrica. Estas fibras ultrafinas que pueden formar esteras textiles no tejidas, haces fibrosos orientados y estructuras tridimensionales con

grandes áreas superficiales y alta porosidad, ofreciendo amplias oportunidades para el control de la morfología de las fibras.

Las fibras poliméricas electrohiladas son particularmente atractivas para aplicaciones biomédicas y biotecnológicas, incluyendo la ingeniería de tejidos, nanocomposites para aplicaciones dentales, administración controlada de fármacos, implantes médicos, apósitos para heridas, biosensores y filtración. Además, estas fibras pueden ser reforzadas mediante la incorporación de otros compuestos, ya sean polímeros artificiales o naturales provenientes de residuos de otros procesos industriales.
En este contexto, los residuos de café, uno de los productos más consumidos en el mundo, presentan una fuente de contaminación significativa debido a los grandes volúmenes generados y la lenta biodegradación de sus componentes.

Los granos de café gastados (GCG) contienen biopolímeros y otros componentes de interés para la industria química y el desarrollo de nuevos productos. Investigaciones recientes han explorado el uso de estos residuos como relleno de refuerzo en matrices de celulosa para la producción de materiales de empaque.

Este trabajo se enfoca en estudiar el efecto de los GCG en la morfología y estructura de las fibras de celulosa obtenidas mediante la técnica de electrohilado, además de caracterizar las soluciones precursoras utilizadas en este proceso.

TEORÍA

El café y su Origen

El café es una bebida aromática que se obtiene a partir de los granos tostados y molidos de las plantas de café que pertenecen al género *Coffea* y se prepara generalmente mediante la infusión de granos de café tostados y molidos con agua caliente o en manera de café instantáneo obtenido por un proceso de liofilización. Si bien hay muchas especies de plantas dentro de este género, las dos principales que se cultivan comercialmente por sus granos de café son *Coffea arabica y Coffea canephora* (Figura 1a y b), comúnmente conocida como café robusta[1].

Figura 1 a)*Coffea canephora* b)*Coffea arabica*
https://es.gastronomiac.com/product_glossary/caf%C3%A9-robusta/. https://seedcorner.com/coffee-arabian-coffea-arabica-nana-seeds/

La bebida de café es una de las más populares y consumidas en el mundo por lo que tiene una larga historia que se remonta a siglos y a múltiples regiones del mundo. Originario de Etiopía, el café se ha convertido en una parte integral de la cultura en muchas sociedades por lo que la historia del café está envuelta en leyendas. Una de las más conocidas es la del pastor etíope Kaldi, quien en el siglo IX observó que sus cabras se volvían especialmente enérgicas después de consumir las bayas de un cierto arbusto. Tras probarlas él mismo, descubrió sus efectos vigorizantes, posteriormente los monjes locales adoptaron el uso de estas bayas para mantenerse despiertos durante largas horas de oración.

Desde Etiopía el café se extendió a Yemen, donde los sufíes utilizaban la bebida para facilitar sus vigilias nocturnas. En el siglo XV, el café llegó a La Meca y Medina, y posteriormente se difundió a otras partes del Medio Oriente, Persia, Turquía y el norte de África. El primer café en Europa se estableció en Venecia en 1645, pero muy pronto se convirtió en una bebida popular en toda Europa.

Posteriormente el cultivo de café se extendió a Asia, América Central y del Sur a través de la colonización de los nuevos terrritorios y el comercio. La expansión del cultivo del café en América Latina incluyendo México transformó la economía y el paisaje de muchos países, estableciendo el café como un cultivo agrícola vital[2].

Los granos de café y su composición.

El grano de café es un sistema complejo de varios constituyentes entre los que están la celulosa, hemicelulosa, arabinosa, galactosa, polifenoles, proteínas y otros constituyentes como agua, carbohidratos, lípidos, aminoácidos, ácidos alifáticos, cafeína y minerales[3]. El sabor y aroma característicos del café resultan de una combinación de cientos de compuestos químicos producidos por las reacciones que ocurren durante el tostado[4].

El proceso de tostado, además de la eliminación de agua, produce cambios en las propiedades químicas y físicas, así como en el color, aroma y sabor. El tostado es una etapa crítica en la producción del café, donde los granos verdes se transforman en los granos marrones y aromáticos que conocemos[5].

Las fases del tostado comienzan por el secado, durante esta fase inicial la humedad residual en los granos se evapora debido a que la temperatura se eleva de manera controlada hasta aproximadamente 160°C[6]. A medida que la temperatura aumenta los azúcares y aminoácidos en los granos reaccionan, formando compuestos que contribuyen al color y sabor del café tostado, esta fase es crucial para el desarrollo de los compuestos aromáticos complejos[7].

Posteriormente se desarrolla el sabor que es a temperaturas entre 180°C y 230°C, en donde los granos comienzan a agrietarse debido a la presión interna, también se forman los ácidos clorogénicos y se liberan compuestos volátiles que son esenciales para el aroma del café[8].

Si el tostado continúa se produce un segundo agrietamiento, indicando una mayor degradación de los compuestos orgánicos y la formación de sabores más oscuros y amargos. El perfil de tostado o nivel de tostado (ligero, medio, oscuro) afecta significativamente el perfil de sabor del café. Un tostado ligero mantiene más de los sabores originales del grano, mientras que un tostado oscuro desarrolla sabores más fuertes y a menudo amargos debido a la caramelización de los azúcares y la degradación de los ácidos. Otro componente a considerar fundamental para el sabor del café es la cafeína que contribuye al amargor y tiene efectos farmacológicos conocidos[8].

La composición química del café varía según la especie, el origen geográfico, las condiciones de cultivo y los métodos de procesamiento, pero en general el grano de café es una fuente rica y compleja de compuestos químicos que influyen en su sabor, aroma y propiedades fisiológicas. Entre los principales compuestos podemos encontrar la cafeína que es el alcaloide más conocido del café y el principal responsable de sus efectos estimulantes[9]. Se ha demostrado que los ácidos clorogénicos tienen varios beneficios para la salud, incluyendo la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares. Los lípidos constituyen una pequeña fracción del grano de café, estos juegan un papel crucial en la formación de la crema en el espresso y en la retención de los aromas. Los carbohidratos principalmente en forma de polisacáridos y azúcares simples, son importantes para la estructura del grano y también contribuyen al sabor y la textura del café[11].

Los aromas del café se deben a una compleja mezcla de compuestos volátiles, que se forman durante el tostado. Estos incluyen aldehídos, cetonas, ácidos, y ésteres, entre otros. Las proteínas y los aminoácidos son componentes que contribuyen a la formación de melanoidinas durante el tostado, que son responsables del color y algunos aspectos del sabor del café tostado[11].

Residuos del Café.

El gran consumo de café a nivel mundial genera una cantidad significativa de residuos, principalmente los GCG de café usados (Figura 2), los cuales son potencialmente tóxicos para algunas plantas y organismos acuáticos y que pueden representar graves problemas ambientales[12]. La cascarilla del café y los restos de café conocidos como granos de café gastados (GCG) son los principales residuos de la industria cafetalera obtenidos durante el tostado del grano, el proceso de preparación del café instantáneo y el café de cafetería, respectivamente. Se estima que 1 kg de café instantáneo genera alrededor de 2 kg de GCG húmedos[5]

La disposición sostenible de estos residuos ha llevado a la exploración de múltiples usos alternativos con la intención de utilizar estos residuos para la producción de energía o compuestos de valor agregado, como estrategias para reducir sus niveles contaminantes, al mismo tiempo que les agregan valor y se les reintegra a las cadenas productivas[4]. Entre los principales usos alternativos están el compostaje ya que los GCG de café son ricos en nitrógeno, lo que los hace ideales para el compostaje. Añadirlos a la composta ayuda a acelerar la descomposición de materia orgánica y enriquece el suelo con los compuestos minerales presentes en los granos. Estos residuos también son compatibles con la producción de biogás, los GCG pueden ser utilizados en digestores anaeróbicos para producir biogás, una fuente de energía renovable y sustentable. De igual manera se han explorado la incorporación de posos de café en materiales de construcción como ladrillos y paneles, aprovechando su capacidad de aislamiento y resistencia.

Los GCG pueden ser utilizados en aplicaciones cosméticas de productos de belleza como exfoliantes naturales, debido a su textura abrasiva suave, al mismo tiempo la cafeína y los antioxidantes presentes en los residuos de café son beneficiosos para la piel, ayudando a reducir la inflamación y mejorar la apariencia de la piel. Los GCG de café pueden ser utilizados como tintes naturales para tejidos y papel, proporcionando tonos marrones suaves.Los residuos de café tienen la capacidad de absorber y neutralizar olores, haciéndolos útiles en la eliminación de malos olores en refrigeradores, zapatos y espacios cerrados. Otra alternativa de reutilización de los GCG es dentro de la industria química es como refuerzo de una matriz de compuestos poliméricos[13].

La gestión de los residuos de café ofrece oportunidades para la innovación sostenible en múltiples campos. La investigación continua y la valorización de todos los aspectos del café pueden contribuir a un futuro más sostenible y a un mayor aprecio por esta fascinante bebida es por esto que su rica composición química, las características distintivas de sus plantas y semillas, y el proceso de tostado que transforma sus granos, son aspectos fascinantes que han sido objeto de diversos estudios científicos[14]. Adicionalmente, los residuos del café, que son un subproducto significativo de su consumo global, tienen diversas aplicaciones que están siendo exploradas para promover la sostenibilidad[15].

Figura 2. Residuos de Café.
https://cafeselcriollo.com/listados/diez-usos-para-aprovechar-los-residuos-del-cafe/

Celulosa y sus aplicaciones.

La celulosa es el componente estructural fundamental de las paredes celulares de las plantas y algunos tipos de algas, se encuentra predominantemente en las plantas superiores, donde constituye

entre el 30% y el 50% de su estructura seca. Es un polímero natural formado por moléculas de glucosa unidas por enlaces β(1→4)[16]. Es el principal componente de la pared celular de las plantas que le que proporciona rigidez y soporte junto con la lignina.

Las principales fuentes de celulosa incluyen a las plantas terrestres entre lo que están los árboles y las plantas leñosas que son ricos en este polisacárido y algunas plantas no leñosas que tienen una gran cantidad de celulosa como el algodón. La celulosa constituye el recurso polimérico renovable más abundante disponible en la actualidad en todo el mundo, se ha estimado que mediante la fotosíntesis se sintetizan anualmente entre $10^{.11}$ y $10^{.12}$ toneladas en forma bastante pura, por ejemplo, en los hilos de las semillas de la planta del algodón, pero la mayoría se combinan con lignina y otros polisacáridos como las hemicelulosas al interior y exterior de la célula de la pared de plantas leñosas.

La fórmula química de la celulosa se puede representar como $(C_6H_{10}O_5)n$, donde "n" puede ser un número de hasta 10.000 unidades, indicando la cantidad de unidades de glucosa en la cadena polimérica, esto le permite que los enlaces β(1→4) glucosídicos confieran una estructura lineal y estable, ya que cada molécula de glucosa está rotada 180° con respecto a la anterior, además las cadenas de celulosa forman enlaces de hidrógeno entre ellas, lo que refuerza la estructura y crea microfibrillas fuertes y resistentes lo que otorga la aparición de regiones cristalinas que son altamente ordenadas, en comparación con las hemicelulosas que son regiones amorfas y menos ordenadas, lo que influye en sus propiedades físicas. Esta estructura cristalina le confiere a la celulosa una notable resistencia y rigidez, lo que la hace ideal para proporcionar soporte estructural en las plantas[18].

La celulosa es una materia prima que la humanidad ha usado en toda su historia para dos propósitos generales, primero ha servido al hombre como elemento de construcción, pero con la llegada de la revolución industrial la celulosa ha tenido una amplia variedad de usos en diferentes industrias químicas basados en sus características únicas[19]. Algunos de los usos más destacados son:

Industria del papel y cartón, se utiliza en la fabricación de fibras textiles como el algodón y el lino, puede ser modificada para producir bioplásticos, que son biodegradables y tienen un menor impacto ambiental en comparación con los plásticos convencionales. La celulosa y sus derivados como la carboximetilcelulosa se usan como aditivos alimentarios, espesantes y estabilizadores debido a su capacidad de formar geles y retener agua. Se utiliza en la fabricación de tabletas como agente aglutinante y en la producción de cápsulas de liberación controlada, se emplea en la producción de materiales compuestos y aislantes debido a sus propiedades térmicas y mecánicas[16,20,22].

La biodegradabilidad y renovabilidad de la celulosa la posicionan como un recurso clave en el desarrollo de tecnologías sostenibles y amigables con el medio ambiente ya que posee una serie de propiedades físicas y químicas que la hacen única y útil en diversas aplicaciones.

Entre sus principales características encontramos una alta resistencia y rigidez: La estructura lineal y la formación de microfibrillas le otorgan a la celulosa una gran resistencia mecánica, es insoluble en agua y en la mayoría de los solventes orgánicos, debido a su estructura cristalina y a la formación de enlaces de hidrógeno[22-24].

Electrohilado y sus aplicaciones.

El electrohilado, también conocido como electrospinning, es una técnica versátil y eficiente para la producción de fibras ultrafinas. Este método se ha destacado en la fabricación de materiales avanzados debido a su capacidad para producir fibras con diámetros que van desde nanómetros hasta micrómetros, las fibras que se obtienen por este método tienen aplicaciones en distintas áreas, como biomedicina, filtros, textiles avanzados y almacenamiento de energía[25].

El proceso de electrohilado fabrica las fibras mediante la aplicación de un campo eléctrico de alta intensidad a una solución polimérica o a un fundido polimérico, dicho de otra manera, el electrohilado implica la generación de una fuerza electrostática que estira un chorro de fluido polimérico para formar fibras continuas y delgadas, por lo que esta técnica se basa en la acción conjunta de la electrohidrodinámica y la electrostática para transformar una gota de solución en un filamento fino.

En un dispositivo típico de electrohilado (Figura 3) la solución polimérica se carga en una jeringa conectada a una aguja metálica. Al aplicar un alto voltaje entre la aguja y un colector ya sea placa metálica o tambor rotatorio, la carga eléctrica en la superficie de la solución provoca la formación de un cono de Taylor, del cual emerge un chorro fino que se estira en fibras mientras el solvente se evapora[26].

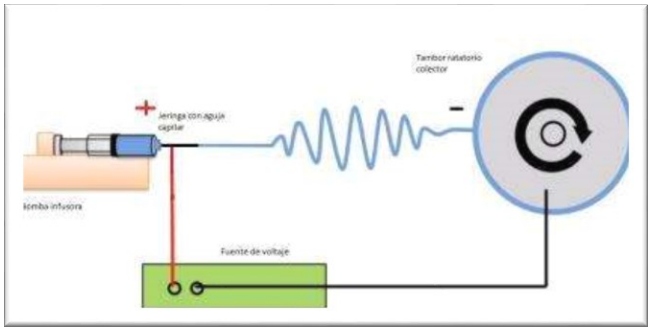


Figura 3. Sistema representativo del electrohilado por inyección de aguja. Elaboración propia

Aunque el concepto de electrohilado se remonta a principios del siglo XX su desarrollo y popularidad han sido relativamente recientes debido al desarrollo de nuevos materiales útiles para este proceso. El proceso y equipo de electrohilado tiene varias características distintivas que lo hacen único entre los métodos de producción de fibras nanómetricas y/o a micrométricas. Esta escala de tamaño confiere a las fibras propiedades únicas, como una alta relación superficie-volumen y porosidad. El proceso también permite el uso de una versatilidad de materiales ya que se pueden usar una amplia gama de polímeros, tanto naturales como sintéticos. Además, se pueden incorporar nanopartículas y otros aditivos para modificar las propiedades de las fibras[27].

Las fibras electrohiladas pueden tener estructuras complejas, incluyendo fibras huecas, porosas y compuestas, esta morfología puede ser ajustada mediante la modulación de los parámetros del proceso lo que también tiene como consecuencia un cambio en las propiedades mecánicas y funcionales ya que las nanofibras electrohiladas exhiben propiedades mecánicas específicas y pueden ser funcionalizadas para aplicaciones especializadas, como biocompatibilidad, reactividad química y conductividad eléctrica[28].

El éxito del proceso de electrohilado y las características finales de las fibras producidas dependen de varios parámetros que pueden ser categorizados en parámetros de solución, parámetros del equipo y ambientales.

Parámetros de la solución; en éstos se consideran la concentración del polímero ya que la viscosidad de la solución es crucial para un hilado eficiente, una concentración muy baja puede resultar en gotas y no en fibras, mientras que una concentración muy alta puede hacer difícil el estiramiento del chorro. Otro factor a considerar es la conductividad y polaridad del solvente, solventes con alta conductividad y polaridad facilitan la carga de la solución, mejorando la formación de fibras. También se requiere que la solución presente una tensión superficial adecuada que es necesaria para la formación de fibras uniformes[29].

Parámetros de proceso; dentro de éstas se encuentra el voltaje aplicado. Un voltaje adecuado es esencial para superar la tensión superficial de la solución y la creación del chorro de fluido a través de la formación del cono de Taylor, voltajes demasiado bajos pueden impedir la formación de fibras, mientras que voltajes demasiado altos pueden producir inestabilidad.

La distancia entre la aguja y el colector debe ser optimizada para permitir un adecuado estiramiento y solidificación de las fibras antes de alcanzar el colector. El caudal de la solución también debe ser controlado para mantener una tasa constante de formación de fibras y no interrumpir el flujo del mismo. En los parámetros ambientales encontramos factores como la humedad y la temperatura que pueden influir en la evaporación del solvente y en la solidificación de las fibras por lo que también se debe controlar la velocidad del aire y la ventilación ya que un flujo de aire adecuado puede ayudar en la evaporación del solvente y en la orientación de las fibras[30].

El electrohilado tiene aplicaciones en diversas áreas debido a la versatilidad y las propiedades únicas de las fibras producidas Las nanofibras electrohiladas se utilizan como andamios para el crecimiento celular debido a su similitud con la matriz extracelular, estos andamios pueden ser funcionalizados con factores de crecimiento y otras biomoléculas para mejorar la regeneración tisular[31].

Las nanofibras son utilizadas también en la generación de filtros de aire y agua. Las nanofibras electrohiladas son ideales para aplicaciones de filtración debido a su alta porosidad y pequeña escala de poro, lo que permite capturar partículas finas y microorganismos. De igual manera se puede utilizar en membranas de separación que se utilizan en procesos de separación y purificación de gases y líquidos, beneficiándose de sus propiedades de selectividad y permeabilidad[32].

Como conductores o semiconductores de energía eléctrica se pueden integrar a baterías y capacitores. Las algunas nanofibras electrohiladas se emplean en electrodos para baterías de iones de litio y supercapacitores debido a su alta conductividad y capacidad de carga[33].

En ropa inteligente las fibras electrohiladas pueden ser integradas en textiles para crear prendas con propiedades avanzadas, como regulación térmica, censado y protección contra impactos o pueden ser utilizados en textiles técnicos para aplicaciones específicas que requieren alta filtración y resistencia mecánica[34].

Nanofibras de celulosa.

Las nanofibras de celulosa son estructuras fibrosas con diámetros en el rango nanométrico, derivadas de la celulosa, poseen una alta relación superficie-volumen, lo que les otorga propiedades únicas. Las características principales de estas incluyen su alta resistencia mecánica, flexibilidad, biodegradabilidad y baja densidad. Además, son capaces de formar redes tridimensionales muy densas y homogéneas, lo que les confiere una notable capacidad de retención de agua y un comportamiento reológico. Estas propiedades hacen que las nanofibras de celulosa sean un material prometedor para diversas aplicaciones industriales y tecnológicas.

Las nanofibras de celulosa se pueden utilizar en la industria del papel para mejorar las propiedades mecánicas y la opacidad del papel. En el campo biomédico, se investigan para la producción de andamios para ingeniería de tejidos, debido a su biocompatibilidad y capacidad para soportar el crecimiento celular. Además, se pueden emplear en la fabricación de materiales compuestos, recubrimientos, filtros y como espesantes en alimentos y cosméticos[36].

PARTE EXPERIMENTAL

a) Acondicionamiento de los granos de café

Para el desarrollo del proyecto se utilizó café de grano molido de origen colombiano marca comercial; para la lixiviación de los granos de café gastados (GCG) se realizó la preparación de una bebida de

café en una cafetera estándar usando condiciones normales de operación; posteriormente los residuos se secaron a 103 ºC hasta peso constante, posteriormente se molió y se tamizo usando malla 40 y reteniendo en malla 60.

b) Proceso de blanqueo del café

El proceso de blanqueo se realizó con una solución de NaOH y posteriormente se adicionó H_2O_2 como reactivo de blanqueo. La solución con el café se mantuvo a 35 ºC durante 24 h. La fracción sólida se extrajo usando un papel de filtro con un sistema de filtración al vacío. Las muestras después se lavaron con agua destilada hasta pH neutro y secadas a 60 ºC hasta peso constante. Por último, se tamizó en malla 100.

c) Disolución de celulosa.

La celulosa es disuelta en una solución de NaOH, urea y agua destilada. La mezcla se almacena en refrigeración a –12° C, se añade una cantidad apropiada de celulosa y café a la solución con agitación vigorosa hasta obtener la solución de celulosa transparente.
d) Preparación de Cell/PVA/GCG
Inicialmente se preparó una solución de NaOH, urea y agua en donde se incorporó celulosa al 1% p/p, para posteriormente agregar GCG blanqueados en cuatro concentraciones 0.5, 1.0, 2.0 y 3.0 % p/p, finalmente se realizó una mezcla con las soluciónes preparadas para obtener las soluciones a electrohilar que fueron identificadas como Cell/PVA/GCGb 0.5; Cell/PVA/GCGb 1.0; Cell/PVA/GCGb 2.0; Cell/PVA/GCGb 3.0,) respectivamente.

d) Electrohilado de la solución.

Para el electrohilado se utilizó un equipo equipado con bomba para electrohilado con un colector giratorio de placa de aluminio sobre un rodillo, las condiciones iniciales del proceso fueron; la distancia entre la aguja y el tambor colector fue de 5 a 25 cm a aguja estándar de 0.6mm DI, el voltaje aplicado fue de 20 y 40 kV, la velocidad angular del cilindro fue de 200 revoluciones por minuto, con una velocidad de inyección de 0.01 ml por min.

RESULTADOS

a) Caracterización del café blanqueado

- Número de kappa

Este método se aplica para la determinación de blanqueabilidad o grado de deslignificación de las pulpas. El número de kappa es el volumen (en ml) de permanganato de potasio 0,1N consumido por 1g de pulpa seca, siguiendo la ecuación:

$$N° \text{ de kappa} = (B-T)/(\%C \times 3) \times 100$$

Dónde: B= ml de tiosulfato consumidos en titulación en blanco
T= ml de tiosulfato consumidos en titulación con muestra
%C= Consistencia de la muestra

Los resultados fueron:
N° de kappa café sin tratamiento= 14
N° de kappa café H_2O_2= 3.83

Como se observa, el café blanqueado con H_2O_2 presenta una disminución en el número de kappa, esta reducción se atribuye a la eliminación de lignina, así como a la perdida de polisacáridos, lo que genera poros a nivel microescala, el proceso de blanqueo fue suficiente para acondicionar el café y pueda ser incorporado a la celulosa.

- Difracción de rayos X (XRD)

El principal compuesto de los granos de café es la celulosa 1β[5], que puede llegar a representar hasta el 43% de la masa, esta característica permite que el patrón de difracción de rayos X del café sea similar al patrón de la celulosa nativa (Figura4). Adicionalmente, para el café se observa un incremento en el área de las difracciones, lo que sugiere una modificación en la distribución de fases cristalinas debido al tratamiento térmico al que es sometido durante el proceso de tostado[6].

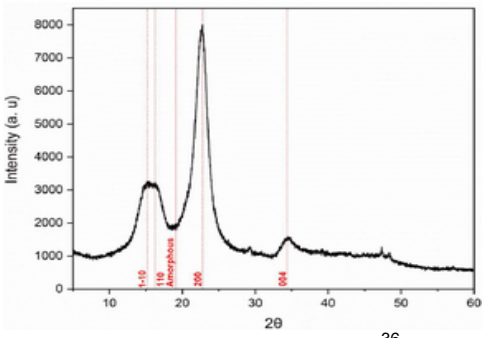


Figura 4. DRX de celulosa nativa[36].

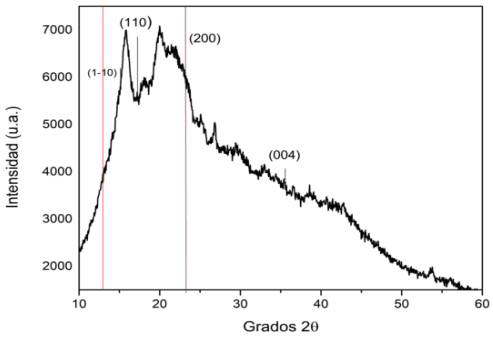


Figura 5. DRX Café blanqueado con H_2O_2

La aparición de dos regiones cristalinas (Figura 5), alrededor de 22.6 ° y 33.4 °, son atribuidos a los planos cristalinos (002) y (100) de estructura β-de fase cristalina de la celulosa. Estas regiones son responsables de alta resistencia a la tracción y menos accesibilidad para ataques químicos debido a la presencia de fuertes interacciones de hidrógeno entre las microfibrillas en la estructura orgánica[12].
El índice de cristalinidad (IC o CrI) se calculó usando un método de aproximación simple creado por Segal et al. 1959[37], que consiste en tomar del difractograma la intensidad de un mínimo y un máximo apropiados para dar un valor acertado de la cristalinidad que se obtiene mediante la aplicación de la fórmula:

$$IC=[\ 〖I_{(002-)}\ I〗\ _{(am\ )}/I_{am\ }]\times 100$$

Dónde:
I002 es la intensidad del pico cristalino en el máximo a 2Θ entre 22° y 23°.
Iam es la intensidad del pico cristalino mínimo a 2Θ entre 13° y 15°.

Resultando: GCG H_2O_2 IC=69.61

En los granos de café gastados blanqueados con H_2O_2 se observa un aumento de cristalinidad, dado que su IC sin blanquear se reporta de 52, el incremento de la cristalinidad se atribuye principalmente a la eliminación de la parte amorfa de lignocelulosa.

b) Proceso de electrohilado.

En el proceso de optimización de las condiciones para obtener las fibras electrohiladas, se realizaron pruebas con diversas distancias de la aguja al colector, obteniéndose hilos de celulosa a distancias que van desde 5 hasta 25 cm. Además, se llevaron a cabo ensayos utilizando los voltajes propuestos en la metodología, donde los resultados indicaron que un voltaje de 15 a 40 kV permitió una eficiente formación de celulosa electrohilada. El uso del tambor rotatorio facilitó una mayor distribución de las fibras (Figura 6), y su giro contribuyó tanto a la alineación de las fibras (Figura 7) como a una evaporación constante del solvente. Por lo tanto, se han estandarizado las condiciones de operación

del equipo y de la solución preparada para la obtención de nanofibras de celulosa reforzadas con café.

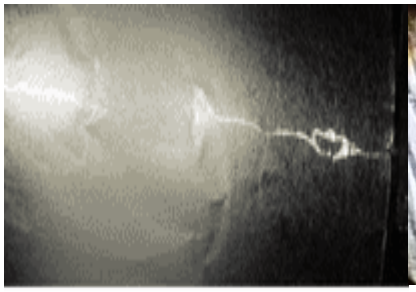


Figura 6. Fibras electrohiladas adheridas al colector.

Figura 7. Imagen de microscopio óptico de fibras electrohiladas.

c) Caracterización morfológica por microscopia óptica (MO) y microscopia electrónica de barrido (MEB) de las fibras.

A través de la caracterización microscópica se llevó a cabo el estudio de la morfología de los electrohilado, a través de microscopia óptica se realizó un análisis preliminar para visualizar la formación de las fibras, posteriormente se realizó el análisis por MEB y se midió el diámetro de las fibras y se observó la superficie de los mismos.
En la figura 5 se muestran las micrografías de las fibras de PVA a) microscopia óptica b) y c) MEB a 1,000x y 10,000x respectivamente.

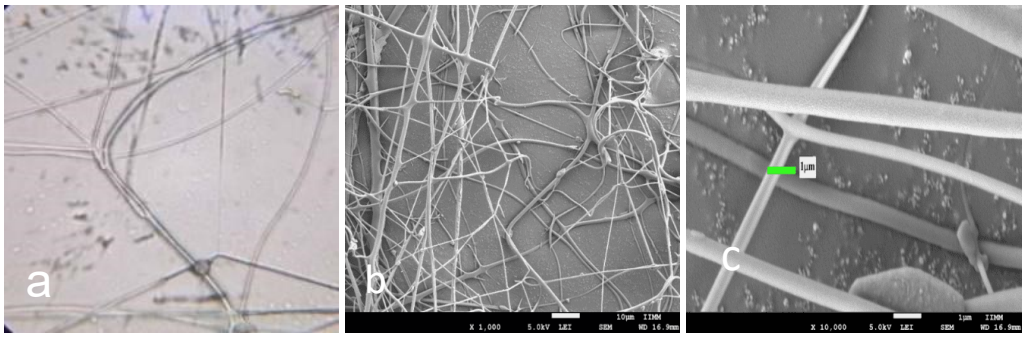


Figura 8. Fibras elecrohiladas de PVA a) MO 100x, b) MEB 1000x y c) MEB 10,000x

Para el PVA en la Figura 8 se observaron fibras de superficie lisa y entrelazadas con minimos defectos. A partir de las soluciones con Cell/PVA (Figura 9), se formaron fibras entrelazadas, agregados de las mismas con pliegues y torceduras, no se observan perlas en las fibras, lo que pueden indicar una buena miscibilidad entre los componentes de la solución[38]. Además; a esto podría contribuir los cambios estructurales en el cuerpo de la fibra y en la ultraestructura de las fibras que se originan por dos tipos de deformaciones, las naturales o inducida; las naturales son las propias del árbol y las inducidas por impacto mecánico deliberado o por el procesamiento. Las deformaciones inducidas son causadas principalmente por la falla por compresión axial de la pared durante el procesamiento de la pulpa para la obtención de la celulosa[39].

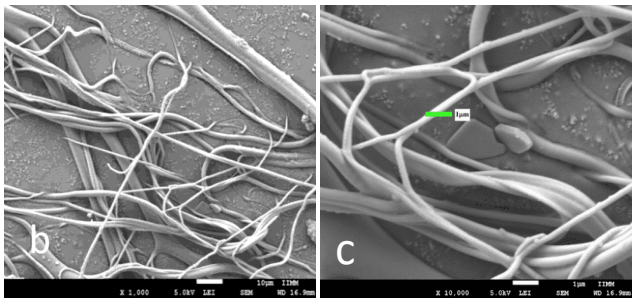


Figura 9. Fibras electohiladas de Cell/PVA a) MO 100x, b) MEB 1000x y c) MEB 10000x

Las figuras 10, 11, 12 y 13 muestran imágenes de microscopia óptica y MEB de las fibras electrohiladas de la mezcla de Cell/PVA/GCGb con diferentes concentraciones de GCGb.
Se observa la formación de fibras lisas y fibras con la presencia de perlas. Al comparar las fibras con diferentes concentraciones de GCGb, se observa que un aumento de granos de café genera perlas con mayor tamaño, la morfología cambia a una estructura de fibra uniforme, con diámetros menores a aquellos obtenidos por la Cell/PVA y PVA.

Se realizaron mediciones en las imágenes con el software “Image J” para conocer el diámetro de las fibras encontrando en todos los procesos de hilado, fibras desde 0.1 µm hasta 1.1 µm, el diámetro de las fibras es heterogéneo, lo cual puede deberse a diversos factores entre de estos a la distancia del inyector y el colector, una distancia mayor permitirá una suficiente evaporación antes de la deposición de las fibras o bien el uso de un disolvente de mayor volatilidad minimizaría la formación de defectos [40].

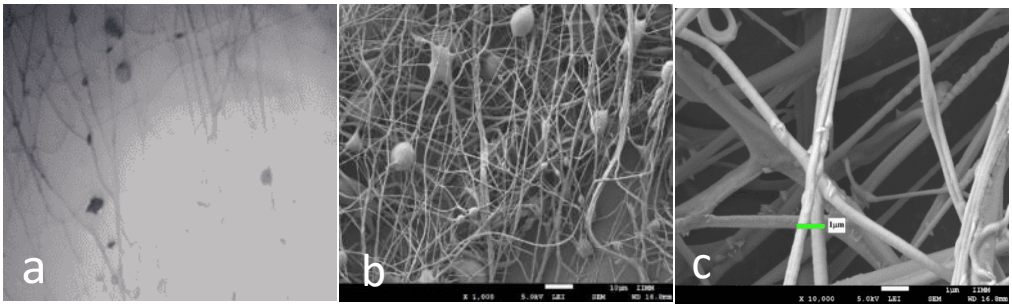


Figura 10. Fibras electrohiladas de Cell/PVA/GCG 0.5 a) M.O 100x, b) MEB 1000x, c) MEB 10,000x

La viscosidad es otro de los parámetros en la formación de las fibras, A baja viscosidad, la tensión superficial es el efecto dominante sobre la morfología de las fibras. Por debajo de cierta concentración, se formarán gotas en lugar de fibras, Sin embargo, también en altas concentraciones, el procesamiento estará impedido por la incapacidad de controlar y mantener el flujo de la solución de polímero a la punta de la aguja y por la naturaleza cohesiva de la alta viscosidad. Esto se observó en las muestras con GCGb, a mayor concentración de granos de café, mayor viscosidad y mayores defectos se formaron[41].

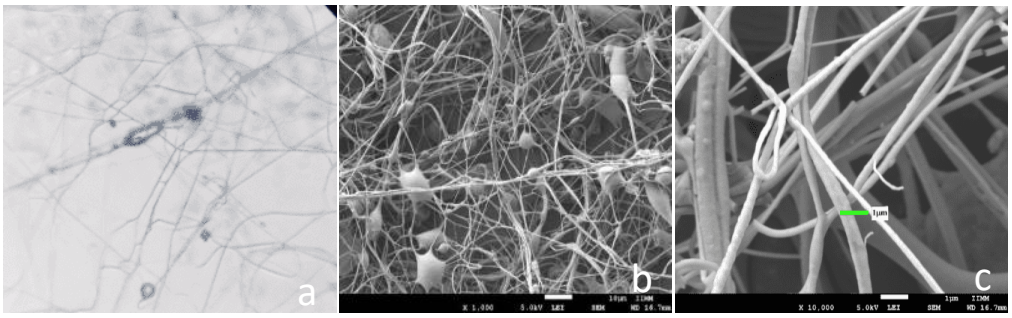


Figura 11. Fibras electrohiladas de Cell/PVA/GCGb 1.0 a) M.O 100x, b) MEB 1000x, c) MEB 10,000x

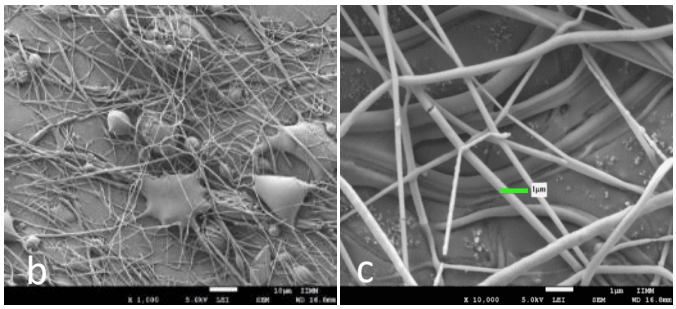


Figura 12. Fibras electrohiladas de Cell/PVA/GCGb 2.0 a) M.O 100x, b) MEB 1000x, c) 10000x

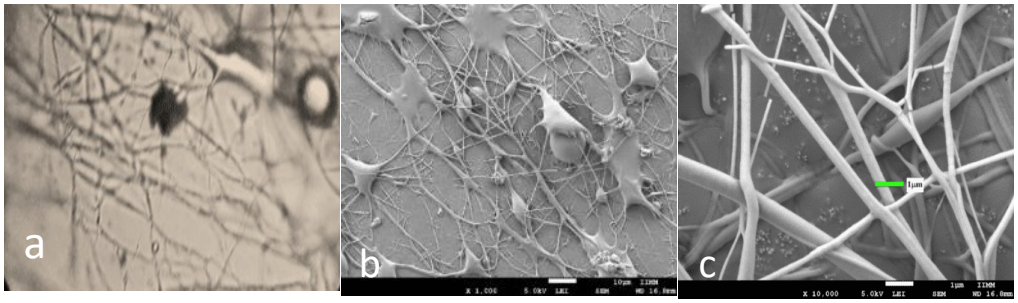


Figura 13. Fibras electrohiladas de Cell/PVA/GCGb 3.0 a) M.O 100x, b) MEB 1000x, c) 10000x

Tabla 1. Análisis EDS de las fibras electrohiladas con GCGb y de PVA

Elemento químico	*Fibras electrohiladas GCGb*		*Fibras electrohiladas PVA*	
	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico
Carbono	55.99	63.81	53.81	60.81
Oxígeno	39.92	34.16	46.18	39.18
Aluminio	1.44	0.732		
Silicio	2.63	1.28		
Total	100	100	100	100

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos por EDS, del espectro EDS del análisis químico de elementos que se realizó a las fibras electrohiladas con GCGb, en las que se identificaron elementos

inorgánicos que pertenecen a las partículas de café, así mismo se muestra el análisis EDS de las fibras electrohiladas únicamente de PVA, corrobora que la precedencia de los GCGbH se encuentra en las fibras.

e) Análisis estructural de las fibras electrohiladas

En la Figura 15 se presentan los espectros infrarrojos donde se comparan las fibras electrohiladas compuestas PVA, b). Cell/PVA, c). Cell/PVA/GCGb cuatro concentraciones de esta última (0.5, 1.0, 2.0,3.0 % p/p).

Debido a que el proceso para la obtención de la fibra electrohilada consistió en disolver al PVA en H_2O y el resto de los compuestos en soluciones de alcalinas (H_2O/urea/NaOH), se establece que los productos resultantes (fibras de PVA y fibras con celulosa) sean hidrolizados[42], es decir con grupos carbonilos (C=O) en sus estructuras. Al respecto, en la Figura 14 se presentan las reacciones del PVA y Celulosa. Para el PVA existe una ruptura de la cadena se debería a una retro (en reversa) reacción de condensación aldólica[43,44]

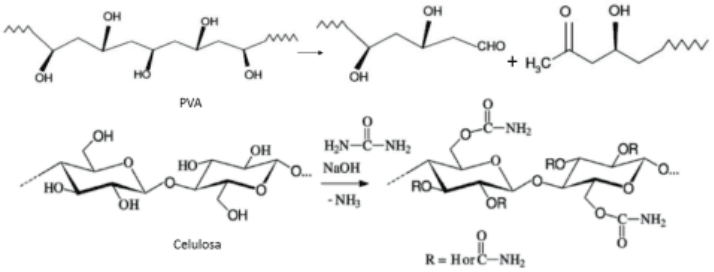


Figura 14. PVA y Cell en una reacción de formación de grupos carbonilos

Al observa los espectros que se presentan en la Figura 15, se advierte la presencia de los grupos hidroxilos (en el rango de 3500-3100 cm-1) y aquellos que corresponden a la presencia de grupos orgánicos del tipo metilos y metilenos (en el rango de 3000-2700 cm-1). Un análisis de las variantes de las señales se observa en la Figura 14, que es una ampliación seccional de la Figura 15.

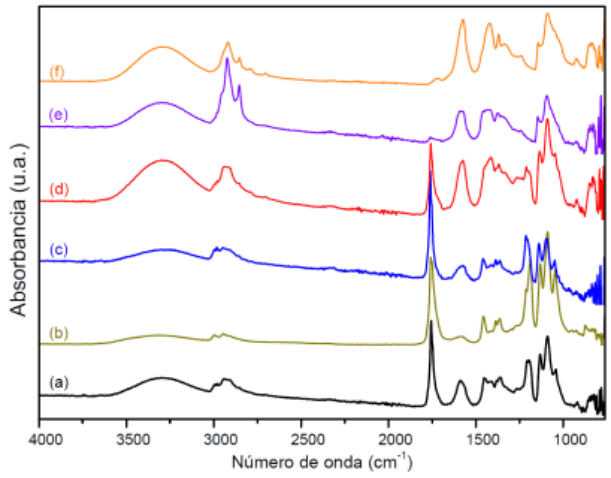


Figura 15. FTIR de fibras electrohiladas. a). PVA, b). Cell/PVA, c). Cell/PVA/GCGb 0.5, d). Cell/PVA/GCGb 1.0, e). Cell/PVA/GCGb 2.0, f). Cell/PVA/GCGb 3.0

En la Figura 16 de la izquierda se realizó una ampliación en el número de onda de 3700-2700 cm^{-1}. En esta parte del espectro se observa la una gran banda entre 3550-3200 cm^{-1} que está relacionada

a la tensión del O-H de los enlaces hidrogeno inter- e intramoleculares. Las señales observadas entre 2840-3000 cm-1 se refieren a las tensiones C-H de los grupos alquilos y los picos entre 1750-1735 son debidos a la tensión C=O y C-O de grupo acetato para el PVA [45].

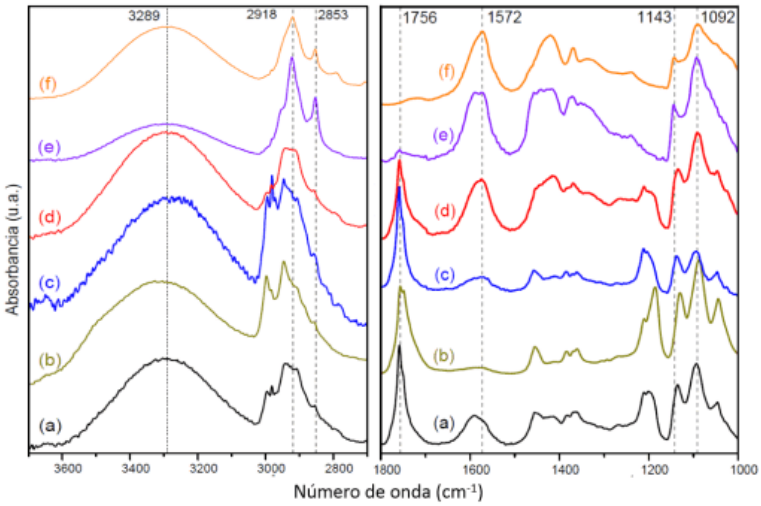


Figura 16. FTIR de fibras electrohiladas. ampliaciones: a). PVA, b). Cell/PVA, c). Cell/PVA/GCGb 0.5, d). Cell/PVA/GCGb 1.0, e). Cell/PVA/GCGb 2.0, f). Cell/PVA/GCGb 3.0

Los incrementos en las intensidades de las señales es un indicativo de la presencia de una mayor cantidad de grupos en la cadena polimérica, y los recorridos en el número de onda indican las asociaciones que intra- intermoleculares que se dan en la misma.

La señal del grupo -OH en función del incremento en la concentración de GCGb (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 % p/p), registra un incremento en relación a los grupos metilo y metileno (C-H) que es máxima a 2.0 % p/p con una disminución importante a 1.0 % p/p, Figura 16. Esto puede deberse al cambio de asociación que va presentando la GCGb al incrementarse respecto a la Cell/PVA. Así, la concentración a 2 % p/p muestra una banda del -OH más amplia, así como la presencia de picos de -CH2- y CH3, que revelan las asociaciones de los grupos -OH de varios tipos con varios grupos polares en interacciones intra- e intramoleculares, por el contrario, los grupos CH2- y CH3, están altamente definidos lo que establece escasas asociaciones apolares de estas fracciones.

Los picos a 1159, 1058, 838 cm-1 se atribuye a la vibración de estiramiento C–O–C, C–O y al carbono anomérico de D-glucopiranosa de la celulosa, lo que indica la presencia de celulosa en las fibras con GCGb. Es notorio para los tratamientos con GCGb, que las señales que corresponden a la celulosa muestran menor intensidad en relación al aumento de la concentración de los GCGb. El -OH de 1588 es una señal que puede ser atribuida a agua entre las cadenas de celulosa[22] La señal en 1422 indica deformación del plano CH y los picos a 1315 cm−1 se deben a la vibración simétrica de CH2[46].

CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio destacan la eficiencia del proceso de blanqueo del café mediante el tratamiento con H_2O_2. Este proceso logró eliminar la lignina y mejorar la organización de las fibras celulósicas, resultando en un aumento en el grado de cristalinidad. Además, se controlaron y estandarizaron las condiciones de operación del equipo de electrohilado, así como los parámetros de la solución Cell/PVA/GCGb. Los resultados preliminares muestran la obtención de fibras con mayor alineación y tamaño micrométrico. Se observó que la concentración del café influye en la viscosidad de las soluciones de celulosa y, por ende, en el diámetro de las fibras. Finalmente, se

concluye que la incorporación de granos de café es una alternativa viable y ecológica para combinar con las fibras de celulosa en el proceso de electrohilado.

BIBLIOGRAFÍA

1. S.M.K Thiagamani, R. Nagarajan, M. Jawaid, V. Anumakonda, S. Siengchin, "Waste Manag", Vol. 69, 2017, pp.445–454.
2. F.H Esther, P.S. Francisco, G.M. Lucila, "La producción y el consumo del café" ECORFAN-Spain. p.p. 1-224, ISBN 978-607-8324-49-1
3. J. Venugopal, & Ramakrishna, S.: "Applications of polymer nanofibers in biomedicine and biotechnology", Applied Biochemistry and Biotechnology, Vol.125, 2005, ISSN 0273-2289, pp. 147-157
4. W. Ji, Y Sun, Yang, F.; Van den Beucken, J.J.J.P.; Fan, M.; Chen, Z. & Jansen, J.A.: "Bioactive electrospun scaffolds delivering growth factors and genes for tissue engineering applications", Pharmaceutical Research, Vol. 28, 2011, ISSN 0724-8741, pp. 1259-1272
5. S. I. Mussatto, E. M. S. Machado: S. Martins: J. A. Teixeira IBB, "Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues", Institute for Biotechnology and Bioengineering, Centre of Biological Engineering, University of Minho, Campus de Gualtar.
6. A.S. Franca, J.C.F. Mendonça, S.D. Oliveira. "Composition of green and roasted coffees of different cup qualities" LWT Vol. 38, 2005, pp.709–715.
7. A. Farah, C.M. Donangelo, "Phenolic compounds in coffee". Brazilian Journal of Plant Physiology, Vol. 18,1, 2006, pp.23-36.
8. R. Pech-Kú, J. Clemente, F., P.García-Alamilla, R. García-Alamilla, "Impact of Nutrient Management on Coffee Secondary Metabolites and Sensory Attributes" Front Plant Sci Vol. 9 2018: pp. 123–137 DOI 10.3389/fpls.2018.00123
9. M.Lepelley, V.Cheynier, F. Breton, "Structural Basis for the Biosynthesis of the Major Coffee Alkaloid Caffeine" Adv Bot Res Vol. 52 2007: pp. 21–54
10. H. Ashihara, A.Monteiro, M., F. M. Gillies, "Biosynthesis of Caffeine in Leaves of Coffee" Plant Physiol Vol. 198 1996: pp. 334–339
11. M.Amarasinghe, H.Manthrithilake, M.Samad, "Effects of Shade Trees on Robusta Coffee Growth and Yield" Agrofor Syst Vol. 89 2015: pp. 365–378 DOI 10.1007/s10457-015-9803-9
12. L. Fassio, O., B.Bertrand, , Elbelt, S. "Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the "Effects of Environmental and Management Variation" Front Plant Sci Vol. 7 2016: pp. 945–961
13. S. Philpott, M., Arendt, W. J. Perfecto, I. "Biodiversity Loss in Latin American Coffee Landscapes: Review of the Evidence on Ants, Birds, and Trees" Conserv Biol Vol. 22 No. 5 2008: pp. 1093–1105
14. L.Zambolim, E. T. Caixeta, "Coffee-Associated Endophytes: Plant Growth Promotion and Crop Protection" Biology Vol. 9 No. 5 2020: pp. 23–45 DOI 10.3390/biology9050023
15. A.Charrier, J.Berthaud, "Sustainable Coffee Production: Origin, Botany, and Classification of Coffee" Oxford Res Encycl Agric Vol. 2 2018: pp. 112–128
16. S., Muthu Kumar, T., Rajini, N., Jawaid, M., Varada Rajulu, A., Winowlin Jappes, J.T.,. "Preparation and properties of cellulose/tamarind nut powder green composites". J. Nat. Fibers Vol. 15 (1), 2018, pp. 11–20,
17. U. Römling, Y. Michael Galperin, "Bacterial cellulose biosynthesis: diversity of operons, subunits, products, and functions", Trends in Microbiology, Vol. 23, 9, 2015, pp. 545-557,
18. T. Tabarsa, S. Sheykhnazari, A. Ashori, M. Mashkour, A. Khazaeian, "Preparation and characterization of reinforced papers using nano bacterial cellulose". International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 101, 2017 pp. 334–340.
19. D. Klemm, D. Schumann, F. Kramer. "Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application" Adv Polym Sci Vol. 205 2006: pp. 49–96

20. T. Tabarsa, S. Sheykhnazari, A. Ashori, M. Mashkour, A. Khazaeian, “Preparation and characterization of reinforced papers using nano bacterial cellulose”. International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 101, 2017 pp. 334–340.
21. M. Y. Hashim, M. N. Roslan, A. M. Amin, A. M. A. Zaidi, S. Ariffin, “Mercerization treatment parameter effect on natural fiber reinforced polymer matrix composite: a brief review,” World Acad. Sci. Eng. Technol., Vol. 68, 2012 pp. 1638–1644.
22. D. Klemm, D. Schumann, F. Kramer. “Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application” Adv Polym Sci Vol. 205 2006: pp. 49–96 DOI 10.1007/12_097
23. X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, “Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review,” J. Polym. Environ., Vol. 15, no. 1, 2007 pp. 25–33.
24. C. Pillai y P. Sharma, “Electrspinning of Chitin ans Chitosan Nanofibers”, Trends Biomater, Vol. 22, nº 3, pp. 179-201, 2009.
25. Y. Huang, X. Zhang, "Electrospun Nanofibers: Fabrication, Characterization, and Applications", Journal of Materials Chemistry, Vol. 22, 2012, pp. 1093-1101.
26. J. Li, W. Wang, "Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Drug Delivery: Theoretical and Experimental Insights", International Journal of Pharmaceutics, 438, 2012, pp. 22-30
27. A. Greiner, J. H. Wendorff, "Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers", Angewandte Chemie International Edition, Vol. 46, 2007, pp. 5670-5703.
28. D. Li, Y. Xia, "Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?", Advanced Materials, 16, 2004, pp. 1151-1170.
29. S. Ramakrishna, K. Fujihara, W. E. Teo, T. C. Lim, Z. Ma, "An Introduction to Electrospinning and Nanofibers", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 5, 2005, pp. 2034-2045.
30. X. Wang, Y. Ding, M. Li, J. M. H. Soboyejo, "Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review", Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, Vol. 102, 2014, pp. 235-248.
31. C. J. Buchko, L. C. Chen, Y. Shen, D. C. Martin, "Processing and Microstructural Characterization of Porous Biocompatible Protein Polymer Thin Films", Polymer, Vol. 40, 1999, pp. 7397-7407.
32. J. Doshi, D. H. Reneker, "Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers", Journal of Electrostatics, Vol. 35, 1995, pp. 151-160.
33. A. L. Yarin, E. Zussman, "Upward Needleless Electrospinning of Multiple Nanofibers", Polymer, Vol. 45, 2004, pp. 2977-2980.
34. Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, "A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites", Composites Science and Technology, Vol. 63, 2003, pp. 2223-2253.
35. A. Khenblouche, D. Bechki, M. Gouamid, K. Charradi, L. Segni, M. Hadjadj, S. Boughali. “Extraction and characterization of cellulose microfibers from Retama raetam stems. Polímeros: Ciência e Tecnologia”, Vol. 29(1) 2019,
36. L. Youn-Mook, G. Hui-Jeong, P. Gwon Joon y N. Young-Chang, “Preparation of cellulose-based nanofibers using electrospinning,” Korea, 2010.
37. D. Klemm , H.-P. Schmauder y T. Heinze, “Cellulosa, Biosyntesis”, pp. 277-289.
38. M. Granstrom, “Cellulose Derivatives: Synthesis, Properties and Applications”, Helsinki: University of Helsinki, 2009.
39. R. S. Dueñas, “Obtencion de pulpas y propiedades de las fibras para papel”, Guadalajara: Universidad de Guadalajara., 1997.
40. H. Niu, X. Wang y T. Lin, “Needleless Elecctrospinning: Developments and Perfomances”, Researchgate, pp. 16-31, 2014.
41. L. Youn-Mook, G. Hui-Jeong, P. Gwon Joon y N. Young-Chang, “Preparation of cellulose-based nanofibers using electrospinning” Korea, 2010.
42. H. Mansur, C. Sadahira, C. Souza y A. Mansur, “FTIR espectroscopy chaaracterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel whit diferents hydrolisis degree and chimecally crosslinked with grutaraldehyde”, Material Science Engineering., Vol. 28, nº 4, pp. 539-548, 2008.
43. J. Clarke y E. Blout, “Nature of the carbonyl groups in polyvinyl alcohol”,Journal of Polymer Science, vol. 1, nº 15, pp. 419-428, 1946.

44. M. Taghizadeh, N. Yeganeh y M. Rezaei, “The investigation of thermal decomposition pathway and products of poly(vinyl alcohol) by TG-FTIR”, Journal of Applied Polymer Science,, Vol. 132, nº 25, 2015.

ANÁLISIS A FLEXIÓN DE UNA TRABE DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Jatziri Yunuén Moreno Martínez, Arturo Galván Chávez, Hiram Arroyo Chávez, y Otoniel Palacios Hernández

Universidad de Guanajuato.
jatziri.moreno@ugto.mx

RESUMEN

Las estructuras de concreto reforzado son utilizadas ampliamente en la construcción de edificios, puentes, presas, plantas nucleares, etc. Sin embargo, debido a sus estados de carga pueden presentar un comportamiento complejo aunado a la naturaleza compuesta del material. Una alternativa para evaluar la respuesta de estos elementos es utilizar el recurso de análisis con elemento finito, el cual ha ido avanzando en cuanto a métodos de modelación. Esta investigación se centra en la modelación numérica en 3D de una trabe de concreto reforzado sujeta a flexión bajo carga estática usando el Método de Elemento Finito, la precisión del modelo se validó con una prueba experimental carga-deflexión extraída de la literatura, para su posterior comparación. Se modeló una cuarta parte de la trabe debido a la simetría de esta, la carga se aplicó en una placa de acero a lo largo de una línea central. El modelo toma en cuenta las hipótesis que involucran el agrietamiento bajo el enfoque del agrietamiento difuso el cual toma en cuenta la influencia de la no linealidad del material. Para el concreto se utilizaron elementos finitos en 3D isoparamétricos que tienen la capacidad de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión, el criterio de falla es descrito por la formulación de Willam y Warnke, también se utilizó el criterio de Drucker Prager para considerar las deformaciones plásticas del material. La modelación del acero de refuerzo a flexión y cortante fue usando elementos barra es decir una modelación de forma discreta considerando la curva de endurecimiento isotrópico multilineal obtenida de pruebas de laboratorio. La simulación numérica mediante el Método de Elemento Finito permitió evaluar el desarrollo del agrietamiento y mostró buena aproximación con la curva experimental carga-deflexión validando con ello la confiabilidad del modelo.

INTRODUCCIÓN

La capacidad de utilizar el concreto reforzado en las estructuras se basa en la ventaja de combinar el concreto que resiste esfuerzos de compresión y el acero dúctil en tensión. Existen diversos programas capaces de reproducir el comportamiento de estructuras de concreto reforzado como es Atena (2021), Diana 9.0 (2008), Ansys 16.2 (2006) entre otros los cuales utilizan la herramienta del elemento finito. Existen dos enfoques más comunes para un análisis representativo en la modelación de grietas que ocurren por la naturaleza del material de concreto que son la grieta discreta y la grieta difusa. El enfoque de la grieta discreta representa la grieta como una separación de nodos. Cuando los esfuerzos o las deformaciones en un nodo, o el promedio en elementos adyacentes, excede un valor dado, el nodo es redefinido como dos nodos y los elementos de cada lado pueden separase. Skrikerud y Bachmann (1967), realizaron un procedimiento para considerar el inicio, extensión, apertura, cierre y reapertura de grieta que experimentó la presa de Koyna debido a un evento sísmico en 1967. Los resultados mostraron la importancia del refinamiento y orientación de la malla. En la grieta difusa (Zienkiewicz et al. 1980, Norman y Anderson 1985, Mlakar 1987) la modelación es en un sentido promedio, de manera apropiada, se modifica las propiedades del material en los puntos de integración de elementos finitos regulares. Si la energía por deformación liberada por este ablandamiento es igual a la energía por deformación liberada por una grieta discreta abierta, entonces el comportamiento estructural global será el mismo cuando la energía de deformación es redistribuida. Las grietas difusas son convenientes cuando las orientaciones de las grietas no son conocidas de antemano, porque la formación de una grieta no implica remallar o nuevos grados de libertad.

El objetivo de esta investigación es realizar un modelo de elementos finitos para el análisis de una trabe sujeta a carga estática, demostrar la capacidad de reproducir una prueba experimental y obtener los patrones de agrietamiento observados mediante el enfoque del agrietamiento difuso.

PRUEBA EXPERIMENTAL

La trabe de concreto reforzado para la modelación fue tomada de la literatura del trabajo experimental de Buckhouse (1997), la prueba de la trabe se muestra en la Figura 1 y las dimensiones en la Figura 2. Las propiedades del material de concreto son: módulo de elasticidad E= 27.23 GPa, se asumió un comportamiento elástico a compresión, un coeficiente de Poisson ν=0.2, esfuerzo de tensión uniaxial $\boldsymbol{\sigma_u}$= 3.59 MPa, coeficiente de transferencia de corte para grieta abierta 0.3 y de grieta cerrada de 1. Las propiedades de la placa de apoyo y de aplicación de la carga son: E= 200 GPa, ν=0.3.

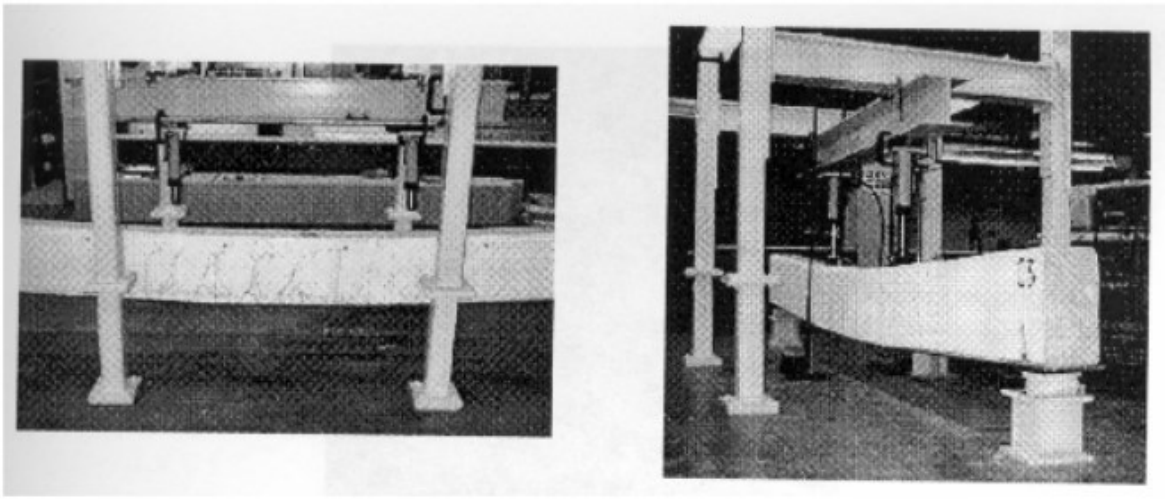


Figura 1. Marco de carga para la trabe de concreto reforzado, Buckhouse (1997)

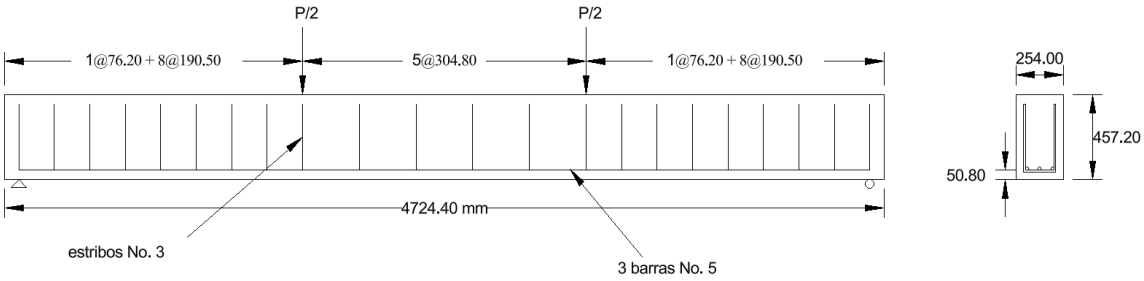


Figura 2. Dimensiones (unidades milímetros) y características del refuerzo de la trabe sometida a dos cargas concentradas de modo simétrico, Buckhouse (1997)

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar la simulación numérica se utilizó el Método de Elementos Finitos muy conocido como herramienta en la mecánica estructural. Los modelos de elementos finitos se desarrollaron en el software Ansys 16.2, el material de concreto se modeló mediante el elemento Solid65 (Figura 3), consta de un hexaedro de ocho nodos con ocho puntos de integración capaz de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión. El modelo constitutivo para el concreto es el propuesto por William y Warnke (1975).

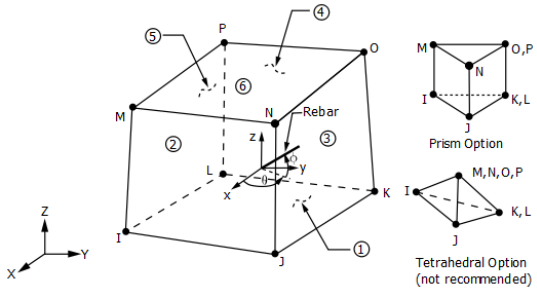


Figura 3. Geometría del elemento solid65, Ansys 16.2

Se asume que el material es inicialmente isotrópico, el agrietamiento es permitido en sus tres direcciones ortogonales y se modela mediante un ajuste de las propiedades del material el cual efectivamente trata el agrietamiento como una banda de grieta difusa, en lugar de grietas discretas, también el elemento Solid65 permite introducir acero de refuerzo en forma de cuantía en caso de ser requerido (Figura 3).

Para poder especificar la superficie de falla que se muestra en la Figura 4 es necesario definir cinco parámetros de resistencia: la resistencia a tensión uniaxial (f_t), la resistencia a compresión uniaxial (f'_c), la resistencia a compresión biaxial (f'_{cb}), el estado de esfuerzos hidrostáticos ambientales ($\boldsymbol{\sigma_h^a}$), la resistencia a compresión última para un estado de compresión biaxial, sometida a un estado de esfuerzos hidrostáticos (f_1) y la resistencia a compresión última para un estado de compresión uniaxial, sometida a un estado de esfuerzos hidrostáticos (f_2).

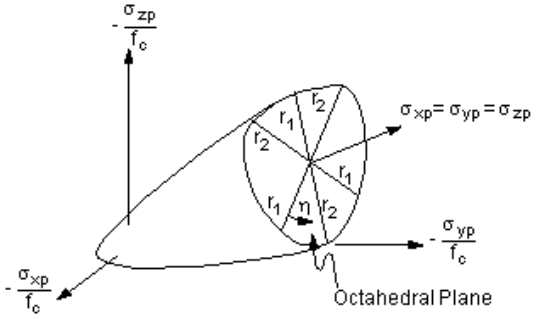


Figura 4. Superficie de falla, Ansys 16.2

El comportamiento a tensión del concreto se deriva del criterio del esfuerzo máximo de tensión, $\boldsymbol{R^t}$ que es el módulo secante que define la resistencia para la condición de agrietamiento; la constante $\boldsymbol{T_c}$ es un factor de reducción que toma en cuenta la relajación del máximo esfuerzo de tensión $\boldsymbol{f_t}$; este valor puede ir desde un valor por defecto de 0.6 hasta 1.00 (Figura 5).

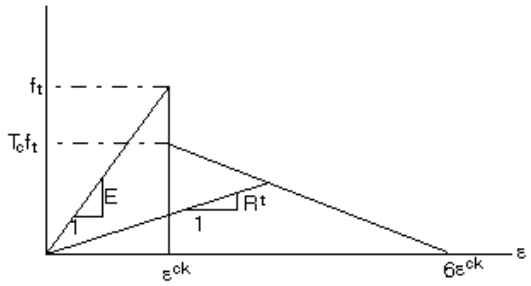


Figura 5. Relajación del esfuerzo de tensión, Ansys 16.2

La presencia de una grieta en un punto de integración es representada a través de la modificación de la relación esfuerzo-deformación mediante la introducción de un plano débil en la dirección normal

a la cara de la grieta. De la misma manera, es posible escribir la matriz de esfuerzo-deformación para el agrietamiento en dos y tres direcciones.

Para modelar el acero de refuerzo de manera discreta se utilizó el elemento Link8 introduciendo la relación esfuerzo-deformación que puede ser usado para modelar el estado de esfuerzos uniaxial idealizado como una función multilineal y se consideró adherencia perfecta entre la barra de acero y el concreto, el esquema de las consideraciones para la orientación de la barra se muestra en la Figura 6.

El acero de refuerzo longitudinal y transversal fue modelado discretamente usando el elemento barra LINK8-3D introduciendo un modelo de endurecimiento isotrópico multilineal. El criterio de fluencia de Von Mises fue usado para describir el comportamiento plástico.
Considerando que la viga tiene simetría con respecto a dos planos se simuló la cuarta parte y se colocaron las condiciones de frontera para los planos de simetría como se muestra en la Figura 7a, así como la aplicación de la carga en la Figura 7b. El análisis es dividido en una serie de incrementos de pasos de carga usando el lenguaje de diseño paramétrico (APDL). Se uso el método de Newton-Raphson.

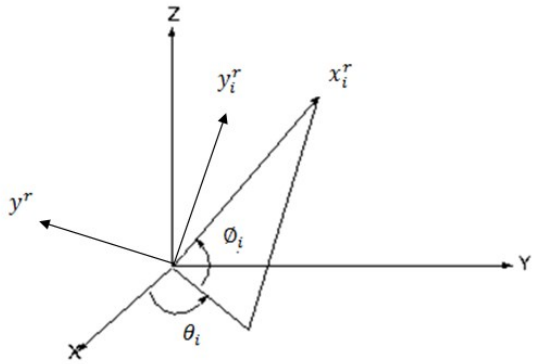


Figura 6. Orientación del refuerzo, Ansys 16.2

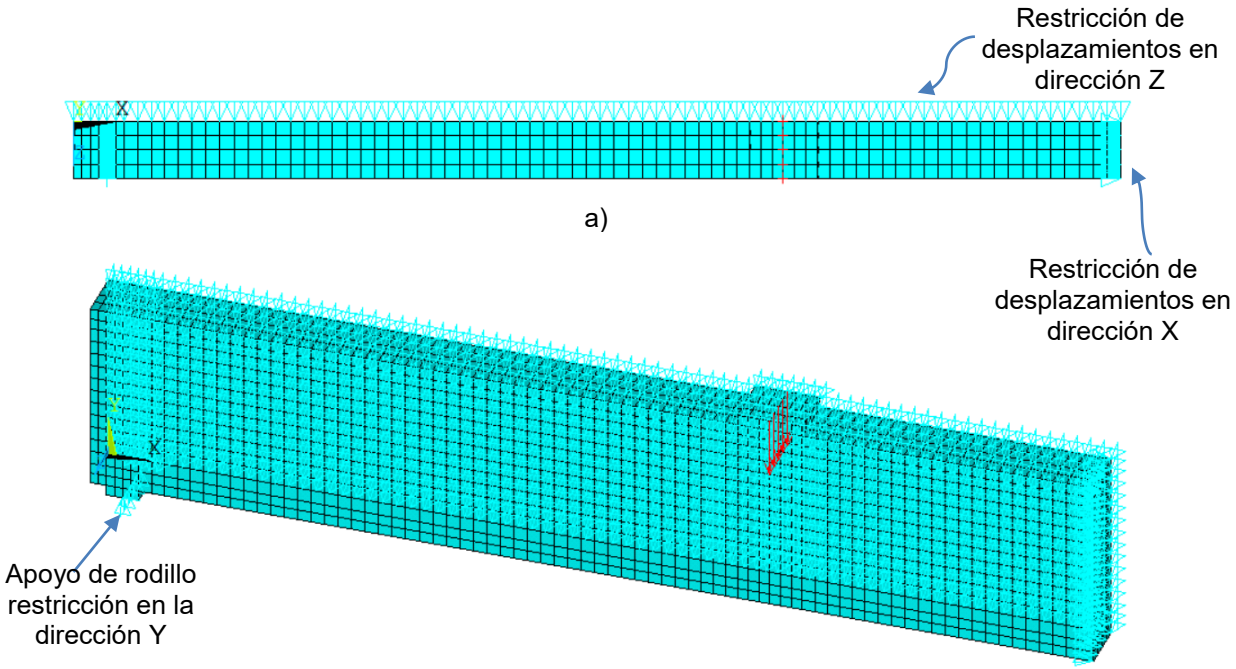


Figura 7. Condiciones de frontera y aplicación de la carga (Ansys16.2): a) vista en planta; b) vista isométrica

Se colocaron placas una para el apoyo y otra para la aplicación de la carga correspondiente. En el apoyo se restringieron los desplazamientos verticales, es decir la dirección Y para simular un rodillo que permite la capacidad de rotación del elemento. También se restringieron los desplazamientos en la dirección Z.

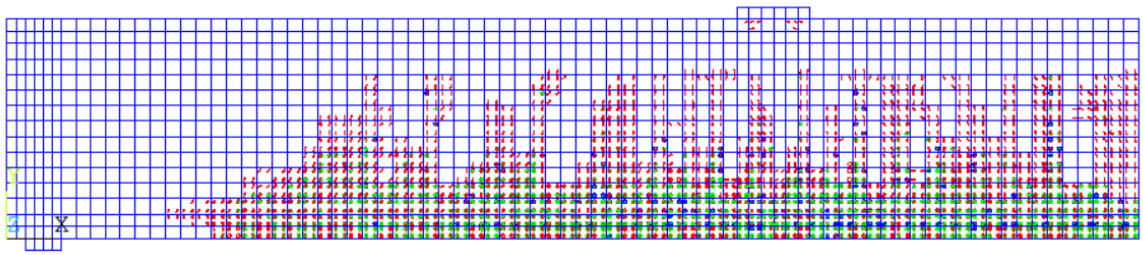


Figura 8. Patrones de agrietamiento

Los patrones de agrietamiento se muestran en la Figura 8, se observan grietas debidas a flexión, por tensión diagonal y compresión. El agrietamiento aumenta en las regiones de momento constante, la respuesta en la región no lineal ocurre a medida que se aplica carga que supera el comportamiento lineal.

RESULTADOS

La respuesta del modelo en la obtención de la curva carga-deflexión en los puntos de control brinda una buena aproximación considerando la etapa elástica e inelástica. En la curva de la Figura 9 se puede apreciar que el primer agrietamiento se presenta a una carga de 23 kN tal como se reporta en la prueba experimental.

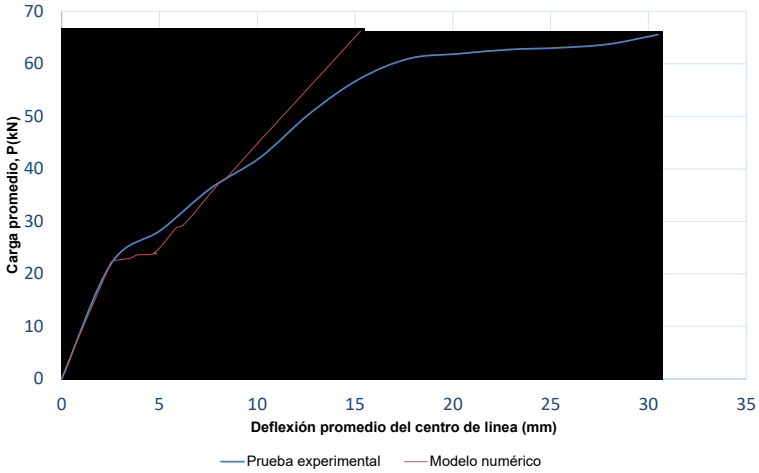


Figura 9. Curva Carga-Deflexión

Para obtener más puntos en la curva del modelo se requiere tomar en cuenta la variación de la velocidad de aplicación de la carga. Sin embargo, para fines de diseño podemos considerar como razonable el valor encontrado en el modelo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del modelo numérico muestran buena correlación con la curva carga-desplazamiento de la prueba experimental, se logró reproducir el agrietamiento en la etapa de carga

considerada. La propuesta de reproducir pruebas experimentales ayuda a realizar nuevas consideraciones que favorezcan el comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado partiendo de entender las particularidades de la modelación. El Método de Elemento Finito proporciona información sobre el comportamiento del material y puede ser aplicado a numerosos problemas de mecánica aplicada con elementos isoparamétricos en tres dimensiones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ansys, “Ansys User´s Manual version 16.2, ANSYS”, Inc. Canonsburg, Pennsylvania 2006.
2. C. D. Norman y F. A. Anderson, “Reanalysis of Cracking in Large Concrete Dams in the U.S. Army Corps of Engineers”, Proc. 15th Int. Conference on Large Dams, Question 57, 1985, Lausanne, Switzerland.
3. Diana, “Diana 9.0: Finite element analysis”, TNO DIANA BV, Holanda 2008.
4. E. R. Buckhouse, “External Flexural Reinforcement of Existing Reinforced Concrete Beams Using Bolted Steel Channels”, Master’s Thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin 1997.
5. K.J. Willam, y E.P. Warnke, “Constitutive model for the triaxial behavior of concrete”, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, 1975, pp. 1-30.
6. O. C. Zienkiewicz, E. Hinton, N. Bicanic y P. Fejzo, “Computational Models for the Transient Dynamic Analysis of Concrete Dams”, Dams and Earthquake, Inst. of Civil Engineers, London 1980.
7. P. E. Skrikerud, y H. Bachmann, “Discrete Crack Modelling for Dynamically Loaded, Unreinforced Concrete Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, 1986, pp. 297-315.
8. P. F. Mlakar, “Nonlinear Response of Concrete Gravity Dams to Strong Earthquake-Induced Ground Motion”, Computers and Structures, Vol. 26, 1987, pp.165-173.
9. V. Červenka, L. Jendele, J. Červenka, “ATENA Program Documentation–Part 1: Theory. Červenka Consulting Sro”, 2021.

PREDICCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

López Morales Braulio1; Ledesma Carrillo Luis Manuel[2]; Salazar Colores Sebastián[3].

[1]Universidad de Guanajuato, [2]Universidad de Guanajuato, [3]CIO,
b.lopezmorales@ugto.mx[1]; lm.ledesma@ugto.mx[2]; sebastian.salazar@cio.mx[3]

RESUMEN

Los accidentes de tránsito figuran como una de las principales amenazas diarias para la vida humana a nivel mundial, representando una pérdida aproximada de 1.3 millones de vidas anuales en el mundo. En lo que respecta a nuestro país, los decesos de este tipo figuran entre las primeras causas de muerte en los mexicanos, reportando un total de 5,181 víctimas mortales tan solo en el transcurso del año 2022. Por lo anterior, en el presente trabajo se implementaron dos herramientas de inteligencia artificial por separado para evaluar su precisión: un modelo de Regresión Lineal Múltiple (RLM) y un Perceptrón Multicapa (MLP por sus siglas en inglés) con el propósito de generar un modelo capaz de predecir la cantidad de víctimas mortales e identificar las principales causas que contribuyen mayormente a la tasa de mortalidad en este tipo de accidentes. Para ello, se tomó en consideración los registros de accidentes ocurridos en México disponibles hasta hoy en día, correspondientes al periodo 2020 - 2022, con datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Con base en dichos registros se estipuló un modelo de 18 variables independientes relacionadas con los accidentes, logrando predecir la cantidad de decesos con un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.0028 en el caso del RLM y un ECM de 0.0179 por parte del MLP, permitiendo observar mediante un análisis de correlación, las principales causas involucradas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los accidentes de tránsito figuran como uno de los principales peligros para la vida humana, representando elevados índices de mortandad y lesiones en los involucrados (Sameen & Pradhan, 2017)(Park et al., 2016). En México, los registros indican que tan solo en el año 2022, en un total de 377,231 accidentes 5,181 personas perdieron la vida y 91,501 resultaron lesionadas; mientras que para el periodo 2020-2022 las cifras de decesos reportados fueron de 13,408 víctimas en un total de 1,019,324 accidentes (Ihueze & Onwurah, 2018; INEGI, 2022c, 2022d, 2022a, 2022b).

Una de las maneras más efectivas para reducir las tasas de accidentes y sus víctimas mortales es mediante su predicción (Park et al., 2016)(Zhang et al., 2020) con propósito de generar contramedidas que sirvan como advertencia a los usuarios sobre los peligros que implican las actividades de tránsito (Ihueze & Onwurah, 2018), contribuyendo así a la mitigación de su ocurrencia y daños.

Las causas relacionadas con la generación de accidentes pueden ser muy variadas y complejas, diversos estudios han catalogado estas según su tipología en (Touahmia, 2018): usuarios de las vías de tránsito, fallas vehiculares, condiciones de las vías, condiciones del ambiente, conductuales (Parker et al., 1995) y las formas en como estos interactúan (Touahmia, 2018); causas que fungen como determinantes en la ocurrencia y letalidad de los accidentes, las cuales es posible integrar como variables en un modelo predictivo que permita pronosticar la cantidad de víctimas, y brinde información para la toma de decisiones en cuestión de generación de esfuerzos y políticas con propósito de reducir las cifras de mortandad.

TEORÍA

Modelo de Regresión Lineal Múltiple.

Dentro del análisis estadístico de conjuntos de datos, la estimación de relaciones entre variables es a menudo necesaria con propósito de comprender la naturaleza de los fenómenos estudiados, ya sea de manera "explicativa o predictiva" (Moral Peláez, 2016).

"La regresión es una técnica estadística que permite evaluar la relación entre una variable dependiente, respecto a otras variables en conjunto independientes" (Moral Peláez, 2016), en forma de una función matemática.

Se dice que "existe regresión de los valores de una variable con respecto a los de otra, cuando hay alguna línea, que se ajusta más o menos claramente a los valores observados" (Dagnino S., 2014). De este modo, esta función matemática es capaz de ofrecer información sobre dicha relación, por ejemplo, "la magnitud de la correlación; el incremento marginal, el valor de una de ellas cuando la otra es cero y si dicha relación puede considerarse significativa o fuerte (distinta de una relación normal) o, no significativa o débil (similar a una relación normal)"(Montero Granados, 2016).

En el modelo de regresión lineal múltiple esperamos que los sucesos tengan una forma funcional como la ecuación [I]:

$$\boldsymbol{y_j = b_0 + b_1\, x_{1j} + b_2\, x_{2j} + \cdots + + b_k\, x_{kj} + \varepsilon_j}\ [\boldsymbol{I}]$$

Donde y es la variable dependiente, x son las variables independientes, ε los residuos y b los coeficientes estimados del efecto marginal entre cada x e y.

Correlación de Pearson.

La correlación de Pearson se calcula como "el cociente entre la covarianza y el producto de la desviación estándar de cada variable" (Palacio, 2020) [II]:

$$\boldsymbol{r = \frac{S_{jk}}{S_j S_k} = \frac{\sum\left(X_{ij} - \overline{(X_j)}\right)\left(X_{ik} - \overline{(X_k)}\right)}{\sqrt{\left(\sum\left(X_{ij} - \overline{(X_j)}\right)\right)^2}\sqrt{\sum\left(X_{ik} - \overline{(X_k)}\right)^2}}}\ [\boldsymbol{II}]$$

Donde $\overline{(X_j)}$ y $\overline{(X_k)}$ son las medias de las variables j y k, respectivamente. Un valor igual a 0 indica que no hay correlación (variables independientes), mientras que un coeficiente de 1 indica una dependencia lineal perfecta entre las variables y un coeficiente de -1 simboliza una dependencia lineal inversamente perfecta entre las variables. Al igual que la matriz de covarianzas, la matriz de correlación de Pearson permite la visualización de la magnitud y sentido de las relaciones entre variables.

Correlación de Spearman.

La correlación de Spearman, es una herramienta estadística que estima el nivel de asociación o dependencia existente entre dos variables cuantitativas. La fórmula para el cálculo de los coeficientes de correlación de Spearman está dada por (Mendivelso, 2021) [III]:

$$\boldsymbol{r_s = 1 - \frac{6\sum(x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)}}\quad [\boldsymbol{III}]$$

Donde x_j es el rango de sujetos i con respecto a una variable, y_i el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable y n la cantidad de sujetos que se clasifican.

Funciones de Coste.

También conocidas como funciones de error o funciones de pérdida, las funciones de costo "cuantifican el error que presenta un modelo entre los datos predichos por un algoritmo y los datos objetivo" (Timaná Yarleque, 2021), razón por la cual, "estas funciones juegan un importante papel en el desarrollo y mejora del rendimiento de algoritmos de aprendizaje de máquina" (Wang et al., 2022).

La función de coste más común es el Error Cuadrático Medio o también conocido como ECM o MSE, por sus siglas en inglés, se define como "la suma de los cuadrados de los residuos entre los valores reales y los valores predichos por el modelo" (Timaná Yarleque, 2021) [IV]:

$$\boldsymbol{MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad [IV]}$$

Donde $\hat{y}_i$ hace referencia a los valores predichos por el modelo y y_i a los valores reales u objetivos, mientras que n hace referencia al total de datos.

Perceptrón Multicapa.

Las técnicas basadas en redes neuronales artificiales "han sido ampliamente reconocidas como poderosas herramientas en la minería de datos" (Féraud & Clérot, 2002) para la evaluación y reconocimiento de patrones y tareas de clasificación y predicción. El mecanismo de estas herramientas computacionales asemeja el proceso de aprendizaje humano fundamentado en las interconexiones neuronales.

Su forma computacional básica de actuación normalmente consta de "un conjunto de datos a procesar, un grado de interconexión, mensajes simples escalares y una conexión adaptativa entre los elementos" (Abdullah et al., 2007).

El modelo del perceptrón, propuesto inicialmente por Rosenblatt en 1950 es una representación computacional del sistema de aprendizaje biológico. Una variante de este modelo es el perceptrón multicapa (Figura 1), "caracterizado por tener una o más capas ocultas entre las capas de entrada y las capas de salida, cuyo número de neuronas en la capa de entrada es igual al número de medidas realizadas sobre un problema, mientras que el número de neuronas en la capa de salida es igual al número de clases" (Ramchoun et al., 2016). De esta manera, mediante un proceso de aprendizaje iterativo, la estructura neuronal artificial "adaptará los pesos asignados en sus conexiones para minimizar la diferencia entre las salidas emitidas por la red y las salidas deseadas" (Ramchoun et al., 2016).

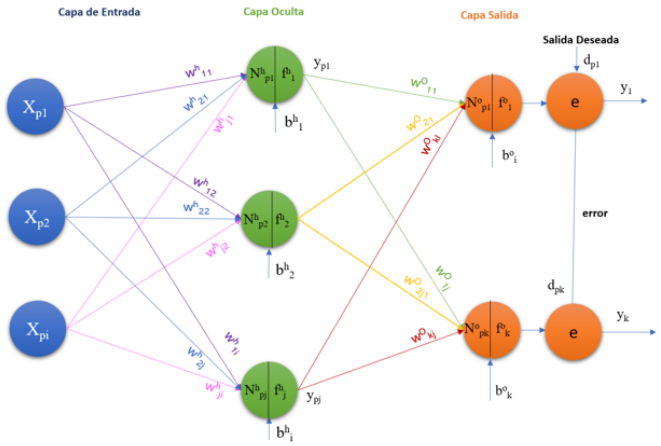


Figura 1. Representación esquemática de la estructura básica de un Perceptrón Multicapa.

Con base en las herramientas citadas, es posible plantear el uso de estas técnicas matemático-estadísticas como lo son la RLM y el MLP para atender la problemática referente a los altos índices de víctimas mortales en accidentes de tránsito de manera predictiva, permitiendo identificar las variables con mayor repercusión en los índices de decesos.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del modelo de predictivo capaz de estimar la cantidad de víctimas mortales en México, se siguió el proceso metodológico mostrado en la Figura 2, constituyendo primeramente una base de datos con registros oficiales según la entidad gubernamental INEGI, de donde se consiguió un concentrado de 96 registros, para las variables mostradas en la Tabla 1.

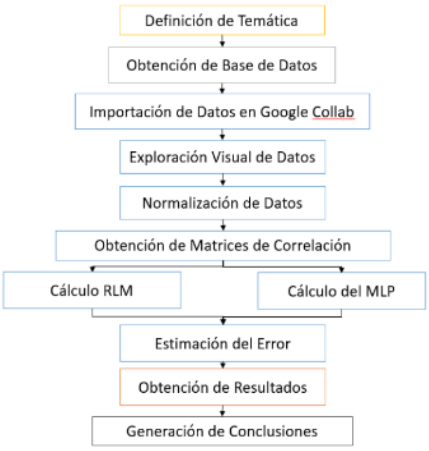


Figura 2. Esquema metodológico.

Tipo de Variable	Categoría	Variable
Independiente	Geografía	Entidad
	Fecha	Año
	Gravedad	Total de Eventos Fatales No fatales Solo daños
	Por Causa	Conductor Vehicular Condiciones del Camino Otras
	Por tipo de Accidente	Colisión con vehículo Colisión con peatón Colisión con animal Colisión con objeto Volcadura Caída de pasajero Salida del camino Incendio Colisión con ferrocarril Colisión con motociclista Colisión con ciclista Otros
Dependiente		Cantidad de víctimas mortales

Tabla 1. Listado de variables independientes y dependiente.
Posteriormente, haciendo uso del lenguaje de programación Python mediante el entorno de un cuaderno en Google Colab, se procedió a importar los datos mediante el uso de la librería “pandas”. Una vez cargados los datos en el entorno, se realizó una comprobación de su adecuada importación, mediante la impresión de los encabezados de la tabla importada (Figura 3), constatando así la correcta interpretación de filas y columnas.

	Victimas Mortales	Cod. Entidad	Año	TotalEventos	Fatal	No Fatal	\
0	76	1	2020	4173	69	1092	
1	99	2	2020	12706	93	1791	
2	36	3	2020	2633	31	609	
3	32	4	2020	3006	29	685	
4	75	5	2020	10574	72	2241	

	SoloDaños	Conductor	Peaton	FallaVehiculo	...	ColisionAnimal	\
0	3012	4040	51	12	...	16	
1	10822	12294	165	72	...	2	
2	1993	2559	26	34	...	12	
3	2292	2936	6	35	...	11	
4	8261	10206	137	141	...	5	

	ColisionObjeto	Volcadura	CaidaPasajero	SalidaCamino	Incendio	\
0	1235	49	26	124	0	
1	2244	322	8	434	1	
2	312	89	28	70	0	
3	220	46	7	103	1	
4	1516	206	22	78	0	

	ColisionFerrocarril	ColisionMotociclista	ColisionCiclista	Otros
0	12	474	86	25
1	4	560	117	58
2	0	237	27	12
3	0	965	52	48
4	5	1186	173	98

[5 rows x 24 columns]

Figura 3. Impresión de Encabezados de los datos cargados.

Enseguida se realizó una exploración visual gráfica de la comparativa de cada una de las variables independientes respecto a la variable dependiente (Figura 4) con propósito de explorar el comportamiento de los datos, su distribución y valores, mismos que fueron normalizados en consideración de su valor máximo y mínimo en una escala de 0 a 1, para facilitar su manejo y la ejecución de las operaciones posteriores.

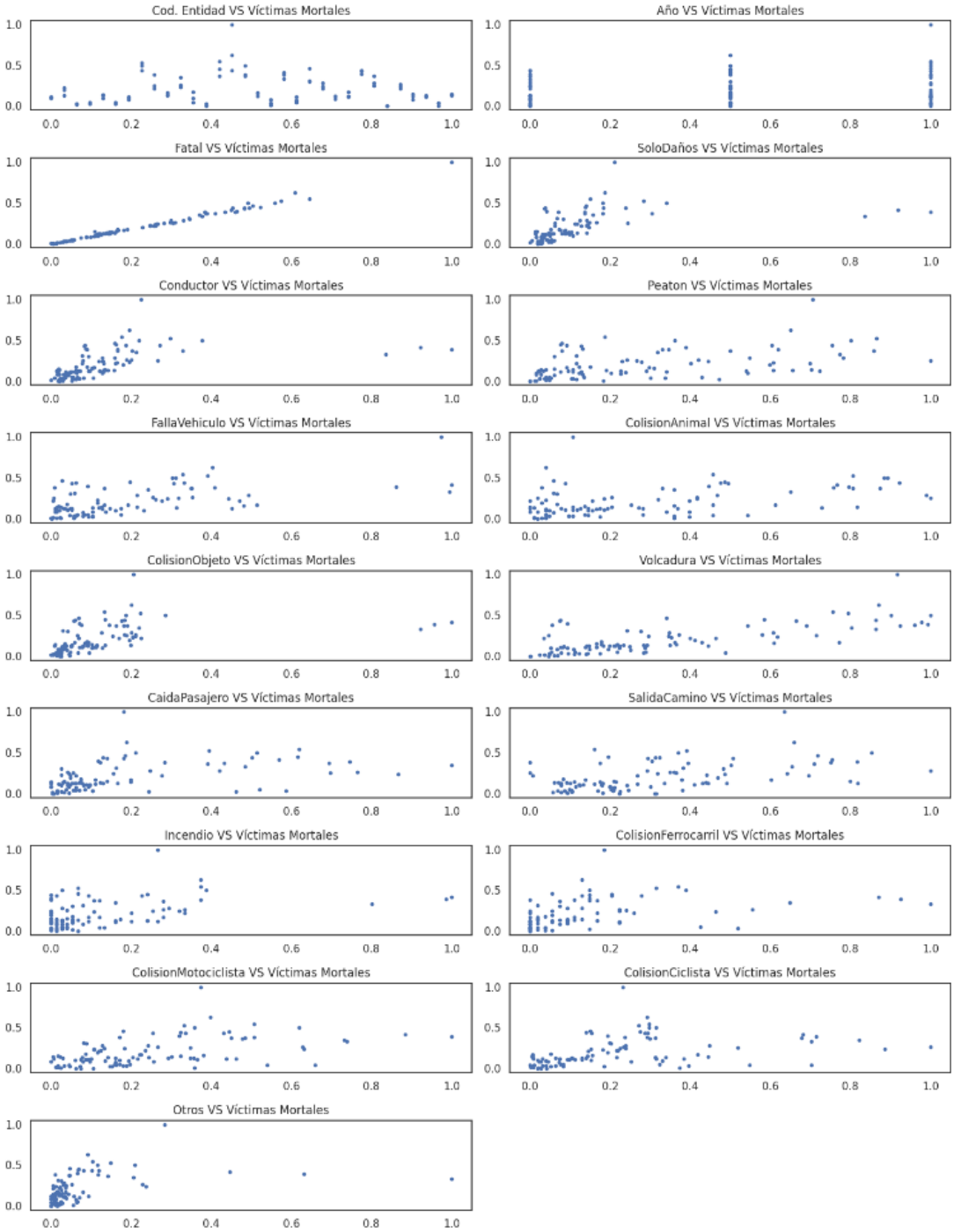


Figura 4. Gráficos de variables con datos normalizados.

Posteriormente se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman mismos que se proyectaron en un mapa de calor para de facilitar su interpretación e identificar la existencia de linealidad o no linealidad entre las variables.

Finalmente, y de manera paralela se procedió a calcular los modelos propuestos bajo la configuración experimental mostrada en la Tabla 2, así como la arquitectura neuronal mostrada en la Figura 5. Para evaluar el rendimiento de estas técnicas se hizo uso del ECM como función de

costo para ambos modelos, seccionando el conjunto de registros en una relación de 60-20-20 para generar los subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, respectivamente.

Configuración Experimental del RLM y MLP		
Hiperparámetros	RLM	MLP
Épocas de Aprendizaje	400	100
Tasa de Aprendizaje	0.05	0.001
Total de Parámetros		1601
Tamaño de lote		8
Indicador	ECM	ECM

Tabla 2. Configuración de hiperparámetros empleados para el RLM y MLP.

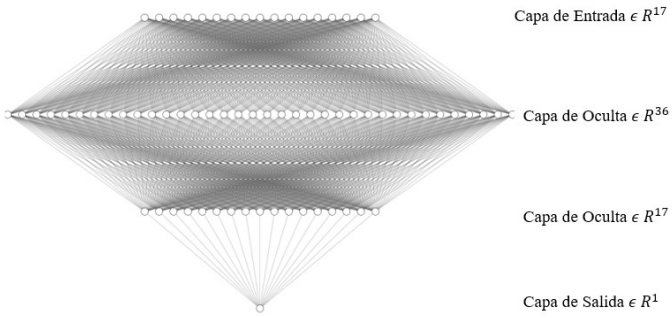


Figura 5. Esquema gráfico del diseño del MLP empleado.

RESULTADOS

Siguiendo la metodología estipulada, en lo que respecta al desarrollo del RLM, fue posible realizar las predicciones mostradas en la Figura 6, en la cual se muestran en azul los datos reales provenientes de la base de datos, mientras que en color rojo con el símbolo de cruces aparecen los datos predichos para el modelo para cada uno de los registros. Obteniendo un ECM de 0.0028 mediante la obtención de un modelo matemático cuyos coeficientes aparecen en la Tabla 3.

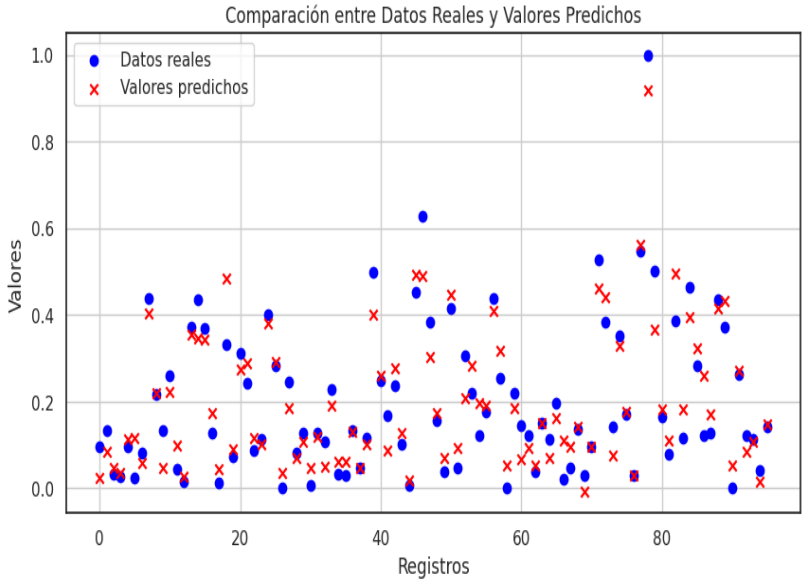


Figura 6. Comparación gráfica entre datos reales y datos predichos por el modelo propuesto.

Coeficiente	Valor
b_0	-0.00762239
b_1	0.05311915
b_2	0.0202367
b_3	0.74469978
b_4	-0.16864836
b_5	0.13025943
b_6	0.07836527
b_7	0.17893517
b_8	-0.04658387
b_9	0.09810263
b_{10}	-0.18150228
b_{11}	0.3041991
b_{12}	-0.04165534
b_{13}	0.04565198
b_{14}	-0.33885487
b_{15}	0.12736507
b_{16}	-0.15161468
b_{17}	-0.15161468

Tabla 3. Coeficientes calculados para el modelo de regresión.

Mientras que, de manera paralela se diseñó una arquitectura neuronal cuyo diseño se muestra en la Tabla 4 y Figura 5, que una vez entrenada bajo los parámetros expuestos en la Tabla 2, consiguió un nivel de predicción bajo un ECM en el conjunto de datos de prueba de 0.0179.

Capa (Tipo)	Neuronas	No. Parámetros
Entrada (Densa)	17	306
Oculta (Densa)	36	648
Oculta (Densa)	17	629
Salida (Densa)	1	18

Tabla 4. Estructura de la red neuronal.

En resumen, luego de implementar ambos modelos de inteligencia artificial con un enfoque predictivo en la tasa de víctimas mortales, los índices de ECM denotaron un mejor rendimiento por parte de la técnica RLM, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.

Índice de ECM Obtenido	
RLM	MLP
0.0028	0.0179

Tabla 5. Resumen de índices de E.C.M. obtenidos de los modelos.

Como parte del proceso, se calcularon también las matrices de correlación de Pearson y Spearman mostradas en los mapas de calor de la Figura 7 y Figura 8 respectivamente, con propósito de identificar y corroborar entre ambas matrices las principales relaciones existentes y su tipo, entre las variables que integran el modelo.

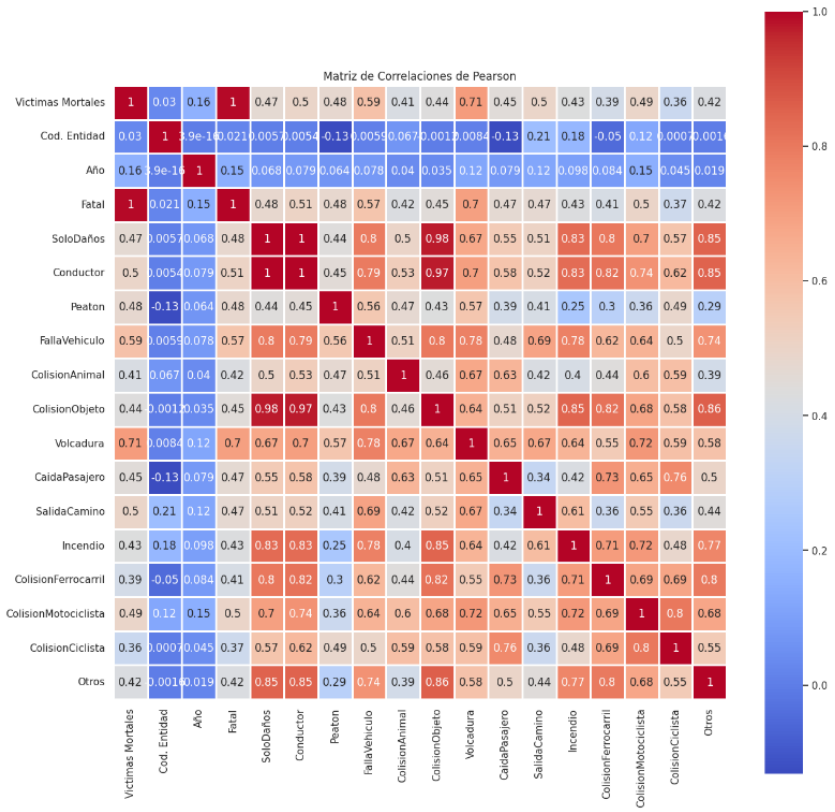


Figura 6. Matriz de correlación de Pearson.

Analizando la matriz de correlación de Pearson, se pueden inferir las siguientes observaciones sobre las variables que integran el modelo:

- La fatalidad del accidente posee una relación linealmente perfecta con la generación de víctimas mortales, debido a la letalidad del accidente.
- El tipo de accidente que supone un mayor riesgo en la generación de pérdida de vidas humanas de acuerdo con los registros es por volcaduras, poseyendo un coeficiente de 0.71 en relación con las víctimas mortales, por lo cual, supone una variable que atender con propósito de mitigar la ocurrencia y riesgos de volcaduras.
- La segunda variable causal con mayor impacto en la generación de víctimas mortales son las fallas vehiculares, teniendo una notable influencia en la variable dependiente al tener un coeficiente de correlación de 0.59.
- En la tercera posición, con coeficientes muy similares de 0.49 y 0.48 respectivamente, los tipos de accidentes en los que se ven involucrados motociclistas y peatones poseen una afección importante en la generación de víctimas mortales dado que son usuarios mayormente vulnerables en los caminos de tránsito.
- Por otro lado, las variables que menos influencia tienen en la generación de víctimas mortales por accidentes de tránsito son las entidades geográficas y los años en que han acontecido los sucesos.
- Otras observaciones importantes, pueden generarse con respecto a los coeficientes de correlación entre las variables “Colisión con Objeto” y Solo daños” que poseen una fuerte vinculación con la causa originada por “El conductor” al poseer coeficientes de correlación de 0.97 y 0.98 respectivamente.

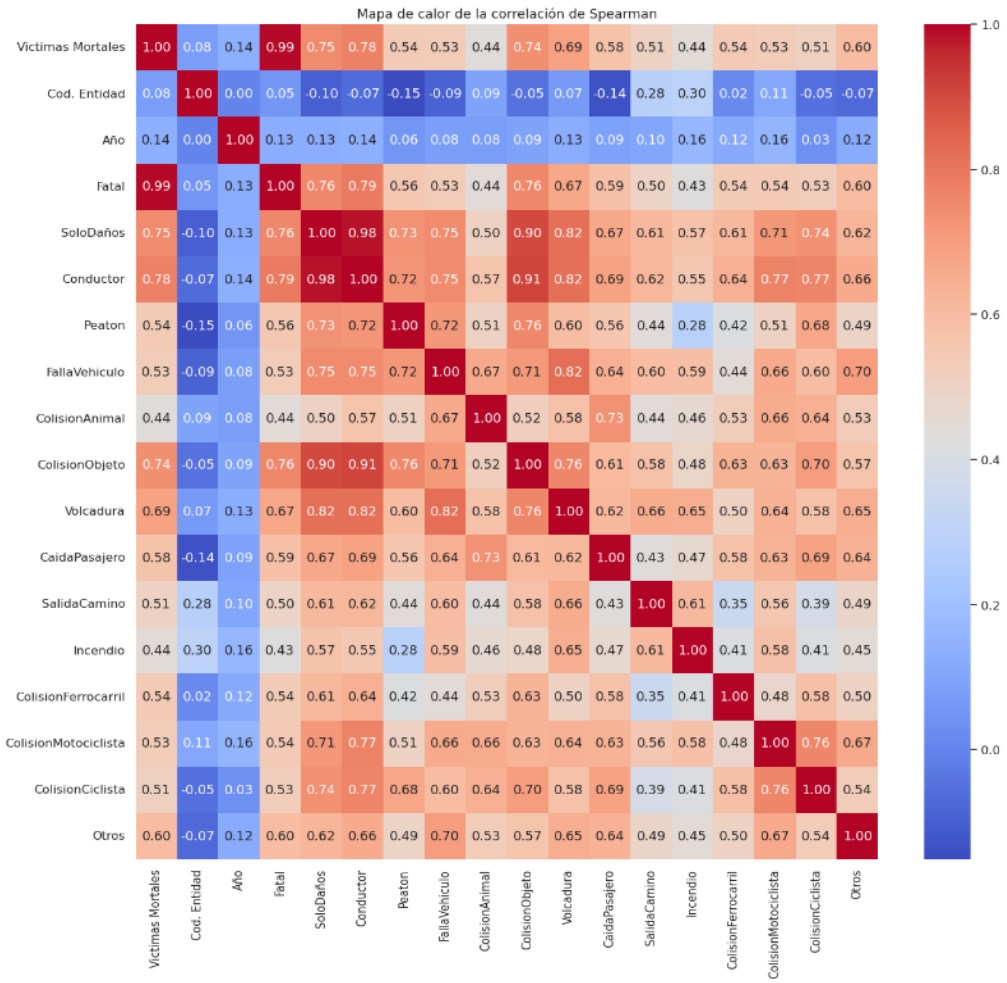


Figura 7. Matriz de correlación de Spearman

Analizando la matriz de correlación de Spearman, se pueden observar la presencia de posibles incongruencias en algunos coeficientes de correlación, como la correlación existente entre las víctimas mortales derivado por una gravedad de solo daños con un coeficiente de 0.75, demostrando que los registros analizados poseen una relación lineal como lo demuestra la matriz de correlación de Pearson más que una relación no lineal.

CONCLUSIONES

Los accidentes de tránsito son una fuente notable de pérdida de vidas humanas, un problema el cual es necesario atender y para el cual se pueden generar diversas contramedidas que contribuyan a su disminución. Sin embargo, para poder diseñar dichas contramedidas es necesario conocer el comportamiento del problema y poder estimar los resultados, así como conocer las causas implicadas, para ello es de suma utilidad la implementación de herramientas matemático-estadísticas, como las abordadas en el presente trabajo de investigación, las cuales nos permiten incorporar múltiples variables capaces de influir en un resultado, estimando la influencia de las mismas y generando la posibilidad de realizar predicciones.

De esta manera, es posible facilitar y sustentar la toma de decisiones en materia de prevención, ya sea a través de regulaciones de seguridad vial, infraestructura para atención de siniestros y concientización social.

El ejercicio expuesto en el presente documento propone dos modelos predictivos elaborados en función de los registros de víctimas mortales en el territorio mexicano, de los cuales el modelo de regresión lineal brinda un mejor resultado, lo anterior puede deberse a diversos factores tales como el comportamiento lineal de los datos utilizados para el entrenamiento, la cantidad de datos disponibles para el entrenamiento, entre otros como los hiper-parámetros empleados. Ya que si bien, los perceptrones multicapas son herramientas muy potentes, demandan también grandes cantidades de datos para su entrenamiento.

Finalmente, los modelos expuestos representan una posibilidad adaptable y replicable a otros territorios en los que quizás las causas relacionadas con los accidentes pudieran tener otro nivel de influencia, o una complejidad superior o de carácter subjetivo, las cuales pudieran ser incorporadas mediante el modelo M.L.P. u otras técnicas de aprendizaje automático. Representando así mecanismos para implementación de contramedidas con fines de mitigar las cifras de decesos.

BIBLIOGRAFÍA

Abdullah, N. E., Rahim, A. A., Hashim, H., & Kamal, M. M. (2007). Classification of Rubber Tree Leaf Diseases Using Multilayer Perceptron Neural Network. 2007 5th Student Conference on Research and Development, 1–6. https://doi.org/10.1109/SCORED.2007.4451369

Dagnino S., J. (2014). Regresión Lineal. Revista Chilena de Anestesia, 43, 143–149.

Féraud, R., & Clérot, F. (2002). A methodology to explain neural network classification. Neural Networks, 15(2), 237–246. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0893-6080(01)00127-7

Ihueze, C. C., & Onwurah, U. O. (2018). Road traffic accidents prediction modelling: An analysis of Anambra State, Nigeria. Accident Analysis & Prevention, 112, 21–29. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.12.016

INEGI. (2022a). Accidentes de tránsito terrestre por causa determinante o presunta.

INEGI. (2022b). Accidentes de tránsito terrestre por clase.

INEGI. (2022c). Accidentes de tránsito terrestre por tipo.

INEGI. (2022d). Número de víctimas muertas y heridas por tipo.

Mendivelso, F. (2021). Prueba no paramétrica de correlación de Spearman. Revista Médica Sanitas, 24(1).

Montero Granados, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo En Economía Aplicada.

Moral Peláez, I. (2016). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. Seden.

Palacio, F. X. (2020). Análisis Multivariado para datos biológicos. Vazquez Mazzini.

Park, S., Kim, S., & Ha, Y. (2016). Highway traffic accident prediction using VDS big data analysis. The Journal of Supercomputing, 72(7), 2815–2831. https://doi.org/10.1007/s11227-016-1624-z

Parker, D., West, R., Stradling, S., & Manstead, A. S. R. (1995). Behavioural characteristics and involvement in different types of traffic accident. Accident Analysis & Prevention, 27(4), 571–581. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00005-K

Ramchoun, H., Ghanou, Y., Ettaouil, M., & Janati Idrissi, M. A. (2016). Multilayer Perceptron: Architecture Optimization and Training. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, 4(1).

Sameen, M. I., & Pradhan, B. (2017). Severity Prediction of Traffic Accidents with Recurrent Neural Networks. Applied Sciences, 7(6). https://doi.org/10.3390/app7060476

Timaná Yarleque, F. (2021). El problema de optimización de una red neuronal artificial: métodos de optimización basados en el gradiente.

Touahmia, M. (2018). Identification of Risk Factors Influencing Road Traffic Accidents. Engineering, Technology & Applied Science Research, 8(1), 2417–2421.

Wang, Q., Ma, Y., Zhao, K., & Tian, T. (2022). A Comprehensive Survey of Loss Functions in Machine Learning. Annals of Data Science, 9, 187–212.

Zhang, Z., Yang, W., & Wushour, S. (2020). Traffic Accident Prediction Based on LSTM-GBRT Model. Journal of Control Science and Engineering, 2020, 4206919. https://doi.org/10.1155/2020/4206919

EFECTO DE LA RELACIÓN MESÓGENO/ESPACIADOR/ENTRECRUZANTE EN LA PREPARACIÓN Y ALINEAMIENTO MOLECULAR PERMANENTE DE ELASTÓMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS

Rosa Julia Rodríguez González[1], Leticia Larios López[1], Arturo de Jesús Ruiz Cordova[2], Dámaso Navarro Rodríguez[1]

[1]Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México, [2]Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica, Veracruz, México.

julia.rodriguez@ciqa.edu.mx

RESUMEN

Los elastómeros líquido-cristalinos (LCE) son materiales flexibles y con memoria de forma que en la última década han tenido un importante desarrollo, especialmente por el interesante comportamiento que presentan en respuesta a una variedad de estímulos externos, por ejemplo, a la luz, calor, humedad, etc. Tomando en cuenta que los LCE se conforman principalmente de grupos cristal líquido (denominados mesógenos), de espaciadores flexibles y de grupos de entrecruzamiento, su proporción en la formulación influirá en los procesos de alineamiento molecular, en la programación de forma y en el comportamiento final del elastómero. Con el propósito de estudiar el efecto del entrecruzante en los procesos de alineamiento de los mesógenos y en el esfuerzo requerido para ello, en este trabajo fueron preparados tres grupos de elastómeros con proporción de entrecruzamientos variable. Para esto se utilizó una reacción tiol-acrilato entre el mesógeno nemático diacrilato RM257 (15% en exceso) y los componentes espaciador/entrecruzante con funcionalidad tiol (SH) en tres relaciones molares (EDDET/PETMP = 87/13, 70/30 y 50/50). De esta manera, primero se obtuvieron LCEs en polidominios temporales (pt-LCE), los cuales fueron sometidos a un estiramiento uniaxial a una velocidad de mordazas de 5.4 mm/min. Luego que las muestras estuvieron alineadas en monodominios, estas fueron irradiadas con luz UV de 365nm durante 10min para iniciar la reacción de foto-polimerización de los grupos acrilato remanentes; fijando así, el alineamiento molecular de manera permanente (mp-LCE). Los elastómeros en polidominios permanentes (pp-LCE) fueron obtenidos foto-polimerizando las muestras pt-LCE aún sin estirar. Con las curvas de esfuerzo-deformación de los LCE se pudo determinar que un mayor contenido de PETMP produce LCE más rígidos, pero que aún presentan una clara transición de polidominios a monodominios (P-M). Los resultados también mostraron que los pt-LCE tienen una mayor capacidad de alineamiento en monodominios que los pp-LCE, requiriendo esfuerzos de tensión relativamente bajos (aprox. 0.6 MPa). Un análisis de imagen durante el proceso de deformación permitió determinar que solamente el pp-LCE 87/13 desarrolló la transparencia característica de una orientación temporal en monodominios, y una vez que la carga fue removida, la muestra regresó a su conformación de polidominios prefijada. Por último, las muestras programadas en monodominios permanentes fueron transparentes y con las tres formulaciones de RM257/EDDET/PETMP se obtuvieron LCEs termo-responsivos, los cuales exhibieron una deformación reversible cercana al 50%, cuando fueron expuestos a un estímulo de calor. Con este trabajo, se corrobora que la generación de los nodos de entrecruzamiento por el exceso de los grupos acrilato en la formulación, así como la cantidad de los grupos espaciador/entrecruzante tiol son cruciales en la preparación y en la programación de la forma final de los elastómeros líquido-cristalinos termo-responsivos.

INTRODUCCIÓN

Los polímeros son materiales caracterizados por la unión de una gran cantidad de moléculas pequeñas llamadas monómeros. En su estructura, pueden clasificarse como lineales, ramificados o entrecruzados. Los polímeros lineales se caracterizan estructuralmente (fig.1) por la unión de los monómeros formando una cadena polimérica principal en línea, de manera continua. Los ramificados son polímeros en los que la cadena polimérica principal está unida a cadenas pequeñas llamadas ramificaciones. Los polímeros entrecruzados son polímeros ramificados en los cuales las ramificaciones unen las cadenas entre sí formando una red. Los puntos en donde se unen una cadena con otra se conocen como nodos, y el número de ellos está en relación con el grado de

entrecruzamiento que alcance el polímero[1]. En base a esto, los elastómeros son polímeros entrecruzados que se caracterizan por su gran elasticidad, es decir, que pueden estirarse muchas veces su tamaño aplicando un esfuerzo de tensión, y después de eliminar este esfuerzo recuperar su forma, lo que se denomina memoria de forma. El grado de entrecruzamiento determina la flexibilidad y su capacidad para recuperarse. Los elastómeros son comúnmente amorfos, esto es, sus moléculas se encuentran en desorden, y cuando se les aplica una tensión, éstas se ordenan en la dirección en que se está aplicando la tensión. Al eliminar este esfuerzo, las moléculas regresan a su estado original de desorden[2]. Actualmente, una nueva variedad de elastómeros conocidos como elastómeros líquido-cristalinos (LCE) ha ganado interés por su respuesta a la aplicación de estímulos externos como luz, calor, humedad, etc., haciéndolos interesantes, desde el punto de vista tecnológico, como actuadores mecánicos para su aplicación en robótica. Los LCE´s se distinguen por contener en su estructura moléculas líquido-cristalinas (mesógenos) que le imparten la propiedad de auto-organización, además de grupos espaciadores flexibles y entrecruzantes. Inicialmente, los LCE's se obtienen en pequeños grupos ordenados en fases líquido-cristalinas, denominados polidominios. Al aplicarles un estímulo mecánico o magnético puede inducirse una transición de la fase cristal líquido de polidominios a monodominios en dirección al estímulo aplicado[3]. Esto es interesante desde el punto de vista tecnológico, ya que este ordenamiento puede ser controlado y manejado para aplicaciones de vanguardia como la mencionada anteriormente. Del contenido de cada uno de los grupos que componen la estructura del LCE dependerán las propiedades que éstos desarrollen, por lo que en el presente trabajo se planteó el estudio de una serie de LCE´s con un contenido del 115% del cristal líquido RM257, y los componentes espaciador/entrecruzante con funcionalidad tiol (SH) en tres relaciones molares (EDDET/PETMP = 87/13, 70/30 y 50/50), y fueron sometidos a un estiramiento uniaxial para grabar una orientación.

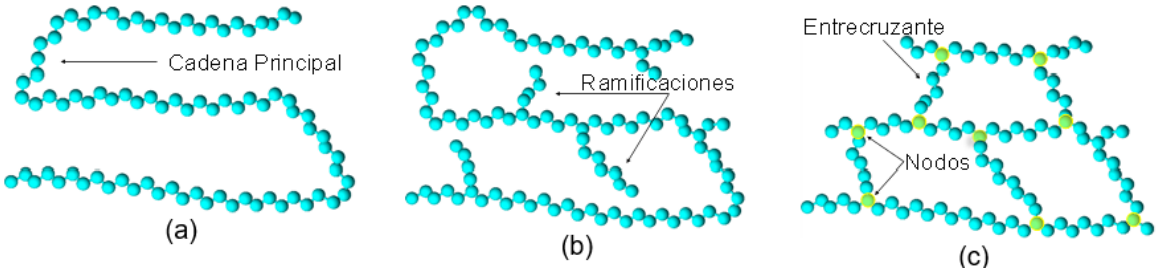


Figura 1. Representación esquemática de la clasificación de los polímeros de acuerdo a su estructura molecular: (a) lineales, (b) ramificados, (c) entrecruzados.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales. Los reactivos utilizados en este trabajo fueron el mesógeno nemático diacrilato 1,4-Bis-[4-(3-acriloxipropiloxi) benzoiloxi]-2-metilbenceno (RM257, 97.3%), el espaciador 2,2'-(etilendioxi) dietanotiol (EDDET, 95%), el entrecruzante tetrakis(3-mercapto propionato) pentaeritritol (PETMP, 95%), el foto-iniciador 2-Hidroxi-4'-(2hidroxietoxi)-2metilpropiofenona (HHMP, 98%), el catalizador dipropilamina (DPA, 99%) y tolueno anhidro, como disolvente. Con excepción del RM257, todos los reactivos y disolventes fueron adquiridos de Aldrich, Co., y fueron usados como se recibieron.

*Preparación de los elastómeros LC en una conformación de polidominios temporales (**pt-LCE**)*. De acuerdo con procedimientos reportados en la literatura [4-7], en un frasco de vidrio fueron mezclados 1000 mg del RM257 y 600 mg de tolueno. Esta mezcla fue calentada a 80°C por 5 minutos y luego se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente (Ta), antes de adicionar las cantidades correspondientes del EDDET y PETMP (considerando las tres relaciones molares de 87/13, 70/30 y 50/50), mas 6 mg del foto-iniciador HHMP y 144 mg de una solución de DPA en tolueno (1:50) recién preparada. Esta mezcla fue agitada vigorosamente en un vortex por 1 min y posteriormente, desgasificada en una estufa de vacío para eliminar las burbujas de aire que se hubieran formado. La

mezcla fue vertida en un molde de teflón y la reacción se dejó proceder a Ta por 18 h. Transcurrido este tiempo, las muestras fueron sacadas del molde y colocadas en una estufa a 70°C por 6 h en atmósfera de vacío (15 mm Hg).

*Preparación de los LCE en una conformación de monodominios permanentes (**mp-LCE**).* Muestras de **pt-LCE** fueron estirados uniaxialmente a una velocidad de 5.4 mm/min (de 5 a 10 min). Enseguida, estas fueron irradiadas con luz UV de 365nm por 10 min para iniciar la polimerización de los grupos acrilato (15%) adicionados en exceso en la formulación y mantener así, el alineamiento de los dominios líquido-cristalinos.

*Preparación de los LCE en una conformación de polidominios permanentes (**pp-LCE**)*. Las muestras de **pt-LCE** sin estirar fueron foto-polimerizadas irradiando con luz UV de 365nm durante 10min, con lo que se fijaron las orientaciones al azar de los polidominios LC.
Curvas de esfuerzo-deformación. Los tres tipos de muestras de LCE fueron sometidas a un proceso de deformación a una velocidad de 5.4 mm/min, y el esfuerzo requerido fue registrado con un medidor de fuerza digital BAOSHISHAN ZP-50N.

La caracterización térmica de los LCE se llevó a cabo en un calorímetro de barrido diferencial DSC-2000 Q-Series de TA Instruments. Para este análisis se usaron muestras de 5 mg en portamuestras de aluminio, las cuales fueron sometidas a ciclos de calentamiento/enfriamiento a una velocidad de 10°C/min.

Para evaluar la respuesta de los mp-LCE a un estímulo térmico, se utilizó un microscopio Olympus BX53, equipado con un sistema de micrografía digital MicroPublisher 3.3 RTV y una platina de temperatura controlada Linkam. Para este análisis se utilizaron muestras de elastómero de 4x3 mm y una velocidad de calentamiento/enfriamiento de 5°C/min.

RESULTADOS

En este trabajo fueron preparadas tres formulaciones elastoméricas utilizando una reacción tiol-acrilato entre el mesógeno nemático diacrilato RM257 (15% mol en exceso) y los componentes espaciador:entrecruzante con funcionalidad tiol (SH) en tres relaciones molares (EDDET:PETMP = 87:13, 70:30 y 50:50). De esta manera, se obtuvieron tres elastómeros en polidominios temporales (pt-LCE), cuya apariencia blanca opaca (fig. 2a) manifiesta la distribución al azar de los dominios líquido-cristalinos (LC) [7]. Cuando se aplicó un esfuerzo uniaxial sobre las muestras pt-LCE, el vector director de los diferentes dominios LC se re-orientaron en una dirección preferencial, y las muestras cambiaron de opacas a transparentes (fig. 2b).

El esfuerzo registrado durante el proceso de orientación de los mesógenos de los pt-LCE se muestra en las curvas de esfuerzo-deformación de la Figura 2c, y denotan el comportamiento típico de un sistema elastomérico cuando pasa de una conformación de polidominios a monodominio (P-M) LCE [6,7]. En particular, en la curva del pt-LCE 50:50 se observa con mayor claridad que el esfuerzo aumenta (región elástica) al inicio del estiramiento uniaxial, seguido de un intervalo de deformación en donde el esfuerzo permanece constante (meseta) y luego, al continuar con el estiramiento, el esfuerzo requerido sigue aumentando debido a que está ocurriendo el alineamiento de las cadenas poliméricas (región de endurecimiento) [7]. La transición P-M no es tan evidente para los LCE con menor densidad de entrecruzamientos, en los que se requiere de menor esfuerzo para lograr el mismo porcentaje de deformación.

Tomando en cuenta que para lograr un notable accionamiento mecánico (deformación) de los LCE cuando se exponen a un estímulo térmico se requiere que la forma programada (u orientación de los mesógenos) sea permanente, los pt-LCE orientados en monodominios fueron sometidos por 10 min a la irradiación con luz UV de 365nm. Con esto dio inicio la reacción de foto-polimerización de los

grupos acrilato remanentes, fijando así la orientación molecular de manera permanente. Los tres mp-LCE obtenidos fueron caracterizados térmicamente, como se describe a continuación.

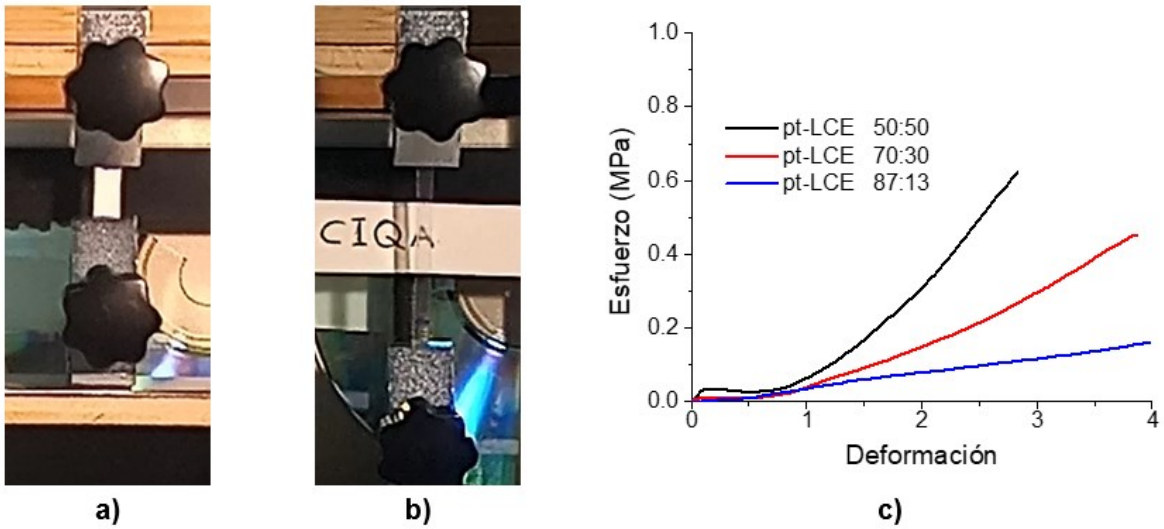


Figura 2. Imágenes de pt-LCE 70:30 en a) polidominios, en b) monodominios, y c) curvas de esfuerzo deformación de los elastómeros pt-LCE.

Comportamiento térmico de los elastómeros líquido-cristalinos mp-LCE

En las Figura 3 se muestran los termogramas de DSC obtenidos para las tres formulaciones de los elastómeros orientados en monodominios mp-LCE. En estas curvas, la primera transición corresponde a la temperatura de transición vítrea (Tg) mientras que la segunda se asocia con la transición de la fase cristal líquido a líquido isotrópico (Ti). Como se observa en estas curvas, la Tg del LCE aumenta desde 2°C para el LCE 87:13 hasta 9°C para la formulación de 50:50. En contraste, la Ti presenta un comportamiento inverso, observándose una disminución desde 104°C (LCE 87:13) a 100°C (LCE 70:30). Esta transición no pudo ser detectada para el LCE 50:50. Estos resultados corroboran que un mayor contenido del entrecruzante PETMP en la formulación elastomérica da lugar a sistemas con mayor densidad de entrecruzamientos, lo cual tendrá influencia en los procesos de orientación, así como en las propiedades físicas y mecánicas del elastómero líquido-cristalino.

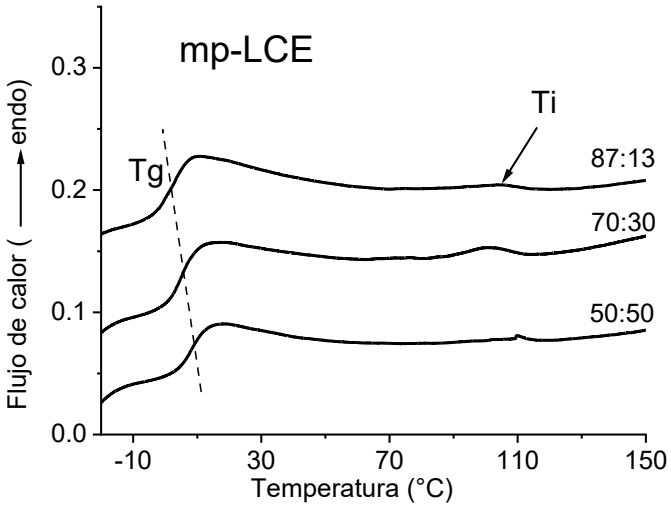


Figura 3. Termogramas DSC de los elastómeros en monodominios con diferentes relaciones molares de EDDET:PETMP.

Por otro lado, cuando los LCE en polidominios temporales fueron irradiados con luz UV sin antes haber aplicado algún proceso de orientación preferencial, la polimerización radicálica de los grupos acrilato remanentes causó que la conformación en polidominios se hiciera permanente (pp-LCE), generando sistemas más difíciles de deformar. Durante el proceso de deformación uniaxial de estos elastómeros, solamente el pp-LCE 87:13 desarrolló en cierta medida la transparencia característica de una orientación temporal en monodominios, como se ilustra en la Figura 4; y una vez que la carga fue removida, la muestra regresó a su conformación de polidominios prefijada o programada. En las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes de la Figura 5, también se observa claramente que el esfuerzo requerido para lograr la misma deformación es significativamente mayor cuando aumenta la densidad de entrecruzamientos. Por ejemplo, el esfuerzo requerido para obtener una deformación del 100% (L/L_0=1) es de 0.21, 0.41 y 1.2 MPa para el pp-LCE 87:13, 70:30 y 50:50, respectivamente.

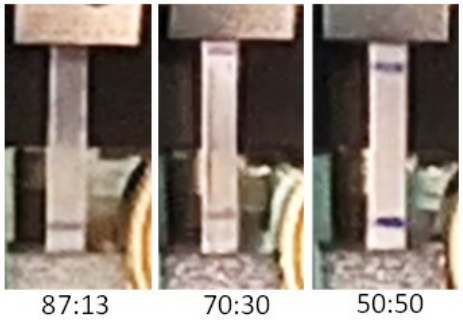


Figura 4. Imágenes de los pp-LCE para una deformación de 1.6

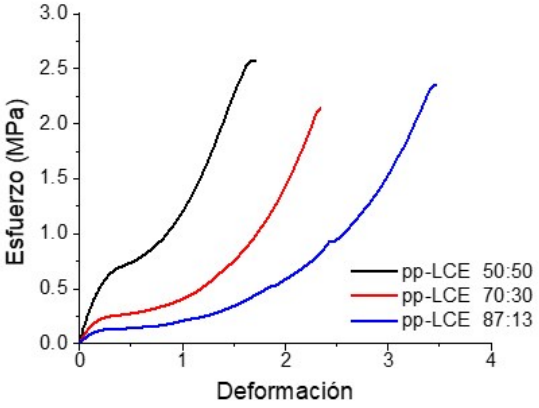


Figura 5. Curvas de esfuerzo-deformación de los elastómeros pp-LCE.

Comparando las curvas de esfuerzo-deformación de las Figuras 1 y 4, se puede determinar que los pt-LCE tienen una mayor capacidad de alineamiento en monodominios que los pp-LCE, requiriendo esfuerzos de tensión relativamente bajos (aprox. 0.6 MPa). Además, un mayor contenido de PETMP produce LCE con mayor densidad de entrecruzamientos y más rígidos, sin embargo, aún presentan una clara transición de polidominios a monodominios (P-M).

Deformación de los mp-LCE en respuesta a un estímulo de calor

Para el análisis de la termo-deformación de los elastómeros orientados en monodominios permanentes se cortaron piezas rectangulares de cada elastómero con las diferentes proporciones de espaciador:entrecruzante y se analizó el cambio en sus dimensiones, durante el ciclo de calentamiento-enfriamiento. En la Figura 6 se observa claramente que los LCE mostraron una clara contracción en sus dimensiones, cercana al 50%, en la dirección de la orientación durante el proceso de calentamiento. Una vez suspendido el estímulo de calor; esto es, durante el enfriamiento las muestras mp-LCE se expandieron gradualmente hasta recuperar su forma inicial. Estos resultados indican que la deformación inducida por calor ocurre de manera reversible. De acuerdo con estos resultados, no hay un efecto significativo de la variación de EDDET:PETMP en la termo-respuesta de estas formulaciones elastoméricas.

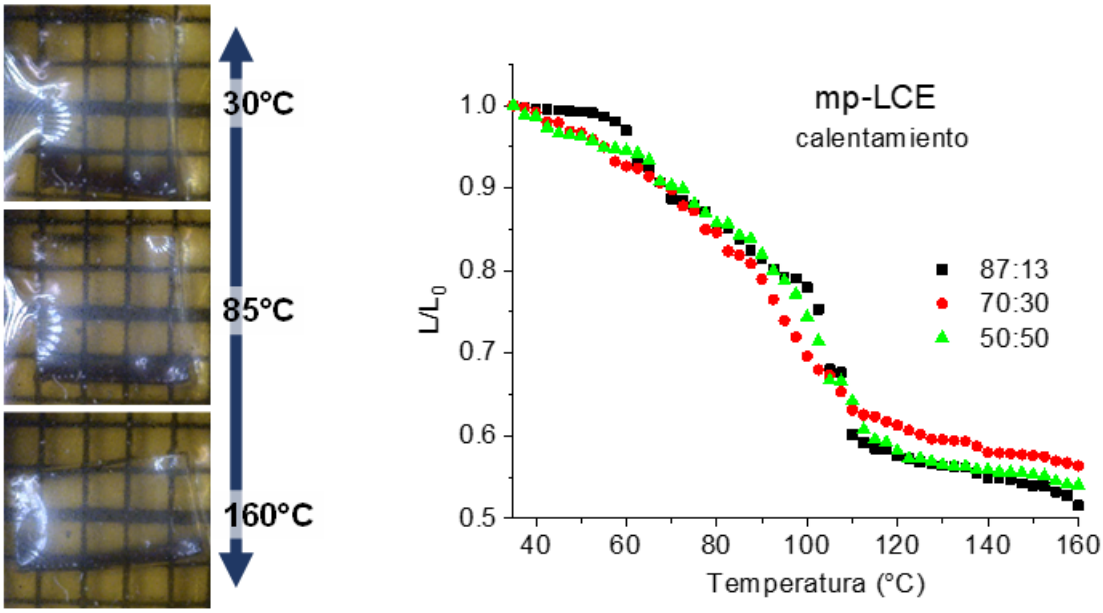


Figura 6. Deformación de los elastómeros mp-LCE formulados con diferente contenido de EDDET:PETMP en respuesta a un estímulo térmico.

Con este trabajo, se corrobora que la generación de los nodos de entrecruzamiento por el exceso de los grupos acrilato en la formulación, así como la cantidad de los grupos espaciador/entrecruzante tiol son cruciales en la preparación y en la programación de la forma final de los elastómeros líquido-cristalinos termo-responsivos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se prepararon elastómeros líquido-cristalinos en polidominios temporales y permanentes, y en monodominios permanentes, con el propósito de estudiar el efecto del contenido del espaciador y entrecruzante con respecto al grupo mesogeno. De los estudios de esfuerzo-deformación se determinó que los pt-LCE tienen una mayor capacidad de alineamiento en monodominios que los pp-LCE, requiriendo esfuerzos de tensión relativamente bajos (aprox. 0.6MPa). Solamente el pp-LCE 87/13 desarrolló la transparencia característica de una orientación temporal en monodominios, y una vez que la carga fue removida, la muestra regresó a su conformación de polidominios prefijada. Por último, las muestras programadas en monodominios permanentes fueron transparentes y con las tres formulaciones de RM257/EDDET/PETMP se obtuvieron LCEs termo-responsivos, los cuales exhibieron una deformación reversible cercana al 50%, cuando fueron expuestos a un estímulo de calor. Con este trabajo, se corrobora que la generación de los nodos de entrecruzamiento por el exceso de los grupos acrilato en la formulación, así como la cantidad de los grupos espaciador/entrecruzante tiol son cruciales en la preparación y en la programación de la forma final de los elastómeros líquido-cristalinos termo-responsivos

Agradecimientos. Se agradecen las facilidades técnicas del Laboratorio Nacional de Materiales Grafénicos, y en especial el apoyo de J.A. Mercado Silva. Este trabajo fue soportado financieramente por el CIQA (proyecto interno 6704).

BIBLIOGRAFÍA

1. Callister, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 2. Ed., Reverté, Barcelona, España, 2009.
2. Varón, D. J., Bou, S. F., & Gimeno, R. B. Análisis del estado del arte de elastómeros termoplásticos y mejora del confort térmico para el sector de ortopedia del pie y puericultura ligera (Vol. 6). 3Ciencias. 2015.
3. A. Roca-Aranda, “Cristales líquidos elastoméricos foto y termoaccionables de cadena lateral a base de mesógenos (fenilen)azobenceno y (fenil)benzoato”, Centro de Investigación en Química Aplicada, Tesis, 2019
4. C.M. Yakacki, M. Saed, D.P. Nair, T. Gong, S.M. Redd, C.N. Bowman, “Tailorable and programmable liquid-crystalline elastomers using a two-stage thiol–acrylate reaction”. RSC Adv., 2015, Vol. 5, 18997-19001. doi:10.1039/c5ra01039j
5. E.J. López Torres, A.S. Valencia Aguilar, M.A. De Jesús Tellez, R.J. Rodríguez González, D. Navarro Rodríguez, L. Larios López, “Preparación de elastómeros líquido-cristalinos portadores de grupos azobenceno”, Avances de la Ciencia en México 2017, (ISBN 978-607-95228-8-9), 3571-3576
6. S.V. Fridrikh y E.M. Terentjev, “Polydomain-monodomain transition in nematic elastomers” Physical Review E, 1999, Vol. 60, No.2. 1847-1857
7. T.J. White y D.J. Broer, “Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers”, Nature Materials, 2015, Vol. 14, 1087-1098.

IMPLEMENTACIÓN DE MACHINE LEARNING PARA EL ANÁLISIS DE VIOLENCIA CONTRA LA MUJER EN LA PLATAFORMA MUJER SEGURA

Carolina Malvaez Hernández [1], Mariana-Carolyn Cruz-Mendoza [1, 2], Roberto Ángel Meléndez-Armenta [2], José Miguel Suárez Estrella[1].

[1]Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo,
[2]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla.
l202007009@vbravo.tecnm.mx

RESUMEN

La violencia contra las mujeres es una realidad global que afecta la seguridad, la salud y los derechos de las mujeres, teniendo graves consecuencias para su bienestar físico, psicológico y social. En la Coordinación de la Mujer en Valle de Bravo, México, se desarrolló un proyecto para analizar datos y prevenir la reincidencia de violencia y predecir el riesgo de feminicidio. Sin embargo, la falta de datos precisos representa un desafío para la prevención y respuesta efectiva. Un porcentaje importante de mujeres no tienen acceso a plataformas de denuncia debido a limitaciones de recursos y capacitación, lo que conduce a una subrepresentación de los casos reales de violencia. Para abordar esta problemática, se propuso la implementación del aprendizaje automatizado (Machine Learning) en las plataformas públicas que recaban información sobre incidencias de violencia contra la mujer en México. El objetivo principal fue construir conjuntos de datos en línea de registros públicos de violencia contra la mujer, utilizando la inteligencia artificial para optimizar la recopilación, organización y análisis de estos datos, asegurando así su calidad.

Se diseñó la plataforma "Mujer Segura", una herramienta para brindar apoyo a mujeres víctimas de violencia, destacándose por su accesibilidad, confidencialidad y seguridad en el manejo de datos. Ofrece recursos como líneas de emergencia y asesoramientos adaptados a las necesidades de las usuarias, integrándose con plataformas públicas de ayuda a la mujer. La plataforma facilitó la recopilación de información sobre la violencia contra las mujeres, garantizando la seguridad y privacidad de los datos. Los resultados evidencian una diversidad de experiencias entre las víctimas, caracterizadas por variables como la edad, el nivel socioeconómico y la orientación sexual. Se adoptó un enfoque interseccional para abordar la violencia, reconociendo la interrelación entre la violencia de género, la discriminación y otras opresiones.

Se utilizaron técnicas de limpieza de datos para garantizar la calidad de los datos, así como la normalización y estandarización para facilitar el entrenamiento de los modelos de aprendizaje automático. La plataforma "Mujer Segura" cuenta con un proceso de seguimiento que permite a las instituciones tener certeza de que la víctima recibe un acompañamiento oportuno. Las estrategias implementadas aumentaron significativamente la atención hacia las víctimas. Este proyecto destaca el papel de la mujer en la ciencia al mostrar cómo las técnicas de aprendizaje automático pueden contribuir a la prevención y respuesta efectiva ante la violencia de género, resaltando así el potencial de las mujeres en la ciencia para abordar desafíos sociales y promover el bienestar de la sociedad.

INTRODUCCIÓN

Siendo una crisis global de magnitud alarmante, la violencia hacia la mujer afecta su seguridad, salud y derechos fundamentales. Esta problemática, multifacética en su manifestación, abarca desde la violencia doméstica hasta formas más complejas como el hostigamiento sexual, la trata de personas y el acoso en línea. Estas expresiones conllevan consecuencias devastadoras para el bienestar físico, psicológico y social de innumerables mujeres en el mundo. Se reconoce que los estereotipos de género contribuyen a justificar esta violencia, mientras persisten desigualdades en el acceso a la educación, el ámbito laboral y la adición en los métodos de toma de decisiones (Salud., 2020). En México, la inclusión económica de las mujeres sigue siendo baja, evidenciando una brecha significativa en comparación con la de los hombres.

Considerando esta problemática, se propone la implementación del aprendizaje automatizado (Machine Learning) en las plataformas públicas que recaban información sobre incidencias de las agresiones hacia las mujeres en México. Con el objetivo principal de construir conjuntos de datos en línea a partir de registros públicos de incidencias de agresiones contra la mujer, empleando inteligencia artificial para potenciar la recopilación, organización y análisis de estos datos, garantizando su calidad. Investigaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otros trabajos enfocados en aprendizaje automático han resaltado la magnitud del problema y la su notificación de casos por vergüenza o miedo a represalias (Guedes, 2014). La violencia hacia la mujer, descrita por la OMS tal como el empleo calculado de fuerza física o poder que provoca daño, se refleja en estadísticas alarmantes en México. Por ejemplo, El 70.1% de las mujeres de más de 15 años ha experimentado al menos un episodio de violencia, según el INEGI (Mujeres I. N., 2022).

En este estudio, se plantea la aplicación de los métodos de Árbol de Decisión, Bosque Aleatorio y Redes Neuronales para examinar la variable que indica el tipo de violencia en el conjunto de datos recopilado por la Plataforma Mujer Segura. La Metodología Fundamental de Ciencia de Datos guiará este proyecto, ofreciendo una estrategia para comprender, recopilar, preparar y analizar los datos. Los insights obtenidos serán fundamentales para comprender el contexto y generar acciones estratégicas. Para la recopilación de información se empleará la Plataforma Mujer Segura, enfocándose inicialmente en el Municipio de Donato Guerra, Estado de México. Se aplicarán encuestas diseñadas para mujeres que sufren violencia, con la colaboración de centros de atención a la mujer para asegurar su seguridad y respetar la privacidad de los datos. Se buscará respaldo institucional mediante cartas u oficios de instituciones, mencionando el carácter no lucrativo del proyecto. Además, se contará con el respaldo del laboratorio de inteligencia artificial del Instituto Tecnológico Superior de Misantla para el procesamiento de datos.

El desarrollo de la metodología fundamental de ciencia de datos guiará el proyecto en nueve fases, detalladas en la parte experimental. Durante la etapa de especificación y recolección de datos, se compilarán datos tales como víctima, edad, situación conyugal, sexo, hijos, grupo étnico, nacionalidad, domicilio, tipo de violencia, código 100, número de agresores, modalidad, dependencia y vice con. Posteriormente, en el preprocesamiento, dichos datos se limpiarán y normalizarán para garantizar su coherencia. La fase de preparación de los datos implementará técnicas específicas para la adecuada preparación de estos. Continuando con el modelado, se emplearán los modelos de aprendizaje automático árbol de decisión, random forest y redes neuronales, que serán entrenados con datos de las encuestas y de los formularios de la Plataforma Mujer Segura, creando el dataset para clasificar el riesgo de violencia y predecirla.

Los experimentos se detallarán en la parte experimental, donde se evidenciará el porcentaje de precisión alcanzado por los modelos. En los resultados, se dedicará a los resultados y análisis de los modelos, y se discutirán los hallazgos obtenidos. Finalmente, las conclusiones estarán dedicadas a proponer líneas de trabajo futuro, tales como la incorporación de sistemas expertos, abriendo así caminos para futuras investigaciones en este campo, así como las conclusiones obtenidas a lo largo de la investigación.

ANTECEDENTES

La violencia hacia las mujeres es un desafío social de considerable magnitud, con impactos significativos en la seguridad y dinámica social. Una solución propuesta radica en el desarrollo y análisis de datos mediante inteligencia artificial, con el fin de comprender sus orígenes y ofrecer soluciones eficaces y rápidas. José Manuel Alonso Varea & José Luis Castellanos Delgado “exploran las diversas manifestaciones de la violencia familiar, destacando la importancia de un enfoque integral, especialmente preventivo, para fortalecer las relaciones intrafamiliares y prevenir futuros actos violentos” (Delgado, 2006). Por su parte, Feldfeber et al. En su artículo "Feminismos en la Inteligencia Artificial: Herramientas de Automatización hacia una Reforma Judicial Feminista en Argentina y México", sugieren la idea de hacer públicos los datos judiciales como parte integral de

un proceso de reforma judicial feminista, empleando inteligencia artificial para detectar la agresión de género. Así mismo proponen la elaboración de AymurAI, “un prototipo semiautomático que colabora con funcionarios judiciales desde una perspectiva feminista e interseccional” (I. Feldfeber, 2022). Por otro lado, María de Montserrat Pérez Contreras destaca en su artículo "Violencia contra la mujer. Comentarios en torno a la ley general de acceso a la mujer a una vida libre de violencia" el avance significativo que representa la Ley General de Acceso a una Vida Libre de Violencia en México en la lucha frente a este flagelo. “Sin embargo, a pesar de las medidas implementadas, persisten desafíos importantes en la prevención y detección temprana de la violencia contra la mujer” (Contreras, 2023), destacando la urgencia de un enfoque más innovador y eficaz con el fin de abordar integralmente esta problemática.
Sajida Parveen y otros investigadores, en su artículo "Explotación económica de empleadas domésticas: víctimas de violencia de pareja", señalan la desocupación, adicción a las drogas, derechos básicos, la miseria y el analfabetismo como las principales causas de la agresión física, psicológica y sexual hacia las trabajadoras domésticas (M. I. T. A. U. Parveen, 2020). Abogan por salarios justos, un sistema de denuncia de la violencia y el reforzamiento de las mujeres para el amparo de sus derechos. Por otro lado, Edith Aguirre, en su artículo "Violencia doméstica y salarios de las mujeres en México", destaca la relación prohibida y reveladora entre la agresión doméstica y las remuneraciones laborales de las mujeres en este país, señalando múltiples barreras que enfrentan para participar en la fuerza laboral, incluidos bajos salarios, largos desplazamientos y falta de servicios de cuidado infantil (Aguirre, 2023). Alma Lilia Juárez Armenta, en su tesis "Violencia de género en México: Un enfoque crítico y de inferencia causal", resalta el alarmante incremento de la violencia hacia las mujeres en México, así como la necesidad de ampliar las definiciones de feminicidio y evaluar los impactos de la exhibición a la violencia de género a nivel comunitario (Armenta, 2023). ONU Mujeres advierte en su artículo "Información basada en datos: Efectos del cambio climático sobre el género y el desarrollo" que la violencia de género tiene ramificaciones ambientales además de físicas, destacando la necesidad de visibilizar este problema y fortalecer las acciones de protección para las mujeres afectadas (Mujeres O. , 2020). Juan Carlos Garduño, en su artículo "Implementación de aprendizaje profundo para identificación de patrones e incidentes de violencia de género en contextos mexicanos", subraya la importancia del aprendizaje profundo en la identificación de casos de violencia de género en instituciones de educación superior en México, resaltando la incidencia de la violencia hacia las mujeres, señalando la necesidad de seguir investigando este tema (R. V. M.-M. E. J. D.-C. Juan Carlos Garduno, 2023). Finalmente, Alzyout discute en su artículo "Análisis de sentimientos de tweets en árabe sobre violencia contra las mujeres utilizando aprendizaje automático" la importancia del estudio de efectos en redes sociales mediante el comprender la percepción pública acerca de la violencia hacia las mujeres en el mundo árabe, proponiendo la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para analizar tweets en árabe sobre este tema (M. Alzyout, 2021).

Por lo tanto, se descubre que parte del problema que impide solucionar la problemática son los procesos largos y burocráticos en el ámbito jurídico, lo que dificulta un seguimiento adecuado y, en muchas ocasiones, provoca que el caso quede impune. Además, existe una falta de reconocimiento de los casos de violencia a causa de la carencia de conocimientos sobre el tema y la incertidumbre sobre dónde denunciar el delito. Del mismo modo, se reconoce la ausencia de oportunidades de crecimiento laboral y de acceso a herramientas para garantizar un sustento adecuado tanto para la víctima como para su familia. Por ello, resulta fundamental recolectar, analizar y dar seguimiento a los casos recopilados para posteriormente identificar cuáles son los orígenes de estos y así poder abordar la problemática de manera más efectiva.

TEORÍA

Violencia hacia la mujer en México

En los años recientes, México es testigo de un preocupante incremento En situaciones donde las mujeres son víctimas de actos violentos. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021) revelan que El 70.1% de las mujeres de 15 años o más han sufrido como mínimo un incidente de violencia en sus vidas. Las entidades con mayores índices incluyen el Estado de México (78.7%),

Ciudad de México (76.2%) y Querétaro (75.2%), presentando un desafío significativo que requiere una atención urgente.

Definición y dimensiones de la violencia hacia la mujer

La Organización Mundial de la Salud describe a la violencia de la siguiente manera "el uso intencional de la fuerza física o el poder, real o como amenaza, que cause o tenga muchas probabilidades de causar lesiones, muerte, daños psicológicos, trastornos del desarrollo o privaciones" (OMS, s.f.). El feminicidio, siendo la muestra más severa de la violencia de género, se ha vuelto una preocupación crítica en México, con 11,071 casos registrados en 2022, lo que equivale a una mujer asesinada cada dos horas y 30 minutos, según la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC) (Gobierno del estado de mexico, 2022).

Respuesta gubernamental y desafíos en la ayuda a las víctimas

A pesar de los esfuerzos del gobierno mexicano, el apoyo a las víctimas de violencia de género enfrenta barreras significativas. Aunque hay instituciones como el Centro de Atención Integral para Mujeres que ofrecen ayuda, las estadísticas muestran que solo una fracción mínima de las mujeres afectadas recibe apoyo. Esto subraya la urgente necesidad de optimizar la eficiencia y el alcance de programas de asistencia (Gobierno del estado de mexico, 2022).

Escasez de datos y detección de violencia hacia la mujer

Las iniciativas para la identificación de violencia hacia la mujer en español son limitadas, como indica el estudio sobre el "Modelo de Detección de Violencia hacia la Mujer en Redes Sociales" (Prieto Cruz, 2020). Las encuestas disponibles son escasas y poco frecuentes, lo que resulta en una falta de datasets de calidad esenciales para entender el problema en profundidad.

El rol de la inteligencia artificial (IA) en la recopilación de datos de calidad

La inteligencia artificial y las ciencias computacionales pueden jugar un papel fundamental en la recolección de datos de alta calidad para enfrentar la violencia contra la mujer. La IA, descrita por la UNESCO como "máquinas capaces de imitar funcionalidades de la inteligencia humana" (UNESCO, 2020), ofrece eficiencia y ahorro de costos. Es esencial explorar los antecedentes específicos de la aplicación de IA en la generación de datos vinculados con la violencia de género.

Tecnologías en el Contexto Mexicano

El ámbito tecnológico mexicano, Laravel es el framework de desarrollo web más popular, con una participación de mercado del 35%, seguido de cerca por Symfony con un 25%, según un estudio de la "Revista de Sistemas e Informática" en 2023 (Revista Científica de Sistemas e Informática , 2023). El uso de internet para acceder a centros de ayuda sociales en México está en aumento, con aproximadamente 10 millones de personas utilizando internet para este fin en 2023, representando el 11% de la población total del país, de acuerdo con datos de la Asociación Mexicana de Internet (Asociación Mexicana, 2023). Además, el administrador de BD más usado para páginas web en México es MySQL, con un 65.2% de utilización, seguido por PostgreSQL (29.7%), Microsoft SQL Server (9.4%) y MongoDB (5.7%) (Asociación Mexicana, 2023).

En cuanto a la creación de IA, el aprendizaje automático (machine learning) es la tecnología más utilizada en México, con un 75% de las empresas que desarrollan IA, según un estudio de la Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial en 2023 (Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial, 2023). Python emerge como la herramienta más utilizada para el tratamiento de datos, siendo el lenguaje de programación más popular con un 33.8% de los encuestados que lo utilizan, seguido de R (27.3%), SQL (19.2%) y MATLAB (10.8%), según una encuesta de Stack Overflow en 2023 (Stackoverflow, 2023).

Descripciones de los modelos a implementar

Árbol de decisión.
El modelo de AD es una herramienta predictiva que asigna observaciones de un ítem a conclusiones sobre su valor objetivo. Es una técnica de aprendizaje bajo supervisión, utilizada tanto en la categorización como en la estimación de valores, dentro de distintas aplicaciones. La organización de un árbol de decisión se iguala a un árbol invertido, en el que cada nodo interno simboliza una "prueba" o "decisión" basada en un carácter, cada rama indica la secuela de la prueba, y cada hoja terminal incorpora una etiqueta de clase (en tareas de clasificación) o un valor continuo (en tareas de regresión).

Estructura del Árbol de Decisión
- Nodos Internos: Representan un experimento en un atributo.
- Ramas: Representan la secuela del experimento en el atributo.
- Nodos Hoja: Representan la clase o el valor final.

Organización del Árbol de Decisión
Fragmenta el dataset en subconjuntos menor, utilizando una función de selección de atributos. Los criterios comunes para la división son la Entropía y el Índice de Gini.
- Seleccionar el Mejor Atributo para Dividir: Usar pautas como la ganancia de información o índice de Gini.
- Dividir el dataset: Dividir el dataset en subconjuntos basados en el mejor atributo.
- Crear Nodos y Hojas: Asignar el nodo correspondiente y repetir el proceso para cada subconjunto hasta que todos los nodos sean hojas o se cumpla algún criterio de parada.

Entropía e Información Ganada
La entropía mide la impureza de un conjunto de datos y se define como:

$$\textbf{Entropía}\ (\boldsymbol{S}) = \sum_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{c}} = \mathbf{1}\ \boldsymbol{p_i}\ \boldsymbol{log}_{\mathbf{2}}(\boldsymbol{p_i})$$

Donde $\boldsymbol{p_i}$ es la proporción de instancias de la clase $\boldsymbol{i}$ en el dataset $\boldsymbol{S}$ y $\boldsymbol{c}$ es el dígito de clases.
La ganancia de información se calcula como:

$$\textbf{Ganancia de Información}\ (\boldsymbol{S}, \boldsymbol{A}) = \textbf{Entropía}\ (\boldsymbol{S}) - \sum \boldsymbol{u} \in \boldsymbol{Valores}(\boldsymbol{A}) \frac{|\boldsymbol{S_u}|}{|\boldsymbol{S}|} \textbf{Entropía}(\boldsymbol{S_u})$$

Donde $\boldsymbol{S_u}$) es el subconjunto de $\boldsymbol{S}$ donde el atributo $\boldsymbol{A}$ tiene el valor $\boldsymbol{u}$.
Índice de Gini
El Índice de Gini calcula la posibilidad de que una instancia selecta al azar sea clasificada incorrectamente si se etiqueta aleatoriamente como la colocación de las etiquetas en el subconjunto:

$$\textbf{Gini}\ (\boldsymbol{S}) = \sum_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{c}} = \mathbf{1}\ (\boldsymbol{p_i})^{\mathbf{2}}$$

Para una división por el atributo A se calcula como:

$$\textbf{Gini}\ (\boldsymbol{S}, \boldsymbol{A}) = \sum \boldsymbol{u} \in \boldsymbol{Valores}(\boldsymbol{A}) \frac{|\boldsymbol{S_u}|}{|\boldsymbol{S}|} \textbf{Gini}(\boldsymbol{S_u})$$

(IBM, ¿Qué es un árbol de decisión?, 2020)

Random Forest.
Modelo de aprendizaje supervisado que adopta múltiples árboles de decisión hacia la prosperidad de la precisión y la robustez del modelo. Está basado en la apertura del "bagging" (bootstrap aggregating) y utiliza el muestreo aleatorio para generar múltiples subconjuntos de datos de entrenamiento. Este modelo se fundamenta en la creación de varios árboles de decisión utilizando conjuntos aleatorios de datos de entrenamiento. El resultado final de la clasificación es votado por los múltiples árboles. Cada árbol se entrena para minimizar la impureza de los nodos utilizando medidas como el índice Gini o la entropía.
- **Entropía**: Mide la impureza de un conjunto de datos.

$$\textbf{Entropía}\ (\boldsymbol{S}) = \sum_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{c}} = \mathbf{1}\ \boldsymbol{p_i}\ \boldsymbol{log}_{\mathbf{2}}(\boldsymbol{p_i})$$

Donde $\boldsymbol{p_i}$ es la proporción de instancias de la clase $\boldsymbol{i}$ en el dataset $\boldsymbol{S}$ y $\boldsymbol{c}$ es el dígito de clases.

- **Índice de Gini:** Mide la posibilidad de que una instancia selecta al azar sea clasificada incorrectamente si se etiqueta aleatoriamente.

$$\textbf{Gini}\ (\boldsymbol{S}) = \sum_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{c}} = \mathbf{1}\ (\boldsymbol{p_i})^{\mathbf{2}}$$

- **Bagging:** es una técnica de ensamblaje que genera varios subconjuntos de datos de entrenamiento mediante muestreo aleatorio con sucesión. Se entrena un modelo (árbol de decisión) en cada subconjunto y se agregan los resultados.
  Para un conjunto de entrenamiento D con n muestras, se crean B subconjuntos $\boldsymbol{D_1}$, $\boldsymbol{D_2}$, …, $\boldsymbol{D_B}$ mediante muestreo con reemplazo.
  (IBM, What is random forest?, 2020)

Redes Neuronales.
Modelos computacionales inspiradas en el cerebro humano está compuesto por estratos de nodos, que son unidades fundamentales llamadas neuronas. conectados entre sí, donde cada conexión tiene un peso asociado. Estas redes tienen la capacidad de aprender patrones complicados a partir de datos y se emplean ampliamente en tareas de clasificación, regresión, y reconocimiento de imágenes. procesamiento del lenguaje natural, entre otros.
Estructura de una Red Neuronal

- Capa de Acceso: Recibe las características del dataset.
- Capas Disimulas: Procesan la información que reciben mediante una serie de transformaciones.
- Capa de Salida: Proporciona la predicción final.

Cada nodo (neurona) en una capa, cada nodo está conectado a todos los nodos en la siguiente capa, y cada conexión posee un peso que se ajusta mediante el entrenamiento. Además, cada nodo posee una ocupación de activación que introduce no linealidad en el modelo.
Componentes Clave

1. **Pesos (W):** Parámetros que se modifican durante el entrenamiento para reducir al mínimo el error de predicción.

2. **Bias (b):** Parámetro adicional que se añade a la función de activación.

3. **Funciones de Activación:** Introducen no linealidad en el modelo. Las más comunes son:
   - **Sigmoid:** $\boldsymbol{\sigma = (z) = \frac{1}{1+e^{-z}}}$
   - **ReLU (Rectified Linear Unit):** $\boldsymbol{RELUX\ (z) = max(0, z)}$
   - **Tanh: tanh**$\boldsymbol{(z) = \frac{e^{z}-e^{-z}}{e^{z}+e^{-z}}}$
4. **Función de Pérdida (Loss Function):** Calcula la discrepancia entre la predicción del modelo y el valor real. Algunas comunes son:
   - Mean Squared Error (MSE) para regresión.
   - Cross-Entropy Loss para clasificación.
5. **Optimizadores:** Algoritmos que ajustan los pesos con el fin de hacer menor la función de pérdida. Algunos comunes son:
   - Stochastic Gradient Descent
   - Adaptive Moment Estimation

Propagación hacia Adelante
La entrada pasa mediante la red capa por capa, multiplicándose por los pesos y sumando los bias, y luego aplicando la función de activación. La salida de una neurona se define como:

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{x} + \boldsymbol{b})$$

Donde $\boldsymbol{W}$ son los pesos, $\boldsymbol{x}$ es la entrada, $\boldsymbol{b}$ es el bias, y $\boldsymbol{\sigma}$ es la función de activación.

Propagación hacia Atrás (Backpropagation)
El algoritmo de backpropagation se utiliza para entrenar la red ajustando los pesos y sesgos para hacer menor la función de pérdida. Deduce el gradiente de la función de pérdida respecto a cada peso manejando la regla de la cadena y renueva los pesos en la dirección opuesta al gradiente.
(IBM, ¿Qué es una red neuronal?, 2020)

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y métodos

Para tratar el análisis de la violencia hacia la mujer, se utiliza una metodología estructurada permitiendo aumentar la confianza de los experimentos y obtener resultados confiables. La ciencia de datos adopta un diseño pluridisciplinar en el estudio, utilizando la metodología fundamental para la ciencia de datos (IBM, Metodología Fundamental para la Ciencia de Datos, 2020). Este enfoque está orientado a explorar y abordar el desafío de la violencia hacia la mujer en parejas identificando patrones y soluciones efectivas a través del análisis de datos.

El sujeto del estudio se centra en datos representativos de mujeres que experimentaron violencia en relaciones de pareja. El análisis abarca un período de 3 años, centrado en datos recopilados entre 2020 y 2023. El ámbito del estudio es global, con un enfoque particular en regiones con altas tasas de incidencia reportadas. Las estrategias de recolección de datos se llevarán a cabo mediante la plataforma Mujer Segura, incluyendo variables como la edad, localización geográfica, frecuencia y tipo de violencia experimentada, y seguimiento del caso. El estudio estadístico de los datos se compone de 9 etapas que están en la metodología: comprensión del negocio, requisitos de datos, recopilación de datos, preparación de datos, modelado, evaluación e implementación.

Descripción del dataset

La muestra de este estudio consistió en 180 registros recopilados de la plataforma Mujer Segura, una plataforma web que documenta incidencias de violencia contra la mujer. Esta plataforma gestionada por la organización con fines no lucrativos que incluye tres instituciones: el Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla y el Instituto Municipal de la Mujer de Valle de Bravo. La plataforma fue creada en 2022 en respuesta al aumento de la violencia hacia la mujer (Segura, 2022). Mujer Segura cuenta con un total de 2335 registros de víctimas de violencia siendo mujeres, tomando una muestra del 7%.

Estas mujeres sufren violencia en pareja, abarcando una variedad de modalidades y así los tipos de violencia, edades, y dependencias a las que acudieron. Para asegurar la descripción de la muestra, se manejó un muestreo aleatorio estratificado basado en un grupo específico de población determinado por las siguientes características: ser mujer, tener pareja, sufrir violencia y tener una edad entre 18 y 50 años. Posteriormente, se aplicó un muestreo aleatorio simple dentro de cada estrato para asegurar que cada grupo estuviera adecuadamente representado en la muestra.
Todos los registros de las víctimas están protegidos por la ley de protección de datos personales (CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, 2010).

En la recolección y manipulación de los datos, no se incluyeron datos personales de los estudiantes, ya que no son necesarios para el estudio y la implementación de los modelos. Las variables se describen en la siguiente tabla (ver la Tabla 1).

Tabla 5.

Descripción de las Variables y Tipo de Dato.

Campo	Variable	Descripción	Tipo dato
1	Victima	Identificador único para cada víctima.	Categórico.
2	Edad	Edad de la víctima.	Categórico.
3	Situación Conyugal	Estado civil de la víctima, codificado como un número entero.	Categórico
4	Sexo	Sexo de la víctima (en este contexto, todas las víctimas son mujeres, por lo que todos los valores son 1).	Binario.
5	Hijos	Número de hijos de la víctima.	Binario.
6	Grupo Étnico	Grupo étnico al que pertenece la víctima, representado por un número entero.	Binario.
7	Nacionalidad	Nacionalidad de la víctima, representada por un número entero.	Binario.
8	Idioma	Idioma principal de la víctima.	Binario.
9	Domicilio	Tipo de domicilio de la víctima, codificado como un número entero.	Binario.
10	Municipio	Municipio donde reside la víctima, representado por un número entero.	Binario.
11	Violencia	Tipo de violencia sufrida por la víctima, representado como una cadena de texto (ej. "Acoso sexual", "Psicológica").	Categórico.
12	Modalidad	Modalidad de la violencia, codificada como un número entero.	Categórico.
13	Código 100	Código asociado con la violencia, representado por un número entero.	Binario.
14	Numero Agresores	Número de agresores implicados en el incidente.	Binario.
15	Vive con	Condiciones de convivencia de la víctima, representado por un número entero.	Binario.
16	Dependencia	Dependencia o institución que brindó atención a la víctima.	Objeto.

La fuente original de la hoja de datos se obtuvo de la base de datos proviene de la base de datos de la plataforma Mujer Segura, que almacena información de incidencias de violencia hacia mujeres, proporcionando así un conjunto de datos primario fundamentado en fuentes públicas confiables. Esto asegura la validez y la integridad de los datos para su posterior estudio y aplicación en la investigación (ver Tabla 2).

Tabla 6.

Dataset original (Fragmento).

#	Victima	Edad	Situación Conyugal	Sexo	Hijos	….	Dependencia
1	1	33	1	1	2	….	CENTRO NARANJA DE ATENCION
2	2	32	1	1	2	….	CENTRO NARANJA DE ATENCION
3	3	28	1	1	2	….	CENTRO NARANJA DE ATENCION
….	….	….	….	….	….	…..	….
179	179	49	2	1	3	…..	CENTRO NARANJA DE ATENCION
180	180	29	2	1	3	…..	CENTRO NARANJA DE ATENCION

Experimentos.

En este estudio, se desarrollaron y evaluaron tres enfoques de aprendizaje automático: Árbol de Decisión (AD), Random Forest (RF) y Redes Neuronales (RN), utilizando un dataset que contiene información de incidentes de violencia. El objetivo es predecir el tipo de violencia experimentada por individuos basándonos en varias características sociodemográficas y contextuales.

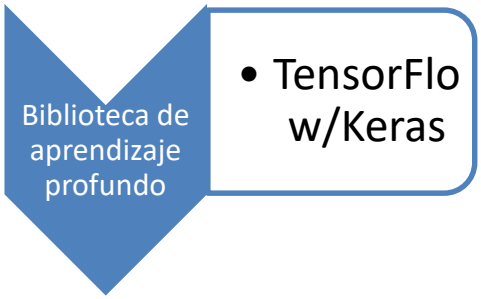
Preprocesamiento de Datos
Para los tres modelos, los datos se cargaron desde un archivo CSV utilizando la biblioteca panda. Los valores faltantes en el conjunto de datos fueron manejados adecuadamente, ya sea rellenándolos con valores adecuados o eliminando las filas/columnas con datos faltantes. Las de variables categóricas se codificaron utilizando LabelEncoder, convirtiéndolas en una conformación numérico conveniente para el enfoque; esto se aplicó a las variables “Violencia” y “Dependencias”.

Posteriormente, se separaron lo que son la variable objetivo y aquellas características, dividiendo el conjunto de datos establecido en las características (X) y la variable objetivo (y). La variable objetivo fue la columna codificada "Violencia". Solo para las redes neuronales, se realizó el proceso de normalización de los datos para garantizar la uniformidad de las características tuvieran una escala equivalente, es importante para la preparación del enfoque de redes neuronales. Luego, los datos se fragmentaron en los conjuntos de datos para entrenamiento y evaluación utilizando un equilibrio del 80-20.

Entrenamiento del Modelo
Se inicializaron los clasificadores de AD y RF con un estado aleatorio especificado de 42 para garantizar la reproducibilidad. Para la edificación del modelo de RN, se utilizó una biblioteca, (ver Esquema 1).

Esquema 1.

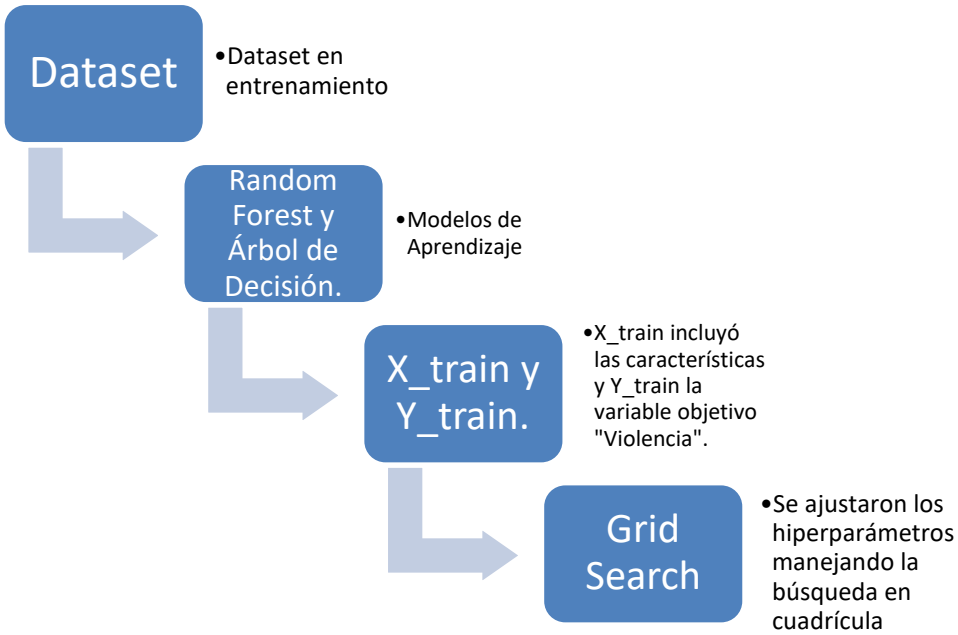
Biblioteca de aprendizaje



La arquitectura comprendía capas de entrada, capas ocultas que utilizan la función de activación ReLU y una capa final que utiliza la función de activación softmax para la clasificación multiclase. El modelo de RN se configuró utilizando un optimizador y una función de pérdida apropiada para la clasificación multiclase (e.g., categorical_crossentropy) y métricas de evaluación (e.g., accuracy). Mediante los esquemas 2 y 3 se establecen el entrenamiento de los modelos (ver Esquema 1 y Esquema 2).

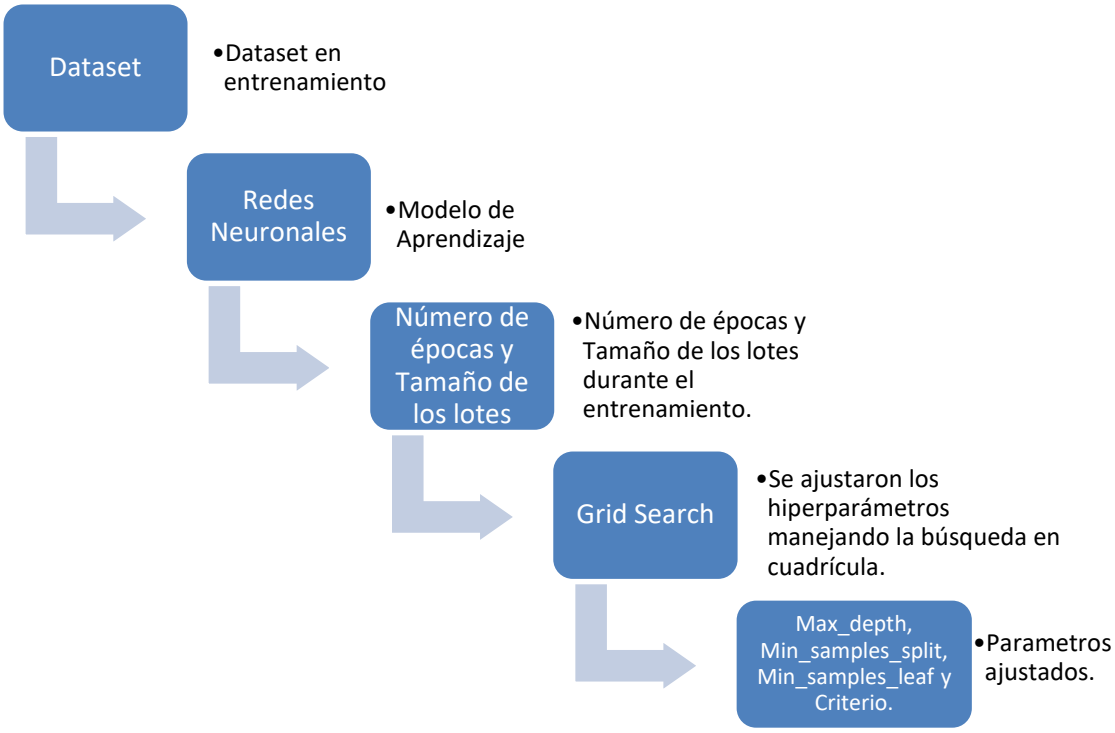
Esquema 2 .

Modelos entrenados similares.



Esquema 3.

Modelo entrenado.



Para cada modelo se agregaron tanto la Curva ROC como la matriz de confusión:

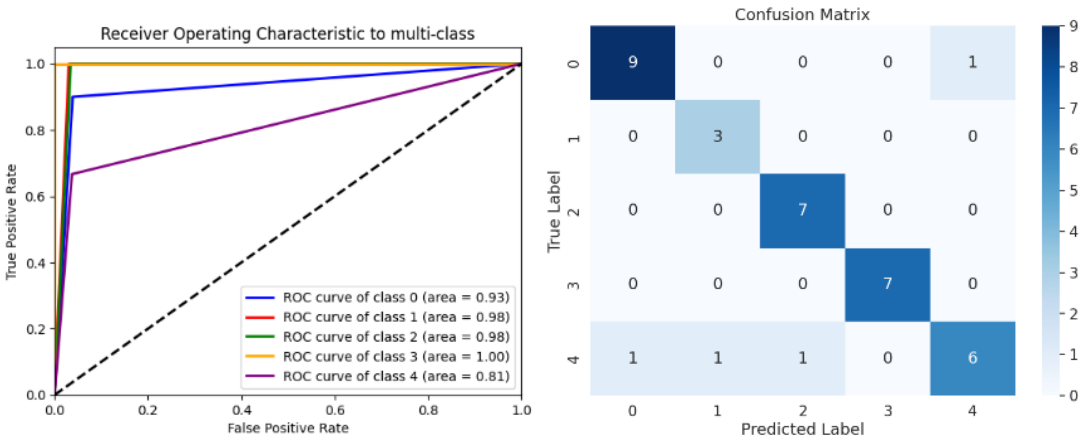
Árbol de Decisión:
La Figura 1 presenta la Curva ROC y las áreas bajo la curva (AUC) para cada clase, proporcionando un resumen numérico de la capacidad del modelo.
Los valores AUC fueron:

- Clase 0 = 0.93.
- Clase 1 = 0.98.
- Clase 2 = 0.98.
- Clase 3 = 1.00.
- Clase 4 = 0.81.

Lo que señala un desempeño eficaz del modelo.
La matriz de confusión detalla que en la clase 0, 9 instancias fueron correctamente clasificadas y 1 fue erróneamente clasificada como clase 4. Para la clase 4, de sus instancias, 6 se clasificaron correctamente y una se clasificó erróneamente en cada una de las clases 0, 1 y 2.

Figura 4.

Curva ROC y matriz de confusión del modelo AD



Random Forest:
La Figura 2 presenta la Curva ROC y las áreas bajo la curva (AUC) para cada clase, proporcionando un resumen numérico de la capacidad del modelo.

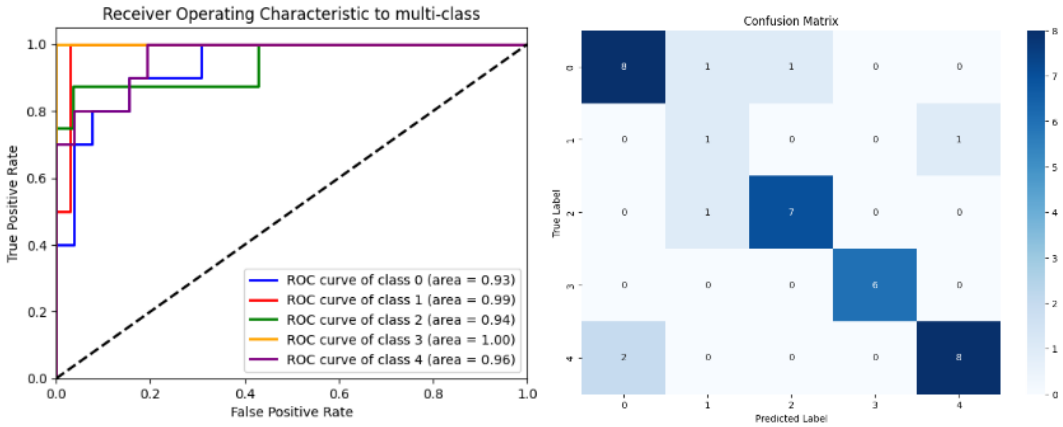
Los valores AUC son:

- Clase 0 = 0.93.
- Clase 1 = 0.99.
- Clase 2 = 0.94.
- Clase 3 = 1.00.
- Clase 4 = 0. 96.

Estos indican un buen rendimiento del modelo.
La matriz de confusión mostró que hay 8 instancias donde la clase 0 fue predicha correctamente, y 2 instancias donde la clase 4 fue predicha incorrectamente como clase 0.

Figura 5.

Curva ROC y Matriz de Confusión del Modelo RF



Redes Neuronales:
La Figura 3 presenta la Curva ROC y las áreas bajo la curva (AUC) para cada clase, proporcionando un resumen numérico de la capacidad del modelo.

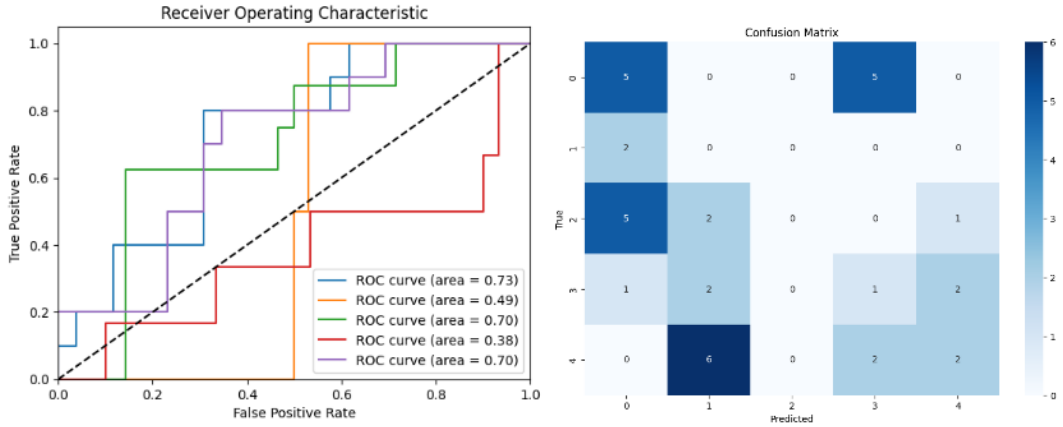
Los valores AUC son:

- Clase 0 = 0.24.
- Clase 1 = 0.65.
- Clase 2 = 0.34.
- Clase 3 = 0.60.
- Clase 4 = 0.60.

Lo que indica un bajo rendimiento del modelo.
Como así mismo la matriz de confusión que muestra que en la clase 0, 2 instancias fueron correctamente clasificadas y 5 erróneamente clasificadas. En la clase 4, 7 instancias se clasificaron correctamente y 3 erróneamente.

Figura 6 .

Curva ROC y Matriz de Confusión del Modelo RN



Evaluación del Modelo

Cada modelo se empleó para pronosticar la variable de interés en el conjunto de evaluación. Se calcularon varias métricas para analizar el funcionamiento del modelo, incorporando precisión, recall, puntaje F1 y la matriz de confusión. Además, se calcularon y graficaron las curvas ROC y AUC para cada clase, evaluando la suficiencia del modelo para diferenciar entre clases.

Se observaron las siguientes métricas de desempeño:

Árbol de Decisión: Se obtuvo una precisión global del 83%, con una precisión específica del 84% y un recall (sensibilidad) del 88%. Esto determina que el modelo fue apto de identificar el 88% de todos los casos reales. Además, el F1-score fue del 84%, lo que demuestra un buen balance entre la precisión y la exhaustividad (recall).
Random Forest: Se logró una precisión global del 82.5%, con una precisión del 83% y un recall del 79%. El F1-score fue del 84%, similar al del Árbol de Decisión, lo que apunta un buen rendimiento en términos de equilibrio entre precisión y recall.

Redes Neuronales: Se registró una precisión global del 19%, con una precisión del 20% y un recall del 14%. Esto muestra que el modelo solo fue apto de identificar el 14% de todos los casos reales. Además, el F1-score fue del 16%, lo que indica una función significativamente menor en comparación con los otros dos modelos. (ver la Tabla 3) para más información.

Tabla 7.

Comparación de rendimiento de los modelos.

Modelo	Muestra	Exactitud	Precisión	Sensibilidad	F1-Score
Árbol de decisión	80/20	**83%**	**84%**	**88%**	**84%**
Random Forest	80/20	82.5%	83%	79%	84%
Redes Neuronales	80/20	19%	20%	14%	16%

Los modelos de Árbol de Decisión y Random Forest mostraron un beneficio similar y sólido en términos de precisión y recall. En contraste, la Red Neuronal presentó un desempeño considerablemente inferior en la identificación de hechos reales de violencia hacia la mujer en el municipio de Donato Guerra, Estado de México.

RESULTADOS

En este estudio, se emplearon tres modelos de aprendizaje automático AD, RF y RN para predecir el tipo de violencia experimentada por individuos, basándose en varias características sociodemográficas y contextuales. Se manejó un conjunto de datos de 180 mujeres víctimas de violencia.

Los resultados indican que los modelos de AD y RF lograron una precisión global entre 82.5% y 83%, con una precisión por clase entre 83% y 84% tanto en la clasificación de la deserción como de la no deserción. La sensibilidad (recall) para la clase de deserción mejoró significativamente después del ajuste de hiperparámetros, situándose entre 79% y 88%. Esto indica una capacidad mejorada de estos modelos para identificar correctamente a las mujeres en riesgo de experimentar violencia. La mejora en el recall de la clase de deserción mediante este estudio demuestra el potencial de los modelos de aprendizaje automático en la identificación y clasificación de incidentes de violencia, proporcionando valiosos insights para mejorar las estrategias de intervención y apoyo. El área bajo la Curva ROC (AUC) para AD se mantuvo entre 0.81 y 1.00, mientras que para RF estuvo entre 0.93

y 1.00, reflejando un buen rendimiento de los modelos. En contraste, las RN obtuvieron una precisión de 19%, un recall de 14% y un F1-score de 16%, lo cual indica un desempeño mucho menor. El área bajo la Curva ROC (AUC) para este modelo estuvo entre 0.24 y 0.60, reflejando su limitada efectividad. Estos resultados indican un desempeño significativamente inferior de las RN en comparación con los modelos de AD y RF.

Conclusiones

Este estudio demuestra el potencial del aprendizaje automático para abordar y mitigar la violencia hacia las mujeres mediante la implementación de la plataforma Mujer Segura. La utilización de modelos de AD y RF ha permitido alcanzar precisiones significativas en la predicción de tipos de violencia, resaltando su habilidad para detectar casos de riesgo con una precisión global del 83% y 82.5%, respectivamente. Estos modelos superaron significativamente a las RN que mostraron un rendimiento inferior.

La plataforma Mujer Segura no solo optimiza la recopilación y análisis de datos sobre violencia de género, sino que también asegura la privacidad y seguridad de las usuarias. Este proyecto destaca la relevancia del rol de la tecnología y la inteligencia artificial en la prevención de la violencia de género, proporcionando herramientas eficientes para la intervención temprana y el apoyo a las víctimas.

A pesar de los desafíos, como la falta de datos precisos y la necesidad de una mayor capacitación y recursos para las mujeres, los resultados obtenidos apuntando que la aplicación de técnicas de aprendizaje automático puede mejorar notablemente la atención y respuesta a la violencia de género. Este proyecto subraya el papel crucial de las mujeres en la ciencia y la tecnología para enfrentar y resolver problemas sociales críticos, promoviendo así el bienestar de la sociedad. Las futuras investigaciones deberían centralizar en la mejora de los modelos existentes y en la integración de sistemas expertos para una respuesta aún más efectiva y personalizada.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, E. (2023). *Domestic violence and women's earnings in Mexico*. Obtenido de Estudios Econ'omicos: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=59775364004

Armenta, A. L. (2023). *Gender-based violence in Mexico: A critical and causal inference approach*. Obtenido de Revista de Ciencias Sociales y Humanidades: https://escholarship.org/uc/item/6p08t41r

Asociación Mexicana. (2023). *Uso de internte*. Obtenido de Asociación Mexicana de internet: https://www.asociaciondeinternet.mx/

CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. (2010). *LEY FEDERAL DE PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES* . Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPDPPSO.pdf

Contreras, M. d. (2023). Violencia contra la mujer: Comentarios en torno a la ley general de acceso a la mujer a una vida libre de violencia. En v. 4. Psychosocial Intervention. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci arttext\& pid=S0041 86332008000200017\&lng=es\&nrm=iso.

Delgado, J. A. (2006). Por un enfoque integral de la violencia familiar. En P. Intervention. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci.

Gobierno del estado de mexico. (2022). *Feminicidios*. Obtenido de Gobierno del estado de mexico: https://www.gob.mx/sspc

Guedes, A. (2014). *Violencia contra las mujeres EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Obtenido de Organizacion Pañamericana de la salud: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&alias=24353-violencia-contra-mujeres-america-latina-caribe-analisis-comparativo-datos-poblacionales-12-paises-353&category_slug=violencia-5197&Itemid=270&lang=en

I. Feldfeber, Y. B. (2022). Feminisms in artificial intelligen- ce: Automation tools towards a feminist judiciary reform in argentina and mexico. En KTH, *Media Technology and Interaction Design,* (págs. 202-223).

IBM. (2020). *¿Qué es un árbol de decisión?* Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/mx-es/topics/decision-trees

IBM. (2020). *¿Qué es una red neuronal?* Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/mx-es/topics/neural-networks

IBM. (2020). *Metodología Fundamental para la Ciencia de Datos*. Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/downloads/cas/6RZMKDN8

IBM. (2020). *What is random forest?* Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/topics/random-forest#:~:text=Random%20forest%20is%20a%20commonly,Decision%20trees

INEGI. (24 de 10 de 2021). *ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA INTERNACIONAL DE LA MUJER*. Obtenido de INEGI: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2021/mujer2021_Nal.pdf

M. Alzyout, E. A. (2021). Sentiment analysis of arabic tweets about violence against women using machine learning. En ieeexplore. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9464600/references\#references.

M. I. T. A. U. Parveen, S. I. (2020). Economic exploitation of housemaids: victims of intimate partner violence. En R.́ÓN., *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades.* https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=643770320030.

Mujeres, I. N. (Agosto de 2022). *Violencia contra las mujeres*. Obtenido de INMUJERES: http://estadistica-sig.inmujeres.gob.mx/formas/tarjetas/Violencia.pdf

Mujeres, O. (2020). *Violencia contra mujeres y niñas en el espacio digital: Lo que es virtual tambiéen es real*. Obtenido de Revista de Ciencias Sociales y Humanidades: https://mexico.unwomen.org/es/digiteca/publicaciones/2020-nuevo/diciembre-2020/violencia-digital

OMS. (s.f.). *Prevención de la violencia*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: https://www.paho.org/es/temas/prevencion-violencia

Prieto Cruz, G. A. (2020). *Modelo de detección de violencia contra la mujer en redes*. Obtenido de UTP: https://hdl.handle.net/20.500.12867/3044

R. V. M.-M. E. J. D.-C. Juan Carlos Garduno, D. V.-C. (2023). Implementación de aprendizaje profundo para la identificación de patrones e incidencias de violencia de género en contextos mexicanos . En *Manual de investigación sobre inteligencia artificial y robótica aplicadas a procesos gubernamentales* (págs. 345–371). https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5624-8.ch015.

Revista Científica de Sistemas e Informática . (2023). *Tecnologias*. Obtenido de Revista Científica de Sistemas e Informática: https://revistas.unsm.edu.pe/index.php/rcsi

Salud., O. P. (2020). *Violencia contra la mujer*. Obtenido de Organización Panamericana de la Salud.: https://www.paho.org/es/temas/violencia-contra-mujer#:~:text=La%20violencia%20contra%20las%20mujeres%20y%20las%20ni%C3%B1as%20es%20un,millones%20de%20mujeres%20y%20ni%C3%B1as.

Segura, P. M. (2022). *Plataforma Mujer Segura*. Obtenido de Plataforma Mujer Segura: https://mujersegura.net/

Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial. (2023). *Inteligencia artificiall*. Obtenido de Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial: https://smia.mx/

Stackoverflow. (2023). *Herramienta mas utilizada*. Obtenido de stackoverflow: https://stackoverflow.com/

UNESCO. (Mayo de 2020). *La inteligencia artificial en la educación*. Obtenido de UNESCO : https://www.unesco.org/es/digital-education/artificial-intelligence#:~:text=La%20Inteligencia%20Artificial%20(IA)%20proporciona,la%20consecuci%C3%B3n%20del%20ODS%204.

COMPOSITOS MAGNETICOS PARA CONVERTIDORES CD-CD PARA ALTAS FRECUENCIAS

González García Jesús Pascual, Rodríguez Ruiz Noemi Edith, Juárez Balderas Mario Alberto, Cabal Velarde Javier Gustavo.

TecNM/ITS de Irapuato
MIP23110001@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Los compositos magnéticos son materiales los cuales son una mezcla de uno o varios materiales para así alterar las propiedades magnéticas, tiene una gran utilidad aplicando los a convertidores electrónicos de CD-CD, esto se debe principalmente a la gran rapidez de magnetización y de desmagnetización, lo cual implica una reducida área del ciclo de histéresis, debido a esta característica en este trabajo se propone el uso de dichos materiales para su aplicación en convertidores electrónicos de CD-CD, de alta frecuencia, sin embargo a altas frecuencias bajo ciertas circunstancias pueden ser ineficientes.

La adecuada construcción de los núcleos, (bobinas y transformadores) y combinaciones de compositos magnéticos, influye considerablemente en la eficiencia del sistema. El uso de compositos magnéticos como la magnetita busca mejorar la eficiencia y mitigar los efectos parásitos que afectan la misma. El presente artículo detalla el proceso de preparación de materiales destinados a la manufactura de núcleos toroidales. Inicialmente, se emplean materiales tales como aluminio, cobre, níquel, hierro, magnetita y ferrita, los cuales son sometidos a un proceso de limado con el propósito de reducir su tamaño. Seguidamente, se lleva a cabo una etapa de molienda mediante el uso de un molino de bolas, con el fin de disminuir aún más las dimensiones de las partículas. Cada material es molido por un período de tiempo específico. Posteriormente, se procede a la fabricación de los núcleos toroidales utilizando moldes impresos en 3D. Luego, se aplica presión y se inducen corrientes alrededor del molde para asegurar la cohesión del núcleo. Adicionalmente, se presenta experimentalmente cómo la inducción magnética ordena las partículas dentro del núcleo.

Por último, se describe el procedimiento para obtener el ciclo de histéresis mediante un circuito experimental, así como el análisis del convertidor cd-cd, donde se explica el comportamiento de las corrientes y voltajes del inductor en función de la eficiencia.

INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales magnéticos tiene una gran importancia en el área de la electrónica, ya que son empleados en la fabricación de núcleos magnéticos y estos son empleados en la fabricación de inductores y transformadores, los cuales son empleados en fuentes de voltaje, electrodomésticos y dispositivos electrónicos en general.
El avance de la tecnología y la tendencia a compactarse genera la necesidad de que los núcleos magnéticos sean cada vez más pequeños y eficientes, esto se logra empleando materiales a base de compositos magnéticos, para así construir núcleos que sean compactos y eficientes.

TEORÍA

Propiedades magnéticas

La densidad de flujo B es la cantidad de líneas de flujo por unidad de área, medida en teslas, y se determina por $B = \Phi/A$. La permeabilidad μ mide la facilidad de un material para formar un campo magnético, con diferentes materiales clasificándose como diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, entre otros, según su permeabilidad relativa.

Momentos y dominios magnéticos

El momento magnético es una medida de la tendencia de un objeto a interactuar con un campo magnético externo. Es una propiedad vectorial que representa tanto la magnitud como la dirección de la capacidad de un objeto para generar un campo magnético o para alinearse con uno existente. El dominio es una región dentro de un material magnético en el cual los momentos magnéticos de los átomos están alineados de manera ordenada apuntando en la misma dirección.[1], [2]

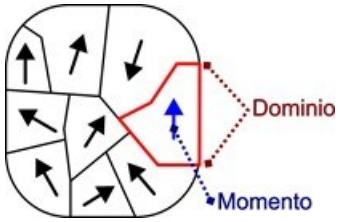


Figura 7. Descripción grafica de dominio y momento.

Cuando los dominios se encuentran desalineados se determina que el material se encuentra desmagnetizado *Figura 8*, mientras que los dominios se encuentran alineados se considera que el material esta magnetizado *Figura 9*.

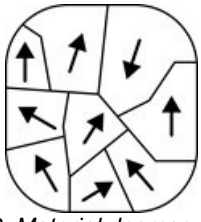


Figura 8. Material desmagnetizado.

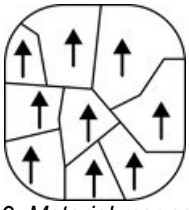


Figura 9. Material magnetizado.

Inductores

Los inductores se usan en numerosas aplicaciones electrónicas como fuentes de alimentación, transformadores y motores eléctricos, almacenando energía en forma de campo magnético mediante un alambre enrollado alrededor de un núcleo magnético. Figura 4.[6]

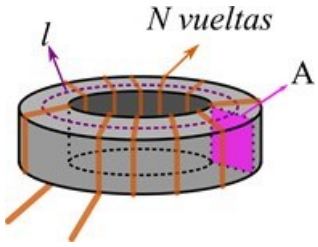


Figura 4. Representación de un inductor toroidal.

La inductancia, medida en henrys (H), es la principal propiedad de una bobina, que se opone a cambios en la corriente.

$$L = \frac{N^2 \mu \mathrm{A}}{l} \qquad (1)$$

Donde *N* es el número de vueltas, l es la longitud, *A* es el área de la sección transversal y μ la permeabilidad del material del núcleo. Como se observa en la ecuación la inductancia puede incrementar aumentando el número de vueltas al núcleo, así como también al aumentar el área de este seguido de una permeabilidad mayor.

Elementos parásitos de inductores acoplados magnéticamente

En un transformador, las inductancias parásitas, L_m (inductancia magnetizante del devanado primario) y L_l (inductancia de dispersión), son cruciales; L_m transfiere energía mediante flujo magnético, mientras que L_l resulta del flujo sobrante que no enlaza completamente ambos devanados, causando un acoplamiento imperfecto.[7], [8],Como se muestra en la Figura. 5.

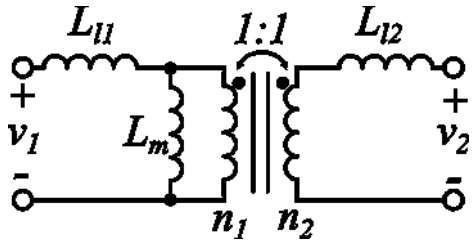


Figura 5. Elementos parásitos de inductores acoplados magnéticamente.

Operar transformadores a altas frecuencias permite reducir su tamaño para una potencia dada, ya que, a mayor frecuencia, el transformador puede ser más pequeño. Además, al ser más compacto, requiere menos alambre de cobre, lo que reduce las pérdidas y mejora la eficiencia del transformador.[8], [9]**.**

Convertidor Flyback

El convertidor Flyback es un convertidor CD-CD los cuales parten de una fuente de voltaje continua a la entrada y consiguen un valor de voltaje estable a la salida sin que esta se vea afectada por posibles fluctuaciones en el voltaje de entrada. La topología del convertidor se muestra en la Figura 6.

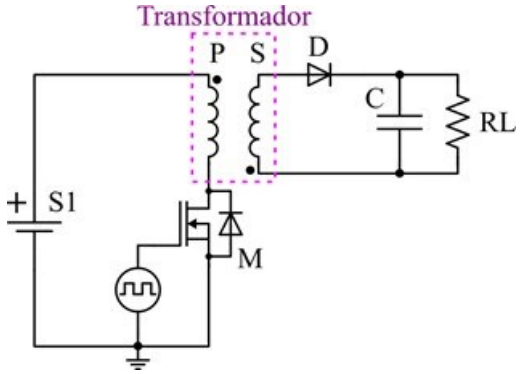


Figura 6. Convertidor Flyblack.

Perdidas por conmutación

Las pérdidas por conmutación son una forma de pérdidas de energía que ocurren en los dispositivos electrónicos de conmutación, como los transistores y los diodos, cuando estos cambian de estado (de encendido a apagado o viceversa). Estas pérdidas son particularmente relevantes en circuitos de potencia y en aplicaciones donde se manejan altas frecuencias de conmutación, como en fuentes de alimentación conmutadas y en convertidores de potencia.[10]

Las perdidas por conmutación se determinaron empleando

$$Pérdidas = \frac{\Delta t * Pmax}{2} * fr \qquad (2)$$

Donde Δt es el lapso en el que se encuentra el pico de potencia a analizar, $Pmax$ es el pico de potencia disipada, fr es la frecuencia de conmutación del convertidor, siendo de 100 kHz

Las pérdidas por conmutación aumentan con la frecuencia de conmutación y se ven afectadas por la velocidad del dispositivo (tiempos de subida y bajada) y las condiciones de operación (voltaje y corriente). Reducir estas pérdidas es crucial para mejorar la eficiencia energética en sistemas electrónicos de potencia. Técnicas para mitigar las pérdidas incluyen el uso de dispositivos de conmutación rápidos (como MOSFETs y IGBTs), técnicas de conmutación suave, y diseños de circuitos con mejor control de conmutación.[11]

PARTE EXPERIMENTAL

El proceso comenzó con la reducción de partículas de los materiales originales, adquiridos en diferentes formas como bloques, barras, fragmentos grandes y polvo. La reducción de partículas se realizó mediante limado, seguido de pulverización mediante un molino de bolas (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Molino de bolas.

Figura 8. Muestra de pulverizado de material.

Como **segunda parte** del proceso se emplea resina en dos porciones, donde se mezcló 10 gr de material en 0.9 gr de resina, realizando la mezcla hasta obtener una mezcla homogénea con textura arenosa, insertando el material del recipiente a un molde, finalizando con una aplicación de fuerza para compactar el material. El proceso se muestra en la Figura 9.

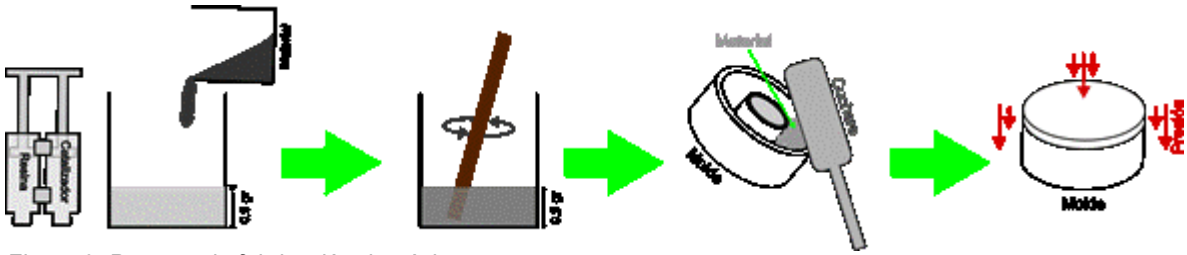


Figura 9. Proceso de fabricación de núcleos.

Tercera parte del proceso consto de inmediatamente finalizando la compactación del núcleo se procede a inyectar corriente eléctrica alinear las partículas del material, Figura 10, el cual consta de una fuente de voltaje, resistencia de 1 ohm y el molde con el núcleo, se tuvo en cuenta que el núcleo tiene un tiempo de 5 min para que la resina solidifique.

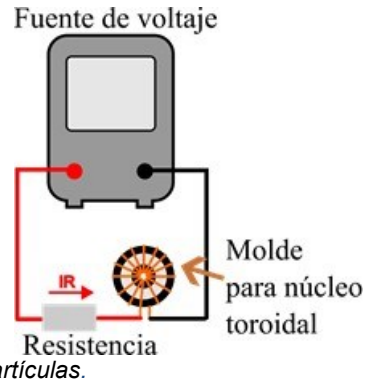


Figura 10. Armado para alinear las partículas.

En Figura 11 al no aplicar un campo magnético a los núcleos se obtienen partículas desalineadas, mientras que al aplicarlo se obtienen partículas ordenadas en el sentido del campo que se induce Figura 12, el alineamiento de las partículas se realiza para facilitar el flujo de campo magnético.

Figura 11. Partículas sin alinear.

Figura 12. Partículas alineadas.

Para caracterizar los núcleos magnéticos y seleccionar los núcleos para emplearlos en el convertidor se consideró la inductancia como un valor de gran importancia, este se realizó empleando un medidor LCR Figura 13, la medición consto en medir la inductancia a diferentes frecuencias para así observar el cambio que se puede tener según el material del cual está formado el núcleo.

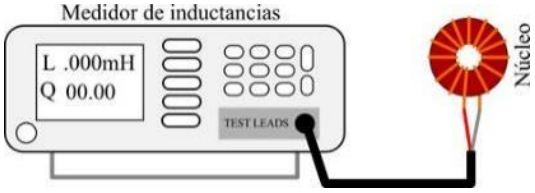


Figura 13. Medidor LCR.

Obtención del ciclo de histéresis

Este se realizó empleando un osciloscopio digital, generador de funciones y el circuito de Figura 14, el cual consta de resistencias, transformador y un capacitor.

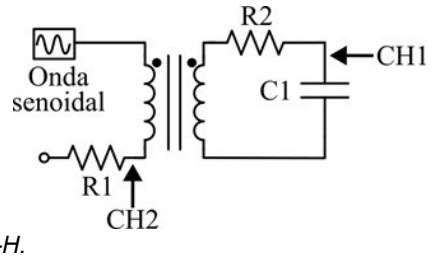


Figura 14. Circuito experimental B-H.

Para la obtención del ciclo de histéresis se empleó el osciloscopio en modo X-Y, donde el canal 1 mide el voltaje del capacitor y el canal 1 mide el voltaje de la resistencia R1. El prototipo se muestra en la Fig. 15.

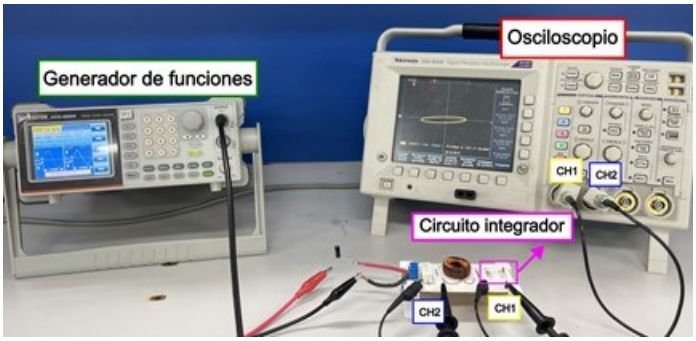


Figura 15. Medición del ciclo de histéresis.

RESULTADOS

Como resultado del proceso de molienda se obtuvieron partículas del orden de los micrómetros como se puede observar Figura 16, donde el material que se encuentra con un menor tamaño es el níquel seguido de la ferrita, zinc y el hierro. El tamaño de las partículas se describe en Figura 16.

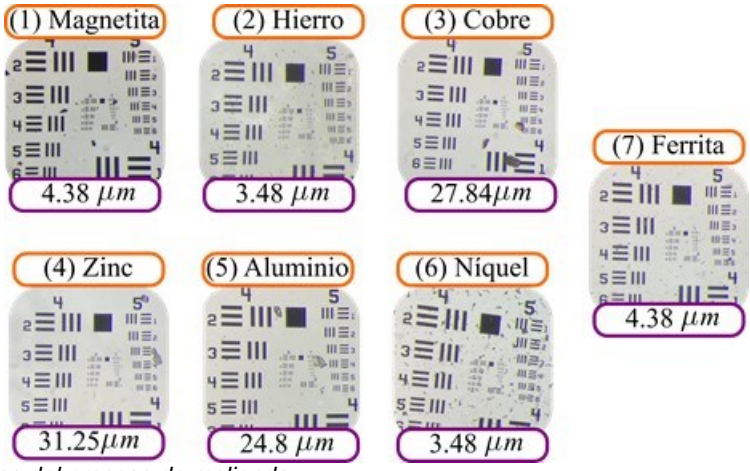


Figura 16. Resultados del proceso de molienda.

Para facilitar la clasificación de los núcleos se empleó un número que identifique el material y así mismo identificar la concentración de materiales que tiene cada núcleo. *Tabla 8*.

Tabla 8. Tabla para clasificar los núcleos magnéticos.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Magnetita	Hierro	Cobre	Zinc	Aluminio	Níquel	Ferrita

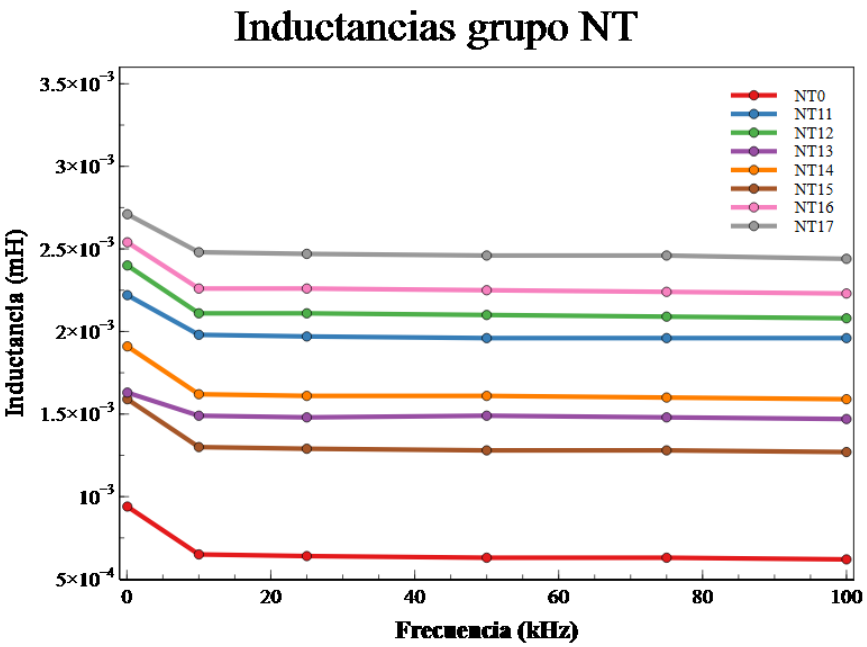


Figura 17. Resultados de la medición de inductancias.

Los resultados de la medición de inductancia de los núcleos magnéticos NT se representan en Figura 17, se seleccionó a los núcleos magnéticos con mayor inductancia siendo NT17, NT16.Donde la concentración de los materiales se realizó en el grupo denotado NT es una concentración de 150% en 10 gr, la cual reparte 100% de magnetita y 50% de otro material magnético, para la mezcla NT167 de empleo la combinación 100% de magnetita, 50% de ferrita y 50% de níquel, así mismo se empleó una proporción para el 2NT167 donde este cuenta con un 50% de magnetita y 100% de ferrita y 50% de níquel, realizando una segunda medición para comparar los valores de inductancia Figura 18.

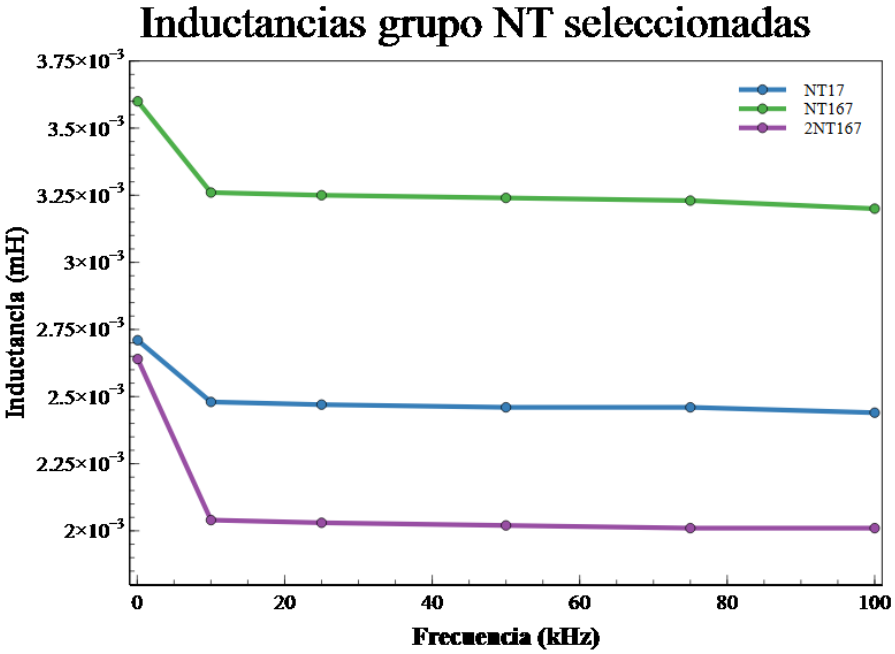


Figura 18. Segunda medición de inductancia.

Como se observa en las Figura 19, 20, 21 los núcleos seleccionados son NT167 y 2NT167 los cuales están formados con los materiales que tienen mayor inductancia en comparación de los que están formados por solo 2 elementos, los núcleos a analizar son los núcleos NT17, NT167, 2NT167 y el núcleo comercial. La configuración para obtener los ciclos se histéresis se configuro con el mismo número de vueltas con 25 vueltas en el primario e igual al secundario.

Figura 19. Núcleo NT167.

Figura 20. Núcleo 2NT167

Figura 21. Núcleo 61 toroide.

El objetivo de emplear el NT17 es ser el punto de comparación de los demás núcleos, NT167 y 2NT167, donde se observa que el núcleo 2NT167 se encuentra vertical que el núcleo NT167 determinando que una mayor concentración de ferrita puede ayudar a mejorar las propiedades magnéticas Figura 22, seguido a esto se realiza la comparación con un núcleo comercial para determinar qué tan alejados se encuentran los núcleos fabricados de uno comercial.

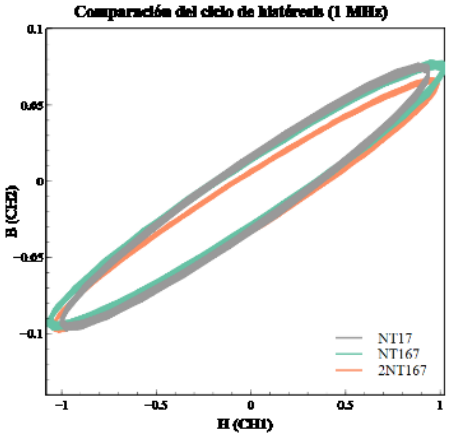


Figura 22. Ciclo de histéresis de la serie de núcleos NT.

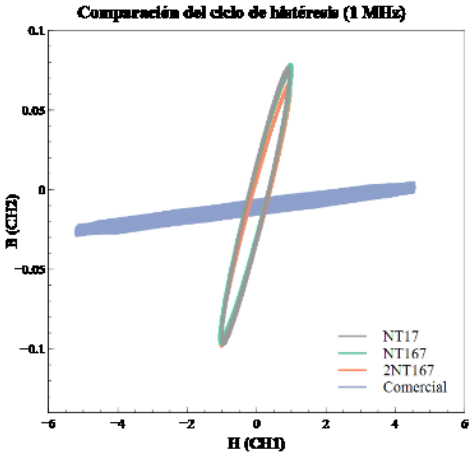


Figura 23. Comparación de ciclos de histéresis.

Figura 23 se observa que los núcleos fabricados cuentan con un ciclo de histéresis muy amplio en comparación con un núcleo comercial el cual muestra un ciclo de histéresis más estrecho, se determina que la comparación de los ciclos de histéresis de los núcleos de la serie NT comparados con un ciclo de un núcleo comercial, el cual muestra un ciclo de histéresis con un área baja en comparación a los núcleos previamente descritos, este también muestra que requiere de una densidad de flujo mínima en comparación de los demás núcleos pero requiriendo un mayor campo magnético aplicado para saturarlo, indicando que a altas frecuencias el núcleo comercial tiene muy pocas pérdidas.

Pérdidas por conmutación

Se obtuvieron midiendo el voltaje D-S del MOSFET y la corriente del inductor primario, estos se determinaron determinando el área que se encuentra en la multiplicación del voltaje por la corriente, esta obtención de datos fue realizada a un convertidor Flyback alimentado a 24 V, empleando una red snubber. La pérdida por conmutación del núcleo NT167 Figura 24 muestra que disipa una potencia pico de 273.38W, por un tiempo de $1.47\mu s$ y una frecuencia de 100kHz se obtiene una potencia resultante de 20W.

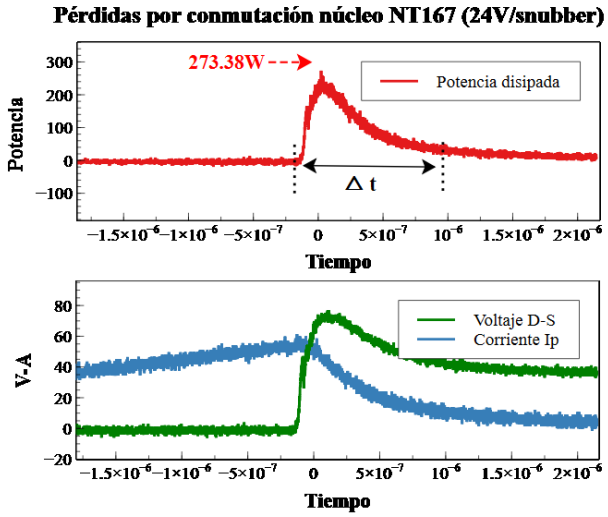


Figura 24. Pérdidas por conmutación empleando un transformador NT167.

Al analizar las pérdidas por conmutación del convertidor Flyback empleando un transformador con núcleo 2NT167 Figura 24 muestra un pico de potencia de 210.97W, este en un lapso de tiempo de $1.62\mu s$, seguido así de la medición de las pérdidas por conmutación empleando un transformador con un núcleo comercial bajo las mismas características. Se finaliza con las respectivas mediciones empleando un transformador a base de un núcleo comercial Figura 25 obteniendo como resultado un pico de potencia disipada de 210.97 W, en un lapso de tiempo de 238 nanosegundos obteniendo así una pérdida por conmutación de 9.32 W

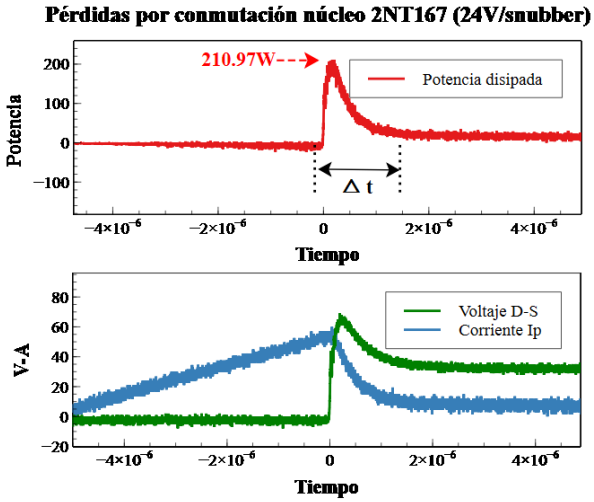


Figura 25. Pérdidas por conmutación empleando un núcleo 2NT167.

CONCLUSIONES

Los materiales magnéticos que más afectaron la inductancia fueron los materiales ferrosos y ferrimagneticos, en base a esto podemos determinar que para mejorar las propiedades magnéticas e incrementarla el valor de la inductancia se pueden implementar estos materiales. Se mostró que los núcleos fabricados cuentan con un ciclo de histéresis mucho mayor que el núcleo comercial, al obtener las pérdidas por conmutación se puede notar que los núcleos aún que son fabricados de manera artesanal son capaces de funcionar como un convertidor Flyback no muy eficiente, sin embargo podemos considerar que los núcleos NT y 2NT están funcionando de una manera correcta, los efectos negativos como ser más lentos en la descarga de la corriente se podría mejorar empleando una diferente concentración de materiales magnéticos y así lograr mitigar ese efecto.
Cómo trabajo futuro de este proyecto se proponen implementar materiales magnéticos a escala nano métrica e implementarla para la fabricación de núcleos magnéticos de alta frecuencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al tecnológico nacional de México por el apoyo al proyecto: "Mejora de la eficiencia en convertidores resonantes LLC basado en un enfoque del método del bobinado entrelazado y en nuevos materiales para la construcción y diseño de transformadores planos", con clave 20370.24-PD.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Álbares Nidia, "Dominios magnéticos y respuesta dinámica en aleaciones ferromagnéticas," 2016, Instituto Balseiro , Argentina.
[2] J. M. García-Martín, "Dominios magnéticos: conceptos básicos y técnicas de observación." [Online]. Available: http://www.imm.cnm.csic.es/magnetoplasmonics
[3] R. L. Boylestad, *Introducción al Análisis de Circuitos*, Décima Ed. México: PEARSON, 2004.
[4] W. T. Mclyman, *Transformer and Inductor Desing Handbook FOURTH EDITION*. 2011. [Online]. Available: http://www.copyright.com/
[5] S. M. Montemayor, "Materiales Magnéticos Puros, Compuestos e Híbridos," Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, 2006.
[6] Charles K. Alexander and Matthew N. O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos* , Quinta edición. México: Mc Graw Hill, 2016.
[7] J. M. L. Ronda, "Elementos magnéticos en alta frecuencia: estudio, modelado y criterios de diseño," UNIVERSIDAD DE OVIEDO, 1993.
[8] P. A. Janse Van Rensburg and H. C. Ferreira, "The Role of Magnetizing and Leakage Inductance in Transformer Coupling Circuitry," 2004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/261097425
[9] David Felipe Calvo Lozada, "TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA," Colombia, 2021.
[10] Maria R. Rogina, "Análisis de las pérdidas de conmutación en Mosfet de silicio de super unión con conmutación a tensión cero," *SAAEI* , 2019.
[11] Gallego Gómez juan D., "Deducción de pérdidas de potencia por conducción en inversores modulación senoidal de ancho de pulso, SPWM," *Información Tecnológica*, vol. 26, no. 3, pp. 111–122, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000300015.

OPTIMIZACIÓN DE MONTAJE DE ORDENADORES PARA ANÁLISIS NUMÉRICO

Erick Abraham Alvarez Gutierrez[1†], Felipe de Jesús Torres del Carmen[2], José Miguel García Guzmán[1], Higinio Juárez Rios[4], Miroslava Cano Lara[1*]

[1]TecNM, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. [2]UG, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. [3]Instituto Politécnico Nacional, UPIIG.

[†]ea.alvarezgutierrez@gmail.com *miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

En la ciencia de la computación y la tecnología de la información los ordenadores son el principal desafío desde elegir correctamente los componentes y optimizar sus características hasta generar un buen aprovechamiento según vaya a ser su uso. La importancia de una tarjeta gráfica (GPU) en conjunto con un procesador (CPU) para la aceleración gráfica y los cálculos en paralelo tienen una dependencia en las diferencias de rendimiento según el estado térmico del gabinete o torre donde se encuentre el ordenador. La optimización de una unidad de cómputo considera la selección de componentes, el montaje y la configuración del ordenador. El posicionamiento de los ventiladores y radiador, la presión del aire dentro del gabinete, el acomodo del cableado y las principales afectaciones son analizadas por método numérico. Se incluye un procesador AMD Ryzen 9 5900X, una tarjeta gráfica AMD Radeon RX 6700 XT sin limitar el poder computacional, se analizan las características térmicas como refrigeración por medio de líquido, pruebas de estrés al hardware con programas como Cinebench, FurMark, MATLAB, SolidWorks y videojuegos triple A con títulos como Resident Evil 4 Remake, Cyberpunk 2077, Doom Eternal, Gears 5, Shadow of the Tomb Raider, Far Cry 5, principalmente por las pruebas de rendimientos incluidas en la misma aplicación. Fue posible observar una mejora significativa en el rendimiento de hasta el 20% en algunas aplicaciones y en las temperaturas del ordenador.

INTRODUCCIÓN

La informática ha permeado casi todos los aspectos de la sociedad. Sin embargo, su influencia ha sido un proyecto colectivo que ha ido avanzando de manera exponencial. Desde la invención de la primera computadora hasta el auge de las inteligencias artificiales, el mundo atraviesa un crecimiento muy acelerado en el uso de la tecnología informática. Esta expansión ha traído consigo una preocupación cada vez mayor por la eficiencia energética a nivel mundial.

El consumo de energía de los ordenadores y centros de datos es una de las preocupaciones principales en el campo de la tecnología; el aumento constante en la demanda de capacidad informática ha llevado a un incremento en el uso de energía que ha generado una presión adicional sobre los recursos energéticos, la refrigeración de los sistemas informáticos representa el mayor desafío: a medida que los procesadores se vuelven más potentes y compactos, se genera una gran cantidad de calor. Si no se controla adecuadamente, este calor puede dañar los componentes internos y reducir la vida útil de los dispositivos. Además, el uso de sistemas de refrigeración ineficientes puede aumentar aún más el consumo de energía y contribuir a un mayor impacto ambiental.

En respuesta a estas preocupaciones, la industria de la tecnología está trabajando activamente en el desarrollo de soluciones para mejorar la eficiencia y la refrigeración de los ordenadores a fin de optimizarlos. La gestión térmica inteligente es el principio moderno para mantener las temperaturas bajo control de manera más eficiente.

Para trabajar con hardware existente, la optimización por software suele ser la única solución ya que, integrar sistemas avanzados de refrigeración y la gestión térmica inteligente no siempre trae beneficios directos y resulta muy costoso en la mayoría de los casos. Entonces, diferenciando entre los ordenadores que se construyen desde cero y los ya montados: la clave es la optimización sin importar el origen de estos sistemas.

TEORÍA

Todas las ramas de la ingeniería requieren emplear un ordenador y un paso aún más necesario es entender cómo están compuestas y como es que funcionan. El ordenador al que se le realizaron pruebas inicialmente fue montado como una herramienta de trabajo y posteriormente fue optimizado para analizar que tanto se puede obtener de cada uno de sus componentes.

Cinebench, una herramienta de evaluación de rendimiento desarrollada por Maxon, y permite medir el rendimiento del procesador mediante pruebas de renderizado de escenas 3D. Esta aplicación proporciona una evaluación comparativa estandarizada que permite cuantificar el rendimiento de la CPU en tareas intensivas de cálculo. Por otro lado, FurMark, una herramienta de prueba de estrés para tarjetas gráficas. Permite evaluar el rendimiento de la GPU bajo cargas de trabajo extremas. Utilizando algoritmos de renderizado altamente intensivos, FurMark genera cargas de trabajo gráficas intensas que ponen a prueba la capacidad de la tarjeta gráfica para renderizar escenas complejas en tiempo real.

Para evaluar el rendimiento en aplicaciones de análisis numérico, se emplea MATLAB, un entorno de computación técnica ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias. Se ejecutan algoritmos de procesamiento de datos comunes: cálculos como operaciones matriciales muy grandes, transformada rápida de Fourier, filtrado de imágenes, procesamiento de señales y simulaciones para evaluar la capacidad del sistema para manejar cargas de trabajo intensivas y procesamiento de datos a gran escala. Adicionalmente utilizando SolidWorks, un software de diseño asistido por ordenador (CAD) y análisis de elementos finitos (FEA) utilizado en ingeniería mecánica y diseño de productos. Utilizando modelos complejos y análisis estáticos, se evalúa la capacidad del sistema para manejar cargas de trabajo de diseño y simulación numérica en tiempo real.

El consumo energético de la computadora sin optimizaciones es de aproximadamente 145 W en reposo (sin realizar tareas, tener programas abiertos y únicamente estar en el escritorio de Windows 10). Existen configuraciones que reducen este consumo energético dentro de Windows, sin embargo, provocan fluctuaciones muy radicales desde los 65 W hasta los 120 W como para registrar datos. Bajo estrés máximo, el ordenador puede llegar a consumir hasta 760 W antes de la optimización. La estabilidad del sistema durante las pruebas de rendimiento podría afectar los resultados y comprometer los datos obtenidos.

En el proceso de optimización las técnicas para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema son el overclock y el undervolt. El overclock es una técnica que implica aumentar la velocidad de reloj de los componentes del ordenador, como el procesador o la tarjeta gráfica, más allá de las especificaciones de fábrica. Este aumento de la velocidad de reloj permite que los componentes ejecuten tareas más rápidamente, lo que puede resultar en un rendimiento general mejorado del sistema. Sin embargo, el overclock también puede generar un aumento en el consumo de energía y en la generación de calor, lo que requiere una refrigeración adecuada para evitar daños en los componentes [1]. Por otro lado, el undervolt es una técnica que implica reducir el voltaje suministrado a los componentes del ordenador y la generación de calor, manteniendo al mismo tiempo las frecuencias de reloj originales [2].

XMP (eXtreme Memory Profile) es una tecnología desarrollada por Intel que permite a los módulos de memoria RAM (Random Access Memory) funcionar a velocidades más altas que las especificadas por defecto. Los fabricantes de RAM suelen diseñar sus módulos para operar a velocidades estándar según las especificaciones de JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council), pero con XMP, pueden ofrecer perfiles de rendimiento más elevados para aquellos usuarios que desean aprovechar al máximo el potencial de su hardware. Cuando se activa un perfil XMP en la configuración de tu BIOS o UEFI, permite que la RAM opere a velocidades más altas, con latencias más bajas y voltajes ajustados [3].

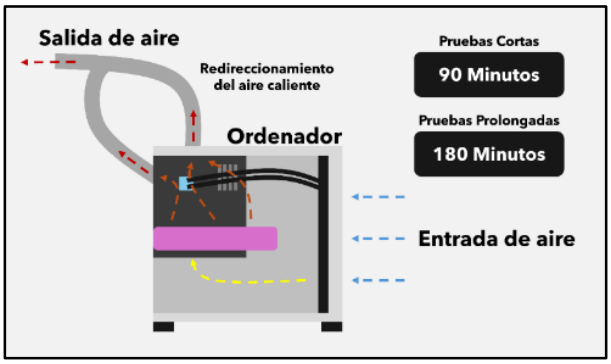


Fig. 1. Diagrama simplificado del flujo de aire en el ordenador.

METODOLOGÍA

Los componentes seleccionados para el estudio de optimización del ordenador son:

1. **Procesador (CPU)**: AMD Ryzen 9 5900X
2. **Tarjeta Gráfica (GPU)**: AMD Radeon RX 6700XT
3. **Tarjeta Madre**: Gigabyte b550m ds3h
4. **Memoria RAM**: DDR4 Kingston Fury 16 GB
5. **Fuente de Poder (PSU)**: XPG Core Reactor 850W
6. **Almacenamiento (SSD o HDD)**: Kingston NVME 1TB
7. **Radiador**: Corsair H150

El manejo de las temperaturas, las pruebas de estrés tienen el riesgo de dañar los componentes, sin embargo, en condiciones controladas es posible llevar al máximo el potencial tanto del procesador como de la tarjeta gráfica. De forma estándar, los programas de ingeniería como MATLAB o SolidWorks dependen mucho de la potencia del procesador, pero comúnmente solo aprovechan un núcleo o dos durante un uso normal, en el caso de SolidWorks, al realizar análisis estático es posible aprovechar los 12 núcleos de procesador sin embargo ambos programas pueden configurarse para utilizar la tarjeta gráfica en algunas tareas específicas como el renderizado de escenas y el procesamiento de mallas finas. Las aplicaciones gráficas más pesadas comúnmente son los videojuegos, ya que tienen una gran cantidad de texturas de alta calidad y modelos.

Se realizaron serie de pruebas exhaustivas utilizando una variedad de herramientas y aplicaciones especializadas. Entre ellas se incluyen:

1. Cinebench.
2. FurMark.
3. MATLAB.
4. SolidWorks.

Así como videojuegos de alta demanda gráfica, incluyendo títulos como:

1. Resident Evil 4 Remake.
2. Cyberpunk 2077.
3. Doom Eternal.
4. Gears 5.
5. Shadow of the Tomb Raider.
6. Far Cry 5.

Para las pruebas con videojuegos, se evaluaron en las resoluciones 1080p, 1440p y 2160p en su configuración gráfica máxima, esto con el fin de identificar el impacto que tiene el procesador con respecto a la tarjeta gráfica en diferentes resoluciones.

Seleccionando los métodos y pruebas de evaluación de rendimiento es posible definir el estándar de control para la temperatura y uso de energía del ordenador: para este caso específico, se utilizan 3 ventiladores en la parte frontal del ordenador y dos en la parte trasera generando presión positiva que evita la acumulación excesiva de polvo dentro del gabinete. La tarjeta gráfica circula el aire dentro del ordenador a través de sus propios ventiladores. El procesador se refrigera con un radiador de 360 mm, la masa térmica del radiador previene en el exceso de calor en pruebas cortas manteniendo temperaturas de entre 5° y 10° centígrados con respecto a la temperatura ambiente.

Todas las pruebas de estrés se deben llevar a cabo en equilibrio térmico entre el recinto interior del gabinete y la temperatura del entorno. Generalmente le toma al sistema aproximadamente 46 minutos regresar al equilibrio térmico. Para asegurar la consistencia de las pruebas, se dejó un espacio de 90 minutos entre pruebas cortas y 180 minutos para pruebas de estrés prologadas. Adicionalmente se controló la temperatura de la habitación a 26° centígrados. El calor producido por el ordenador se redirigió a otra habitación.

PARTE EXPERIMENTAL

Se definen tres entornos para la realización de pruebas: estrés al CPU, al GPU, al sistema completo ya que es importante separar las pruebas de estrés para tener referencia del rendimiento individual de los componentes.

Inicialmente las pruebas se realizaron con el sistema en su estado más básico, sin optimizar la configuración física de los componentes dentro del gabinete ni tampoco a nivel de software. Este escenario es bastante común. Posteriormente se actualiza la configuración de los ventiladores para generar la presión estática y el flujo de aire constante, se realiza un mejor cableado y acomodo de los tubos de la refrigeración liquida para evitar que se obstruya el flujo.

Se opera la fuente de poder en su configuración ECO y se colocan mejores filtros de aire que no necesitan un coeficiente de presión estática tan alto. A nivel de software se baja el voltaje del procesador a 1.185 V y se desactiva Precision Boost (una herramienta de AMD para el control de este voltaje). Se logra mantener la velocidad del reloj del procesador a más de 4.3 GHz con posibilidad de subir dependiendo de la tarea. Se activa el perfil más alto de XMP para la memoria RAM y finalmente se coloca en un perfil de ahorro de energía la tarjeta gráfica, sin embargo, se consigue subir su frecuencia un 5%.

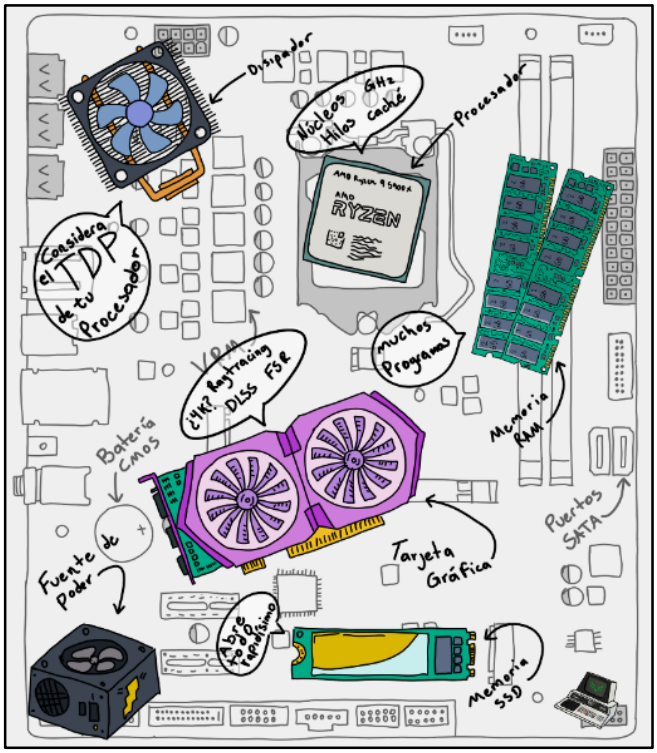


Fig. 2. Referencia animada de los componentes en la tarjeta madre.

Se realizan 25 pruebas por programa y aplicación para establecer una línea consistente de resultados donde se monitorea regularmente la temperatura desde el software como con una cámara térmica.

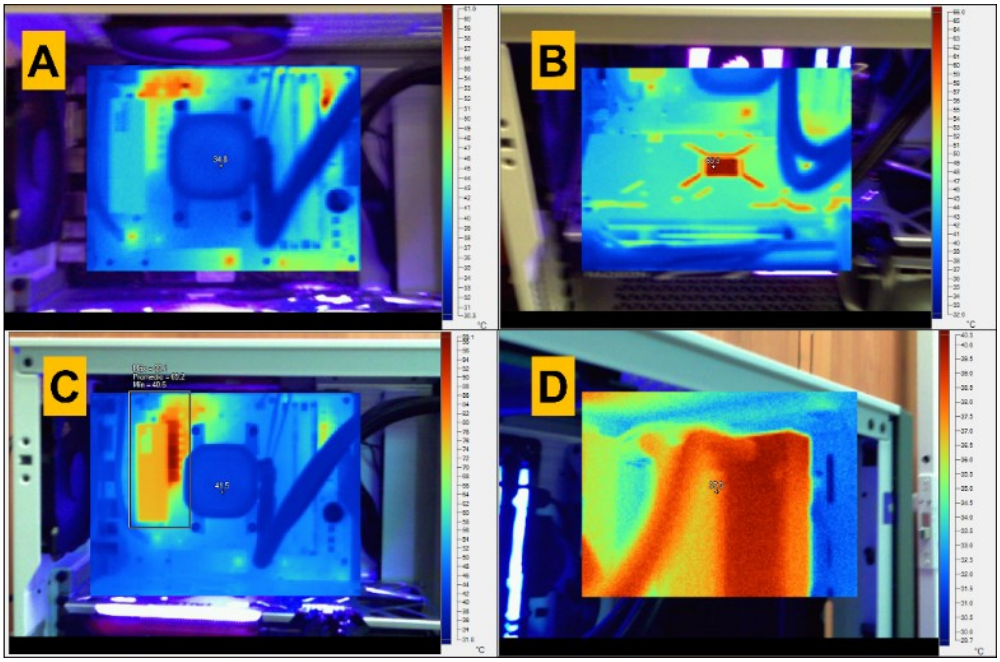


Fig. 3. Análisis de temperaturas en el ordenador durante las pruebas de estrés.

En la Fig. 3, en la sección A, se observa la temperatura común del ordenador sin realizar actividades y estando únicamente en el escritorio, en la sección B se hace énfasis en el punto externo más caliente de la tarjeta gráfica. En la C se observa calentamiento de los chips responsables de la distribución de voltajes en la placa. En la D se muestra la saturación de la masa térmica del radiador.

RESULTADOS

Las pruebas de rendimiento, temperatura y eficiencia resultan en una mejora aproximadamente de 20% con respecto al ordenador sin optimizar.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las pruebas:

CINEBENCH R23 – ORDENADOR SIN OPTIMIZAR					
#	Puntaje (Multi-Núcleo)	Puntaje (Single-Core)	Temperatura (°C)	Frecuencia del Procesador (Multi-Core) (Promedio) GHz	Frecuencia del Procesador (Single-Core) (Promedio) GHz
1	21917	1613	60	4.2	4.7
2	21833	1653	64	4.3	4.4
3	21959	1696	60	4.0	4.6
4	22242	1652	62	4.4	4.8
5	22280	1629	60	3.9	4.5
6	22250	1697	60	4.1	4.9
7	21935	1656	62	4.5	4.4
8	22286	1644	64	4.2	4.7
9	21659	1614	61	4.3	4.3
10	21964	1697	64	4.1	4.6
11	22164	1602	62	4.4	4.8
12	21947	1614	65	4.0	4.5
13	22225	1653	60	3.9	4.9
14	21923	1673	60	4.3	4.3
15	22273	1657	63	4.5	4.8
16	22201	1684	62	4.2	4.4
17	22061	1605	65	4.1	4.7
18	22228	1611	65	4.4	4.5
19	21894	1626	62	3.9	4.3
20	22131	1610	64	4.0	4.9
21	22330	1595	63	4.5	4.6
22	21755	1659	61	4.3	4.8
23	22022	1613	62	4.2	4.7
24	22090	1661	63	4.1	4.5
25	22031	1672	62	4.4	4.4
Promedio	22059	1650	62	4.2	4.6

CINEBENCH R23 – ORDENADOR OPTIMIZADO					
#	Puntaje (Multi-Núcleo)	Puntaje (Single-Core)	Temperatura (°C)	Frecuencia del Procesador (Multi-Core) (Promedio) GHz	Frecuencia del Procesador (Single-Core) (Promedio) GHz
1	23294	1726	54	4.4	4.6
2	23218	1748	61	4.5	4.8
3	23245	1763	58	4.2	4.7
4	22844	1776	56	4.3	4.6
5	23252	1684	60	4.1	4.6
6	23191	1696	55	4.5	4.7
7	23215	1726	53	4.5	4.8
8	23428	1687	60	4.2	4.9
9	23509	1770	55	4.4	4.5
10	23288	1752	55	4.3	4.8
11	23015	1691	57	4.8	4.8
12	23151	1724	59	4.1	4.9
13	23377	1744	60	4.5	4.7
14	23233	1723	61	4.2	4.8
15	22792	1709	57	4.4	4.8
16	23210	1737	54	4.3	4.6
17	23557	1715	59	4.1	4.7
18	23390	1716	54	4.5	4.6
19	23129	1734	53	4.2	4.8
20	23120	1724	59	4.5	4.9
21	23125	1683	52	4.4	4.7
22	23089	1721	54	4.3	4.8
23	23828	1766	58	4.1	4.6
24	23087	1712	60	4.6	4.9
25	23356	1695	57	4.5	4.7
Promedio	23126	1724	57	4.4	4.7

Tabla 1. Resultados del ordenador sin optimizar y optimizado para Cinebench R23.

COMPARACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DEL ORDENADOR CINEBENCH R23

Tabla 2. Resultados comparativos entre los estados del ordenador para Cinebench R23

Para el software Cinebench R23 se obtuvo una mejora del 5% en ambas pruebas de un solo núcleo y multinúcleo, un 8% de reducción en temperatura. El tiempo de pruebas fue el mismo.

Furmark – ORDENADOR SIN OPTIMIZAR				
#	Puntaje	Temperatura (°C)	Frecuencia de la gráfica	Energía Usada (W)
1	7522	76	2424	232
2	7553	74	2425	228
3	7498	73	2424	232
4	7551	72	2427	230
5	7513	74	2426	227
6	7505	70	2428	229
7	7549	71	2426	227
8	7488	75	2427	230
9	7504	75	2427	228
10	7481	71	2426	228
11	7540	74	2424	232
12	7513	71	2427	231
13	7515	70	2427	230
14	7490	74	2427	232
15	7548	74	2428	232
16	7482	72	2425	230
17	7530	72	2427	231
18	7501	70	2424	232
19	7512	71	2427	227
20	7548	73	2427	230
21	7552	73	2425	228
22	7513	70	2426	232
23	7525	71	2424	228
24	7523	72	2427	229
25	7544	76	2425	229
Promedio	7519	72	2426	230

Furmark – ORDENADOR OPTIMIZADO				
#	Puntaje	Temperatura (°C)	Frecuencia de la gráfica	Energía Usada (W)
1	7894	70	2611	201
2	7937	65	2609	203
3	7861	68	2619	211
4	7871	65	2614	201
5	7924	70	2599	203
6	7858	67	2615	202
7	7908	67	2615	202
8	7897	65	2614	202
9	7934	67	2618	206
10	7934	68	2625	209
11	7908	69	2606	205
12	7919	71	2614	210
13	7885	67	2599	201
14	7880	65	2615	203
15	7927	68	2620	206
16	7867	68	2620	205
17	7861	69	2629	210
18	7927	71	2624	207
19	7881	68	2620	201
20	7871	65	2625	205
21	7904	67	2602	203
22	7876	68	2613	206
23	7886	65	2600	211
24	7903	68	2618	202
25	7863	68	2602	209
Promedio	7895	67	2614	205

Tabla 3. Resultados del ordenador sin optimizar y optimizado para software Furmark.

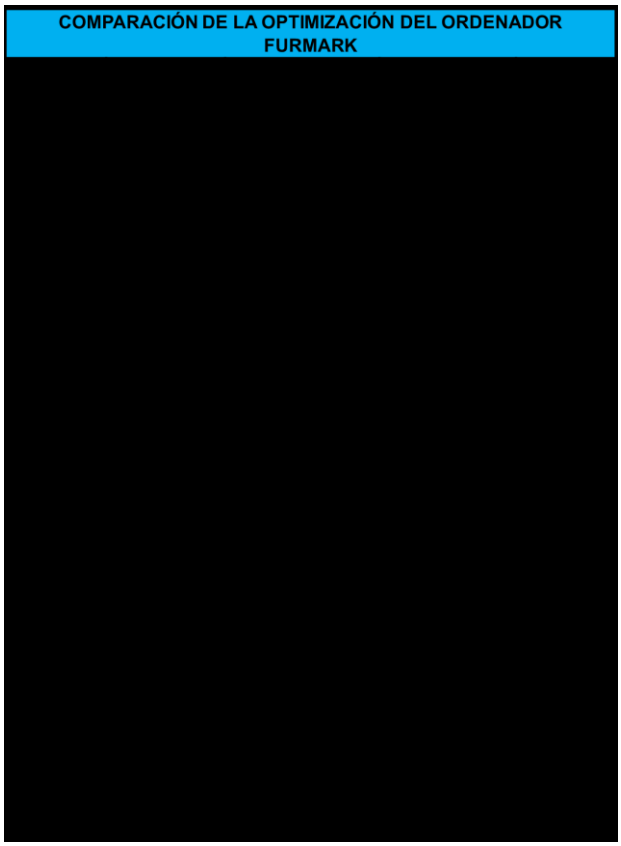


Tabla 4. Resultados comparativos entre los estados del ordenador para Furmark.

En el caso de Furmark, los resultados fueron mayores, enfocándonos en la reducción de uso de energía que se consiguió casi un 11% y un 7% de reducción de temperatura, esto resultó también en una menor cantidad de ruido, esto mejorando la salud de los ventiladores y de los componentes de la grafica en general.

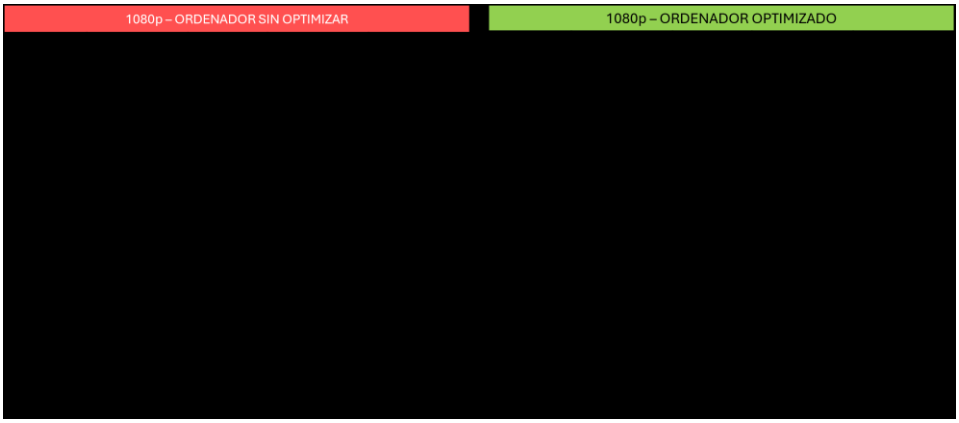


Tabla 5. Resultados del ordenador sin optimizar y optimizado para varios videojuegos gráficamente intensos.

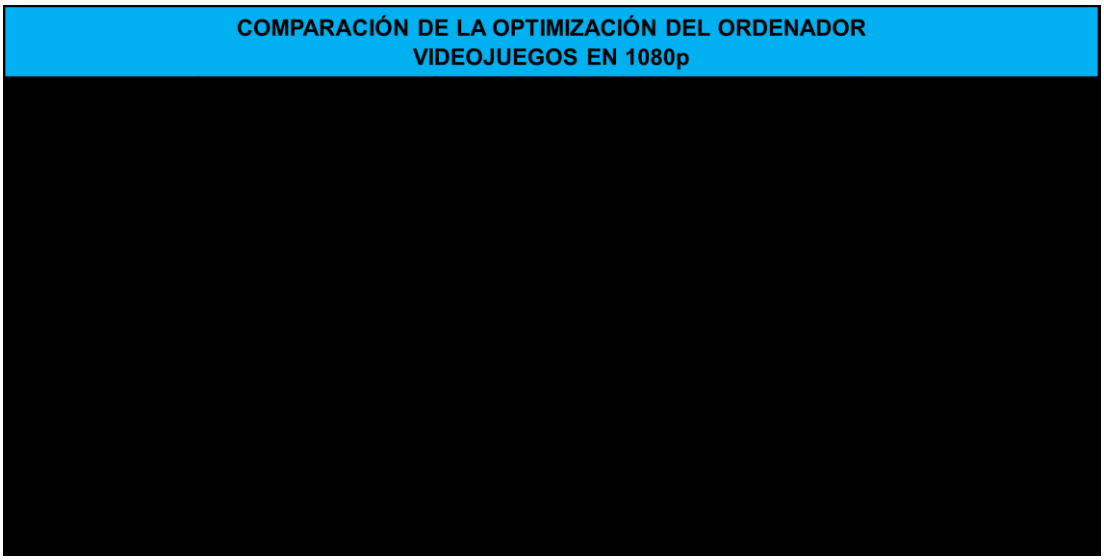


Tabla 6. Resultados comparativos en resolución 1080p del ordenador.

Las aplicaciones gráficamente intensas como los videojuegos se ven especialmente beneficiadas de las optimizaciones al ordenador. Muchos de los títulos con los que se hicieron pruebas utilizan de manera fundamental técnicas de análisis numéricos para calcular trayectorias, comportamientos, iluminación y otros aspectos, siendo una buena métrica para observar el rendimiento del ordenador. Los títulos aumentaron casi en un 20% su rendimiento y bajaron casi a un tercio su uso de energía, mejorando la estabilidad. Los resultados a diferentes resoluciones escalan de manera lineal en un 5 y 10% para 1440p y 2160p respectivamente a excepción del uso de energía que varía dependiendo de la escena dentro de estas aplicaciones, especialmente en 2160p.

CONCLUSIONES

Una configuración especializada para los componentes de un ordenador hace posible sacarles mayor provecho, aumentar su vida útil y disminuir su consumo de energía, siendo posible incluso equilibrar estos tres factores para optimizar al máximo un ordenador. La selección de componentes al montarlo contribuye a tener un balance adecuado y que el desempeño sea el mejor posible. Los cálculos realizados en el análisis numérico pueden ser optimizados por medio del paralelismo producto de las tarjetas gráficas siendo componentes fundamentales no exclusivamente para procesamiento de imágenes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Overclocking guide for Aorus. (2020). En www.gigabyte.com. Recuperado 15 de mayo de 2024, de https://www.gigabyte.com/FileUpload/Global/KeyFeature/1976/innergigabyteimages/Z690-OC-GUIDE.pdf

[2] Murdock, K. (2020). Plundervolt: How a little bit of undervolting can create a lot of trouble. En University Of Birmingham. Recuperado 15 de mayo de 2024, de https://jovanbulck.github.io/files/sp20-plundervoltmagazine.pdf

[3] Quick guide for XMP from ADATA. (2022). En www.adata.com. Recuperado 15 de mayo, de https://www.adata.com/upload/faq/ES-XMP.pdf

CARACTERIZACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO CON FIBRAS DE CIGARRO MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Itzel Luviano Soto[1], Yajaira Concha Sánchez[2], Gabriel Arroyo Correa[3], José Vega Cabrera[4]

[1,2]Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. [3,4]Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UMSNH
Itzel.luviano@umich.mx

RESUMEN

Actualmente uno de los residuos sólidos más comunes en el mundo son las colillas de cigarro, este material contiene varias sustancias químicas tóxicas que contaminan al ambiente de diferente manera, por lo que la eliminación de este residuo se ha convertido en un gran problema, por lo anterior, en este trabajo se hace uso de fibras de colillas de cigarro como agregado en mezclas bituminosas para la generación de asfaltos modificados con el objetivo de implementar el uso de materiales reciclables en la construcción de superficies de rodamiento. Sin embargo, la evaluación de los concretos asfalticos requiere el uso de pruebas destructivas como las pruebas Marshall; no obstante, el uso de estas pruebas genera que el material quede inutilizable, siendo esta una gran desventaja, por ello, se propone el uso de métodos no destructivos para la caracterización de este material, basado en los cálculos de la entropía de imagen y de la técnica de impacto acústico, donde la entropía de imagen se obtiene a partir de las imágenes registradas de los patrones de luz dispersada, obtenidos al irradiar una pastilla asfáltica seccionada con un láser de He-Ne infrarrojo y la caracterización acústica mediante el espectro de Fourier y con ésta obtener el índice de firmeza[4] del material a partir de la frecuencia dominante del material y su densidad. Dentro de los resultados obtenidos se observa una variación entrópica entre las piezas del asfalto analizadas, respecto a muestras de asfalto con diferentes grados de cal utilizada en la encapsulación de las fibras de cigarro, en la cual, la tendencia de la deformación de las pastillas coincide con la entropía de imagen ya que la deformación disminuye en los especímenes con mayor contenido de cal hidratada; respecto a las pruebas acústicas se observa un corrimiento en la frecuencia dominante en cada uno de los especímenes analizados y por ende un diferente índice de firmeza que, al igual que la entropía se puede asociar al grado de resistencia mecánica del material producto del uso de cal en la encapsulación de fibras de cigarro. Los resultados llevan a concluir que la entropía puede instrumentarse como una técnica comparativa para predecir el comportamiento de la resistencia mecánica del asfalto, mientras que las pruebas acústicas permiten obtener el índice de firmeza que está directamente relacionado con el módulo de elasticidad del material a partir de su frecuencia dominante y densidad, por lo que es posible el uso de esta técnica como técnica alterna para analizar estructuras asfálticas en la ingeniería.

INTRODUCCIÓN

Las colillas de cigarro, uno de los residuos mas abundantes en el mundo [1], contienen más de 4,000 sustancias químicas tóxicas y generan graves riesgos para la salud de la vida silvestre, los seres humanos y los organismos acuáticos y aunque tienen un tamaño considerablemente pequeño, cada año se producen billones de cigarros en todo el mundo, lo que da lugar a la acumulación de desechos tóxicos. En 2016 se produjo una producción mundial de más de 5.7 billones de cigarros y la mayoría incluía filtros de acetato de celulosa, un polímero con escasa biodegradabilidad y dependiendo de las condiciones ambientales estos pueden tardar más de 10 años en lograr descomponerse, tiempo durante el cual liberan metales pesados y productos químicos tóxicos al medio ambiente [2]. A pesar de los posibles métodos de eliminación de los residuos de colillas de cigarros, como incineración y vertido en vertederos, pueden provocar liberación de humos peligrosos y pueden resultar costosas, sin embargo, reciclar Colillas de Cigarro, CB por sus siglas en inglés, podría ser una posible solución para la contaminación ambiental que estos residuos generan. En este trabajo se realizó un diseño de mezcla asfáltica densa en caliente con adición de CBs para poder darle a este elemento no reutilizable y contaminante una nueva utilización en el campo ingenieril y para poder evaluar el comportamiento del asfalto adicionado con CBs se utilizaron la Pruebas No Destructivas (NDT) las cuales incluyen el cálculo de la entropía de imagen, determinada a partir del procesamiento digital

de imágenes y técnicas de impacto acústico basado en la determinación de las frecuencias dominantes de los bloques de asfalto a partir del espectro de Fourier obtenido a partir del impacto acústico [3].

TEORÍA

En el 2023, Yunfei Guo, Piergiorgio Tataranni, Giulia Tarsi y Cesare Sangiorgi realizaron un estudio para el reciclaje de colillas de cigarrillos de desecho triturados como fibras estabilizadoras en hormigones asfálticos de masilla de piedra y de acuerdo a su estudio el uso de CB de desecho puede considerarse una alternativa prometedora para reemplazar las fibras de celulosa y evitando el desecho de colillas de cigarrillos [4]. Ya que el 0,4 % de CB triturados mostró una absorción adecuada del betún. Con base en los resultados de penetración y punto de reblandecimiento, la masilla con relleno de piedra caliza era más rígida que la masilla que contenía relleno y polvo residual.

El artículo “Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt” realiza una amplia investigación sobre el reciclaje de colillas de cigarrillos en asfalto. Mohajerani y otros en el 2017 desarrollaron el método de encapsulación de colillas e investigaron la incorporación de colillas encapsuladas con betún y cera en hormigón asfáltico denso. Los resultados de la prueba del punto de reblandecimiento mostraron una reducción marginal en los resultados para el betún modificado con fibra CB. Sin embargo, la reducción es insignificante para las muestras modificadas con 0,2% y 0,3% de fibra CB [5].

En la tesis denominada “Evaluación de la viabilidad técnica de la incorporación colillas de cigarrillos como agregado en la producción de asfalto en caliente” se incorporan también colillas de cigarro a dos muestras de asfalto y los resultados fueron positivos aunque con condiciones particulares para cada una de ellas; en la mezcla asfáltica que incluyó una equivalencia de 1554 colillas de cigarros por metro cuadrado, considerando un grosor de 5 cm, los resultados fueron comparables a los de una mezcla asfáltica convencional tanto en términos de fabricación como de resistencia. Por otro lado, la mezcla asfáltica que incorporó el equivalente a 3108 colillas de cigarros por metro cuadrado, con el mismo grosor de 5 cm, también arrojó resultados positivos, sin embargo, se observó que para su preparación se requiere una mayor cantidad de betún, lo que eleva el costo económico del asfalto [6].

PARTE EXPERIMENTAL

Para la generación de las muestras asfálticas, fue necesario obtener las CBs, para ello se colocaron sitios de disposición especial en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en la ciudad de Morelia, Michoacaán, en distintos puntos del campus (Fig. 1).

Figura 1. Recolección de recolección de CB.

Posteriormente las CB se limpiaron manualmente removiendo los saborizantes, el papel envolvente y las partes carbonizadas de las colillas, posteriormente se deshidrataron y se desfibraron procurando que las fibras tuvieran un tamaño de entre 1 y 2 cm de largo como máximo, para la elaboración de las pastillas de asfalto se utilizó cal hidratada como recubrimiento en diferentes proporciones y se adicionó 25% de grava, 30% de gravilla, 45% de arena y material bituminoso (Fig. 2), de acuerdo con las normativas estipuladas en el protocolo AMAAC (propuesto por la Asociación Mexicana de Asfalto).

Figura 2. Elaboración de muestras asfálticas con CB como agregado.

La muestra elaborada se sometió a técnicas de procesamiento de imagen y técnicas de impacto acústico, para lo cual la pastilla de asfalto se segmentó en 5 piezas (P1, P2, P3, P4, P5) con un espesor de 5 cm para evaluar el comportamiento interno de cada una de las piezas que constituyen la pastilla asfáltica.
Para el procesamiento de imágenes se tomaron registros fotográficos de las piezas de asfalto al irradiar la pieza analizada con un láser infrarrojo He-Ne tomando dos registros por cada espécimen. Las imágenes se procesaron con Matlab 2019 convirtiendo a escala de grises las imágenes que representan matrices con valores de [0, 255] y mediante la Ec. (1) se determinó la entropía de imagen de cada uno de los segmentos

$$E_s = -\sum_{i=1}^{N} p_i Ln(p_i) \quad (2)$$

donde p_i es la probabilidad asociada al valor del tono de gris del i-ésimo pixel y N es el total de pixeles de la imagen analizada. La entropía de imagen se ha utilizado con anterioridad en la caracterización de la rigidez de bloques de concreto y pavimentos.

Otra de las pruebas aplicadas fue la técnica de impacto acústico que consiste en el impacto de los especímenes por medio de un balín de polipropileno, mientras que la respuesta sonora se captó por dos sensores acústicos, el Sensor 1 (S1) colocado en dirección del impacto y el Sensor 2 (S2) colocado de forma perpendicular al impacto del balín. Los sensores S1 y S2 se conectan a la interfaz SciencieWorkShop750 y esta a su vez al software DataStudio donde los registros se tomaron en volts. Las pruebas se realizaron en cuatro sesiones donde se promedió la información obtenida, posteriormente se procesó esta información en Matlab para obtener la Trasformade Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) definida por:

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-ik\omega n} \quad (2)$$

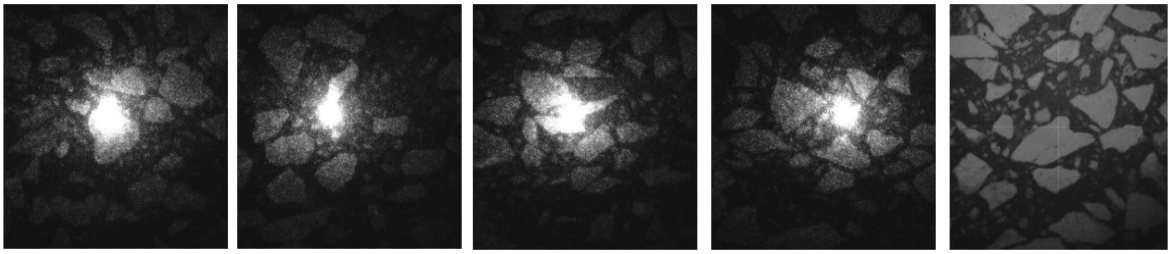
donde $k = 2\pi/N$. Con la frecuencia dominante se determinó el índice de firmeza a partir de la masa y la densidad de la muestra, dada por la siguiente ecuación

$$S_c = f^2 m^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

donde S_c representa el índice de firmeza, f la frecuencia dominante obtenida a partir de los espectros de Fourier medida en Hertz, y m es la masa del espécimen en kilogramos.

RESULTADOS

En la Figuras 3 se muestran los registros fotográficos obtenidos de las piezas de asfalto P1, P2, P3, P4 y P5 al ser iluminadas con luz láser y transformadas a escala de grises, a estas se les determinó la entropía de Shannon por medio de la Ec. (1) y la intensidad de imagen, que es un promedio del valor de la matriz que conforma la imagen. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 4, en donde se observa que las piezas de asfalto que tienen la mayor intensidad y entropía de imagen se presentan en las piezas P1 y P5, piezas que pertenecen a los extremos del espécimen analizado, mientras que para la pieza P2 los valores de la intensidad de imagen y la entropía de imagen presentan la misma tendencia en comportamiento en la caracterización de la pieza analizada.



a) P1 b) P2 c) P3 d) P4 e) P5

Figura 3. Registros fotográficos en escala de grises.

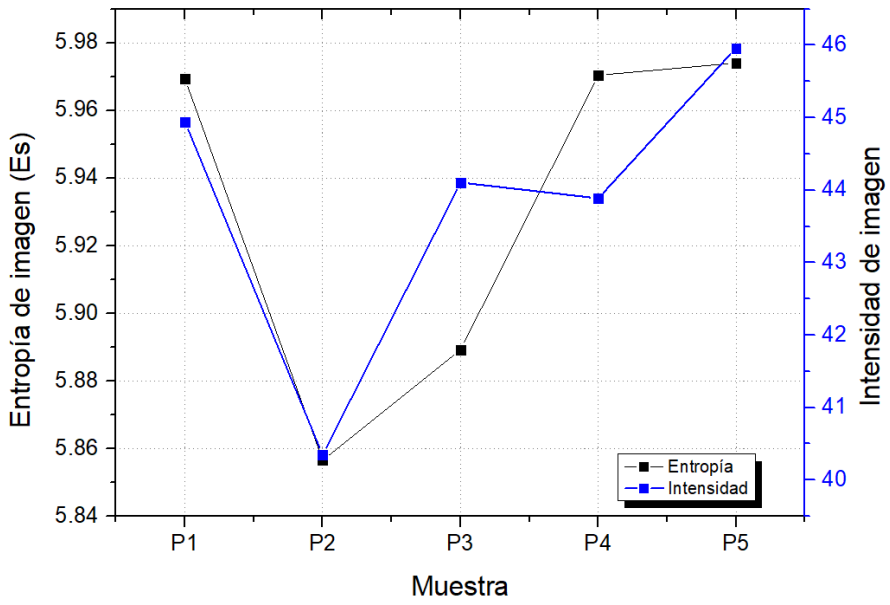


Figura 4. Entropía e intensidad de imagen de las muestras de asfalto.

Respecto a las técnicas de impacto acústico, los registros obtenidos por las cuatro sesiones se promediaron para cada una de las piezas analizadas y el registro de la información obtenida en volts se procesó con la Ec. (2) para obtener los espectros de Fourier, mismos que se pueden apreciar en la Figura 5, donde se puede apreciar que la frecuencia dominante es determinada a partir de la máxima amplitud presentada en el impacto.

En la Tabla 1 se presentan las frecuencias dominantes de cada una de las piezas de asfalto analizadas, así como las masas de cada elemento y los índices de firmeza obtenidos a partir de éstos datos, en la tabla se observa que la masa de las piezas P2, P3 y P4 es prácticamente el doble que las piezas P1 y P2, que son las piezas en donde se presentan las frecuencias dominantes más altas, con valores de 2148.76 Hz y 1487.6 Hz, mismas piezas que presentan el mayor índice de firmeza y por lo tanto es deducible que éstas piezas presentan la mayor rigidez. En la Figura 6 se puede apreciar de manera gráfica los resultados del impacto acústico.

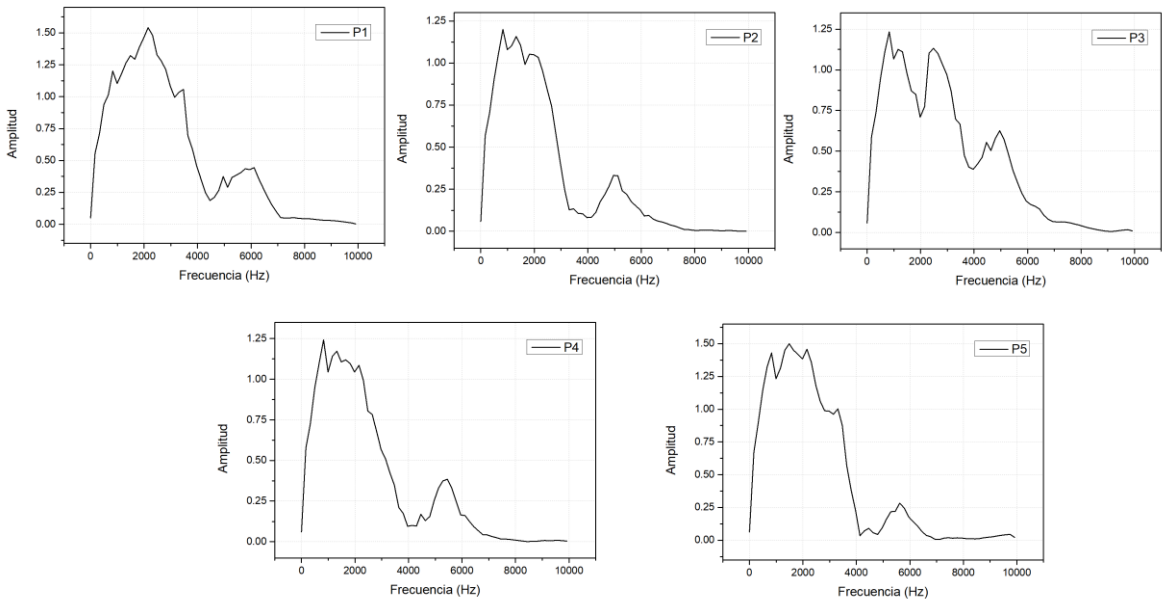


Figura 5. Espectros de Fourier.

Tabla 1. Índice de firmeza y frecuencia dominante de las muestras analizadas.

Muestra	Frecuencia (Hz)	Masa (gr)	Índice de firmeza ($Hz.Kg^{2/3}$)
P1	2148.76	362.60	2347800.31
P2	826.45	685.40	530956.15
P3	826.45	619.00	496085.30
P4	826.45	671.00	523493.07
P5	1487.60	387.10	1175410.92

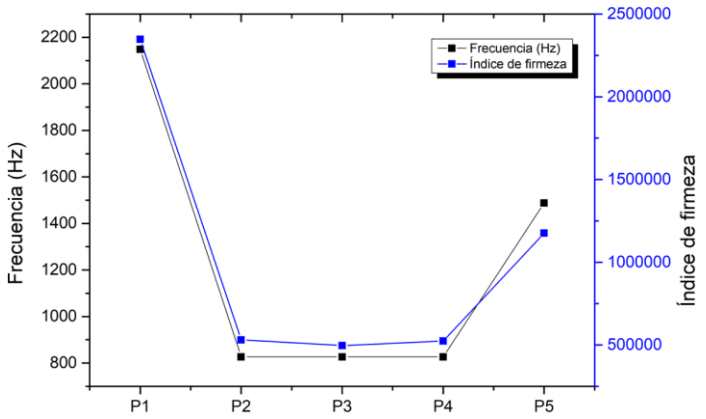


Figura 6. Índices de firmeza obtenidos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis experimental del comportamiento entrópico, de intensidad de imagen y de impacto acústico a una muestra de asfalto modificado con CB, misma que fue ranurada en 5 piezas para un análisis individual. Con los resultados presentados en la sección anterior, se

puede deducir que las piezas P1 y P5, que son las piezas de los extremos de la pastilla de asfalto modificado con colillas de cigarro son las piezas que presentan mayor rigidez, esto basado en el índice de firmeza obtenido por las pruebas NDT obtenidas por impacto acústico, mientas que las piezas intermedias P2, P3 y P4 presentan valores de menor rigidez pero similares entre ellas, este comportamiento es corroborado con los resultados obtenidos en el procesamiento de imagen tanto de entropía como de intensidad de imagen, por lo que es posible intuir que la muestra analizada es una mezcla no homogénea, particularmente en las orillas de la misma.

Cabe mencionar que para mayor confiabilidad en la aplicación de estas técnicas es necesario someter a esfuerzos axiales y transversales las muestras para poder corroborar los datos obtenidos de manera experimental.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jin, J., Wu, Z., Song, J., & Liu, X., (2019). Research on the road performance of cigarette butts modified asphalt mixture. J. Phys.: Conf. Ser. 1168, pp. 022053 1-7.
2. Kurmus, H., & Mohajerani, A. (2020). The toxicity and valorization options of cigarette butts. *Waste Management*, *104*, 104-118.
3. Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D., & Studman, C. J. (1997). The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of agricultural engineering research*, *66*(4), 251-259.
4. Pacheco, K. S. H., Matus, R. A., & Tizapa, S. S. (2022). Concreto adicionado con colillas de cigarrillo como propuesta para la minimización de estos residuos en el medio ambiente. *Espacio I+ D, Innovación más desarrollo*, *11*(30).
5. Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, *263*, 120134.
6. Durán, H. J. H. Evaluación de la viabilidad técnica de la incorporación colillas de cigarrillos como agregado en la producción de asfalto en caliente.

ESTADO ESTRUCTURAL ACTUAL DE LAS CASAS ABANDONADAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN

Andrea Guadalupe Yepiz Yepez[1], Bertha Alejandra Olmos Navarrete[2], Guillermo Martínez Ruiz[2]

[1] Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [2] Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
1902972e@umich.mx, bertha.olmos@umich.mx, guillermo.martinez@umich.mx

RESUMEN

El presente artículo presenta la problemática actual de más de 150 inmuebles habitacionales construidos entre el siglos XVIII y XIX en el centro histórico de la ciudad de Morelia, Michoacán, básicamente de propiedad privada, los cuales, debido al nulo mantenimiento producto del abandono por parte de los propietarios, representan un riesgo para la integridad física de los vecinos y transeúntes que diariamente pasan por fuera de los mismos. El trabajo se centra en las patologías existentes y en la evaluación de la seguridad estructural empleando metodologías simplificadas basadas en elementos rígidos, a partir de las cuales es posible estimar mecanismos de estabilidad basados en desplazamientos máximos. Se obtuvieron resultados para fachadas típicas en sentido longitudinal y transversal empleando elementos rígidos considerando su peso propio y acción sísmica horizontal, utilizando para ésta última registros acelerométricos obtenidos en estaciones sísmicas del Estado de Puebla durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017, sin escalamiento y con escalamiento para periodos de recurrencia de 475 y 975 años, evidenciándose daños por tensión en el plano alrededor de puertas y ventanas, así como inestabilidad al vuelco de los muros de fachada, motivada por la inexistencia de entrepisos que soporten su extremo superior, condición agravada por una gran cantidad de casos donde los muros se encuentran con desplazamientos fuera del plano provocados por el colapso de las cubiertas originarias, generado por la falta de mantenimiento tanto de los propietarios actuales como de sus sucesiones, ya que en muchos de los casos los propietarios ya han fallecido. Se presenta entonces una evaluación simplificada del nivel de seguridad esperado para fachadas típicas de esta tipología estructural, tanto en el plano de los muros como fuera del mismo. Como conclusiones resulta evidente el alto riesgo que representa la estabilidad fuera del plano de tales muros, la cual, se ve incrementada notablemente ante la acción de los sismos máximos esperados en la zona, obtenidos a partir de estudios de peligro sísmico en suelo firme que es el que mayormente se encuentra en el sitio de dichos inmuebles. Se hace énfasis en los modos de falla visibles producidos por colapso de los sistemas de entrepiso conformados por vigas de madera, tapas de ladrillo y terrado, que han producido en varios casos el empuje de los muros de fachada, generando desplomos que incrementan el riesgo para las personas que transitan por el lugar. Finalmente se proponen algunas alternativas técnicas de solución al problema, las cuales, pueden orientar acciones provisionales para que sean implementadas por las autoridades encargadas de la gestión del riesgo a nivel municipal, estatal y federal.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Morelia, Michoacán, desde el año de 1991 ha sido incluida por la UNESCO en la Lista del Patrimonio Mundial, contando en su haber con más de 1,113 edificaciones en su mayoría de tipo civil o habitacional y en menor número de tipo religioso. De todo éste gran conjunto, la vivienda de tipo privado en años recientes ha sufrido un gran deterioro, motivado en gran parte por la falta de políticas públicas que incentiven su uso, así como por las limitaciones que la ley impone al patrimonio edificado de propiedad privada. La pérdida en el valor de apropiación, definido como el vínculo entre la edificación y los actores involucrados en su desarrollo cotidiano, principalmente los usuarios (García, 2014), la falta de visión de los propietarios en cuanto a los beneficios económicos que pueden percibir de la venta o renta de un inmueble en buen estado, ubicado dentro de un centro histórico con declaratoria patrimonial, así como los conflictos inherentes a la materia de sucesiones, han llevado a una rápida degradación de los sistemas estructurales que dan apoyo a estas casas y casonas, situación que ya ha llamado la atención del gobierno municipal el cual, sin embargo, no ha llevado a cabo acciones efectivas para mitigar la pérdida de éstos inmuebles, la cual, adicionalmente

representa un riesgo latente para la integridad física de las edificaciones vecinas, así como de las personas que desarrollan sus actividades cotidianas en sus alrededores, sin dejar de lado a los turistas que visitan la zona durante todo el año. Resulta entonces urgente proponer alternativas multidisciplinarias que permitan la recuperación de éste patrimonio arquitectónico en riesgo de pérdida, por lo que el presente artículo trata sobre las patologías existentes así como de la evaluación del nivel de seguridad de fachadas tipo, con la finalidad de tener una primera idea cuantitativa del nivel de riesgo asociado a este complejo problema que aqueja a esta bella ciudad patrimonio mexicana.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El domingo 21 de julio de 2019 una antigua casona ubicada en la esquina que forman las calles Dr. Miguel Silva y Plan de Ayala, colapsó hacia la banqueta debido a una fuerte lluvia sin víctimas que lamentar afortunadamente, esto detonó el inicio mediático de un problema que llevaba décadas gestándose. Posteriormente a este derrumbe el alcalde de la ciudad declaró ante los medios de comunicación que buscaría a los propietarios y, en caso de no encontrarlos, actuaría jurídicamente para expropiar las edificaciones que representaran riesgo de colapso. Prácticamente dos años después de esta declaración pública la Coordinación del Centro Histórico del gobierno municipal anunció el levantamiento de un censo y el inicio de la búsqueda intencionada de los propietarios de por lo menos 190 viviendas situadas dentro y en el perímetro del centro histórico de la ciudad. El último dato oficial proporcionado por esa dependencia fue que, de un censo de 169 casas abandonadas el 30 por ciento habían sido rehabilitadas, sin especificar qué tipo de intervenciones se habían llevado a cabo, y que el resto se mantenían en riesgo de sucumbir (Castro, 2021).

Por otro lado, las 219 manzanas que forman parte del nombramiento hecho por UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad, rigurosamente hablando están bajo el resguardo de la Secretaría de Cultura Federal, que a través del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), organismo con personalidad jurídica propia, tiene de acuerdo al Artículo 2o. de su Ley Orgánica entre sus múltiples objetivos la protección, conservación, restauración y recuperación del patrimonio cultural arqueológico e histórico, y que en apego al Artículo 3o. de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicos, Artísticos e Históricos, se encuentra en funciones de aplicar las leyes, reglamentos, decretos y acuerdos en las materias de su competencia. Es importante hacer notar que en el mismo Artículo 2o. de la Ley Orgánica del Instituto Nacional de Antropología e Historia en sus fracciones II, IV y V, se establecen como otras de sus funciones que en los términos del artículo 7o. de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicos, Artísticos e Históricos, el otorgar los permisos y dirigir las labores de restauración y conservación de los monumentos arqueológicos e históricos que efectúen las autoridades de los estados y municipios; el proponer a la autoridad competente, la expedición de reglamentos que contengan normas generales y técnicas para la conservación y restauración de zonas y monumentos arqueológicos, históricos y paleontológicos, que sean aplicados en forma coordinada con los gobiernos estatales y municipales; y finalmente el promover conjuntamente con los gobiernos de los estados y los municipios, la elaboración de manuales y cartillas de protección de patrimonio arqueológico, histórico y paleontológico, en su ámbito territorial, que adecúen los lineamientos nacionales de conservación y restauración a las condiciones concretas del Estado y del municipio, respectivamente. Si el INAH ha cumplido con las fracciones IV y V mencionadas previamente, tales documentos locales no son de libre acceso para los profesionales de la conservación y restauración, y mucho menos para los propietarios de los inmuebles mismos, por lo que para que dichos particulares cumplan con la fracción III del mencionado Artículo 2o. de la Ley Orgánica del INAH, que establece que en los términos del artículo 7o. de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicos, Artísticos e Históricos, otra de sus funciones es otorgar los permisos y dirigir las labores de restauración y conservación de los monumentos arqueológicos e históricos que efectúen las autoridades de los estados y municipios, se torna entonces en una tarea sumamente compleja la obtención de los permisos para la restauración de dichos inmuebles, haciendo caer a los propietarios (cuando existen) en el desánimo y por consecuencia deciden dejar que el tiempo se haga cargo y la estructura colapse por falta de mantenimiento.

Ahora bien, no todo el problema se puede atribuir a los complicados procesos burocráticos implícitos en la obtención de permisos para fines de preservar inmuebles antiguos por parte de los particulares, de preguntas realizadas en campo a vecinos de estos inmuebles, se ha constatado que muchos de los casos algunas casas han estado abandonadas por décadas y ni siquiera ellos conocen a los propietarios, o en muchos otros casos, existen inmuebles intestados o bien existen litigios entre los integrantes de la sucesión. En varios de los casos en las fachadas de los inmuebles se encuentran avisos por medio de lonas (Figura 1), que sin lugar a dudas se entienden como una acción llevada a cabo por parte del gobierno municipal para no ser acusado (en caso de siniestro) de omisión, pese a los cuales el problema continúa a fecha actual.

Figura 1. Aviso de riesgo de derrumbe en casas abandonadas.

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y DAÑOS EXISTENTES

Entre las viviendas afectadas se pueden contar cinco tipos diferentes relacionadas al nivel social de la población (Ramírez, 1985) de aquella época, las primeras son las viviendas de dos niveles ubicadas en el primer cuadro, las cuales tenían en planta baja un portal particular, propio para las actividades comerciales que se llevaban a cabo en las accesorias ubicadas al frente del inmueble; en la parte posterior se localizaban las bodegas y despensas, así como locales destinados a la servidumbre, todos alrededor del patio principal, en el segundo patio los espacios destinados para los animales de carga y sus arreos, estando al final del solar el espacio destinado para la huerta. En planta alta la sala cuyas ventanas con balcones se abrían hacia la fachada principal, el comedor en el lado opuesto y a los lados las habitaciones y el adoratorio. El segundo tipo identificado corresponde a las viviendas de un solo nivel, con la fachada aplanada y portada ricamente ornamentada, contando con el patio limitado por cuatro, tres o dos corredores. En lo que se refiere a la distribución, ésta consta de una sala al lado del zaguán con sus ventanas hacia la calle, al lado opuesto el comedor y a los lados las habitaciones. En el segundo patio estaban las habitaciones de la servidumbre y por último los pesebres de los animales. El tercer tipo corresponde a las viviendas de un solo nivel, con fachada aplanada y los enmarcamientos de los vanos (jambas y dinteles) lisos. El patio principal limitado por tres, dos o un solo corredor; la sala ubicada al frente, la cocina en el lado opuesto y a los lados del patio las habitaciones. En el segundo patio estaban la cocina y habitación de la servidumbre y en el tercer patio el espacio correspondiente a los animales. Además de los esquemas tipológicos mencionados anteriormente, a partir del siglo XVIII, proliferando en el

siglo XIX, apareció en cuarto lugar la tipología de las casas gemelas. Estas casas se construían en pares manteniendo una unidad estilística en fachada. La disposición en planta de una de las casas es en forma de “C” con un patio lateral, y de la otra de “C” invertida. Así, los patios de las casas comparten un muro medianero. El quinto patrón fue el de abrir establecimientos comerciales en la planta baja de los inmuebles, reservando la planta alta para la residencia de la familia.

Resulta importante destacar que estas viviendas fueron construidas a base de muros de cal y canto (cantería) sin acero de refuerzo alguno, con entrepisos conformados mayormente por vigas de madera que soportan una tapa de ladrillo inferior (o en algunos casos tejamanil), un terrado intermedio y una tapa de ladrillo superior (Figura 2), sistema estructural que se deteriora muy rápidamente ante la falta de mantenimiento debida al abandono, ya que se propicia el crecimiento de macro-flora que permite el ingreso del agua de lluvia por percolación, lo que deteriora las cubiertas de azotea y la viguería de madera, la cual con el tiempo colapsa empujando en algunos casos los muros de fachada quedando desplomados hacia la banqueta. Por la condición anterior y una vez que se pierden las cubiertas de azotea (e inclusive en algunos casos en casas de dos niveles llegan a colapsar los entrepisos de la primera planta), el ingreso del agua de lluvia al núcleo de los muros perimetrales y de fachadas produce que el mortero de su interior se deteriore, que en muchos casos no es de cal y arena sino de lodo, derivando en el colapso ante lluvias intensas como fue el caso mediático mencionado previamente, o bien, pueden caer ante la acción de sismos intensos que es el caso que analizaremos.

Figura 2. Cubierta típica con tapa de ladrillo (a). Daño en cubierta típica con tapa de tejamanil (b).

En las Figura 3 y 4 se muestran algunos ejemplos de las más de 110 casas con daño existentes en la zona del centro histórico de la ciudad de Morelia, las cuales en su mayoría son de un nivel y en un porcentaje menor de dos niveles.

Figura 3. Daños en fachadas de casas abandonadas.

Figura 4. Daños en fachadas de casas abandonadas.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE FACHADAS

Para conocer la estabilidad de estos sistemas estructurales ante acciones sísmicas, se consideraron nueve registros acelerométricos obtenidos en estaciones sísmicas cercanas a los Estados de Puebla y Morelos, el 19 de septiembre de 2017. Este evento fue de tipo intraplaca con epicentro a 61 kilómetros de profundidad tuvo una magnitud de 7.2. En la Figura 5 se muestran los espectros de respuesta obtenidos para cada una de las estaciones sísmicas, las cuales son administradas por el Servicio Sismológico Nacional y el Instituto de Geofísica de la UNAM. Se emplearon estos registros sísmicos ya que presentan importantes amplitudes de aceleración en los rangos de períodos naturales de vibración para estructuras tipo fachada, además de que por la proximidad de la ciudad de Morelia con el Cinturón Volcánico Transmexicano que fue donde se produjo el evento en comento, existe una importante probabilidad de que ocurra un temblor con características similares que pudiera afectar la zona del centro histórico moreliano.

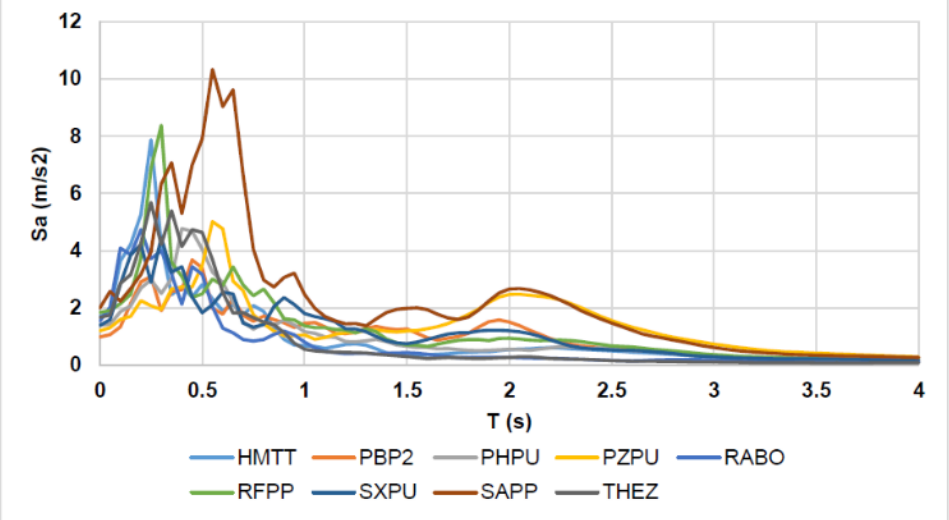
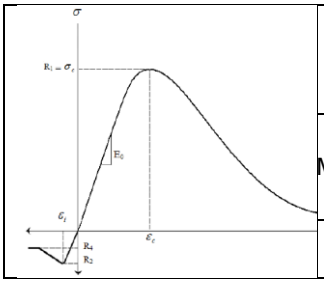


Figura 4. Espectros de respuesta que conforman la demanda sísmica utilizada.

El análisis estructural ante la combinación de peso propio y sismo se realizó empleando modelos bidimensionales de Elementos Rígidos (Casolo & Peña, 2007), el cual es un criterio de análisis con el que se logra una gran rapidez en los análisis dinámicos no lineales en el tiempo comparativamente con otros métodos, como por ejemplo el de los Elementos Finitos (Zienkiewicz, 1977) partiendo del

considerar que los elementos rígidos se comportan elásticamente y no así los elementos de enlace entre los mismos, los cuales se modelan como resortes con rigidez no lineal a los que se les pueden incorporar diferentes modelos constitutivos tanto para comportamiento a compresión como en tensión. Para el presente estudio se utilizó un modelo de tipo exponencial (Peña, 2010), para el cual, el comportamiento a compresión se define únicamente con la rigidez inicial del material y la resistencia a compresión máxima como se indica en la Tabla 1, parámetros mecánicos comunes en cualquier análisis elástico o inelástico.

Tabla 1. Parámetros mecánicos utilizados en el modelo constitutivo.



Material	R1 (Kg/cm²)	R2 (Kg/cm²)	R3 (Kg/cm²)	R4 (Kg/cm²)	Módulo de Young (Kg/cm²)	Módulo del Poisson	Densidad (Kg/m3)
Mampostería	110	-11	71	-3.26	10200	0.2	1800
Rellenos	50	-5	3.2	-1.52	5100	0.2	1600

Se construyeron y analizaron modelos bidimensionales de Elementos Rígidos (Casolo & Peña, 2007) para tres fachadas tipo de la ciudad de Morelia (Figuras 5 a 7), dos son de un solo nivel y una de dos niveles, las cuales se consideran de manera preliminar representativas del conjunto real existente.

(a)

(b)

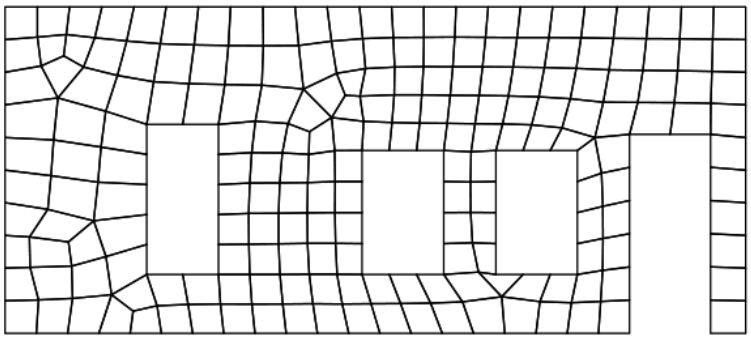
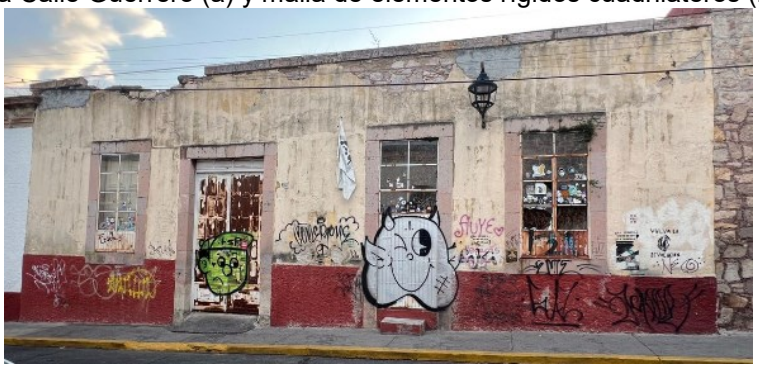


Figura 5. Fachada Calle Guerrero (a) y malla de elementos rígidos cuadriláteros (b).

(a)



(b)

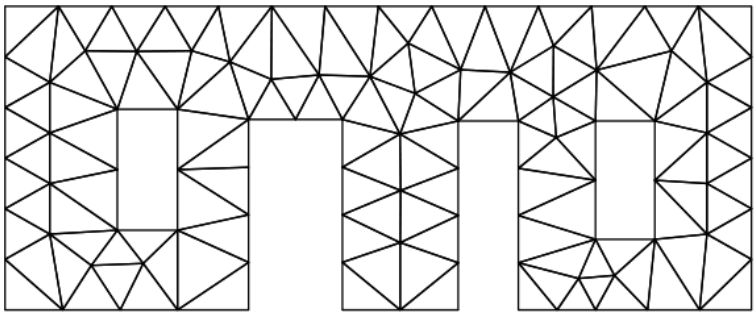


Figura 6. Fachada Calle García Obeso (a) y malla de elementos rígidos triangulares (b).

(a)

(b)

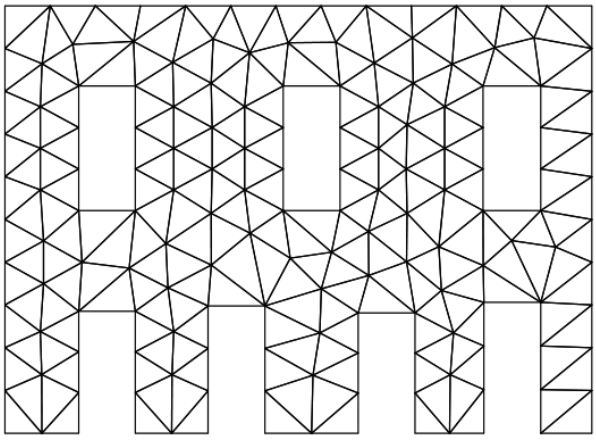
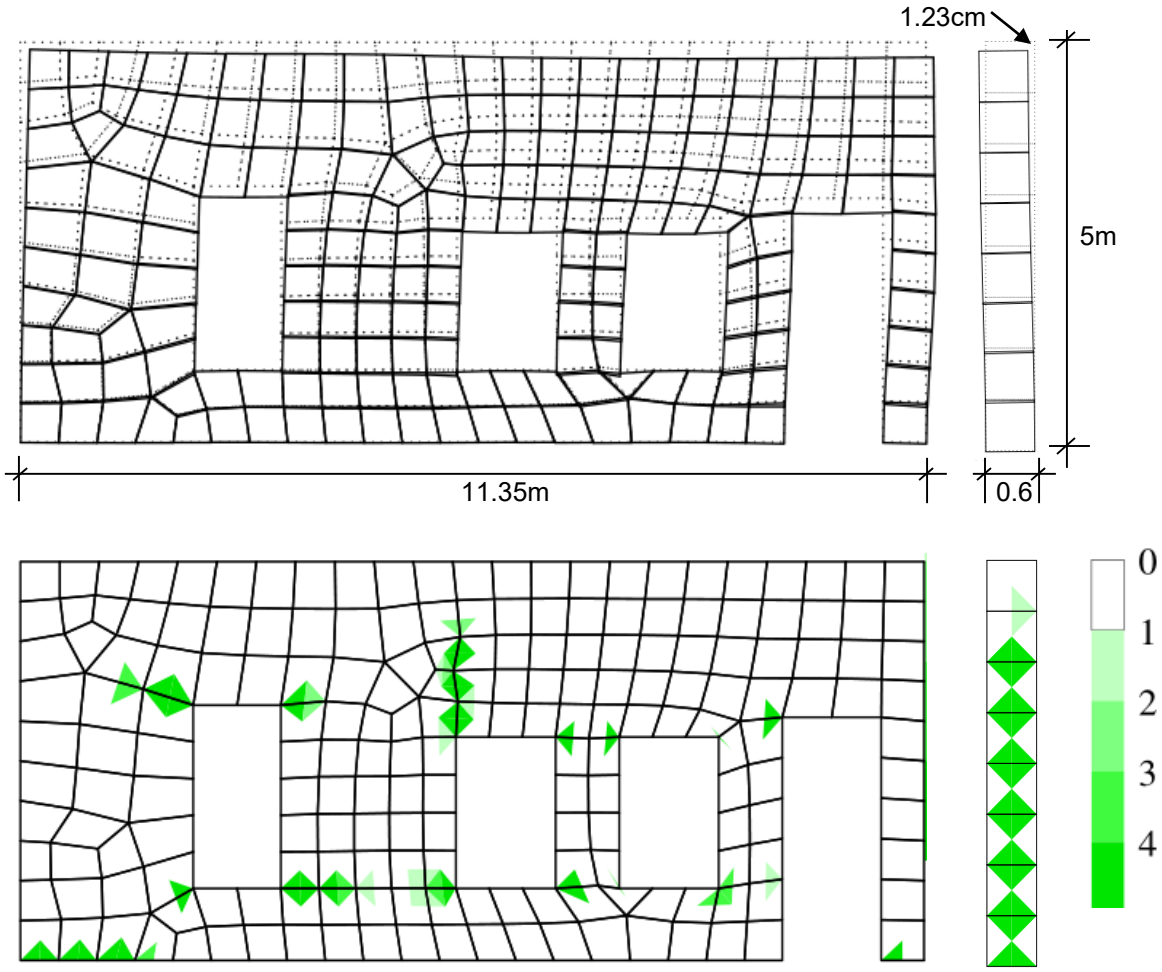


Figura 7. Fachada Calle San Cristóbal Ecatepec (a) y malla de elementos rígidos triangulares (b).

Los modelos se analizaron considerando su peso propio combinado con el sismo y en todos los casos los resultados obtenidos fueron muy similares, siendo el registro de la estación SAPP de Puebla la que generó la mayor respuesta, excediendo la obtenida para recurrencias de 475 y 975 años estimadas mediante un estudio de peligro sísmico en el sitio para suelo firme. En las Figuras 8 a 10 se presentan la deformada dinámica en el plano y fuera del plano (arriba), los daños por tensión por grado siendo 1 ligero, 2 moderado, 3 extensivo y 4 severo (centro); así como los contornos de esfuerzos axiales verticales (abajo) para las tres fachadas tipo analizadas.



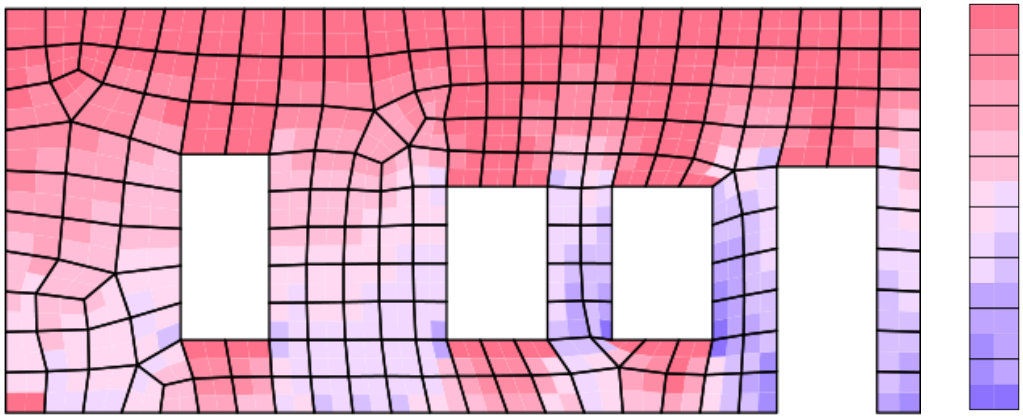
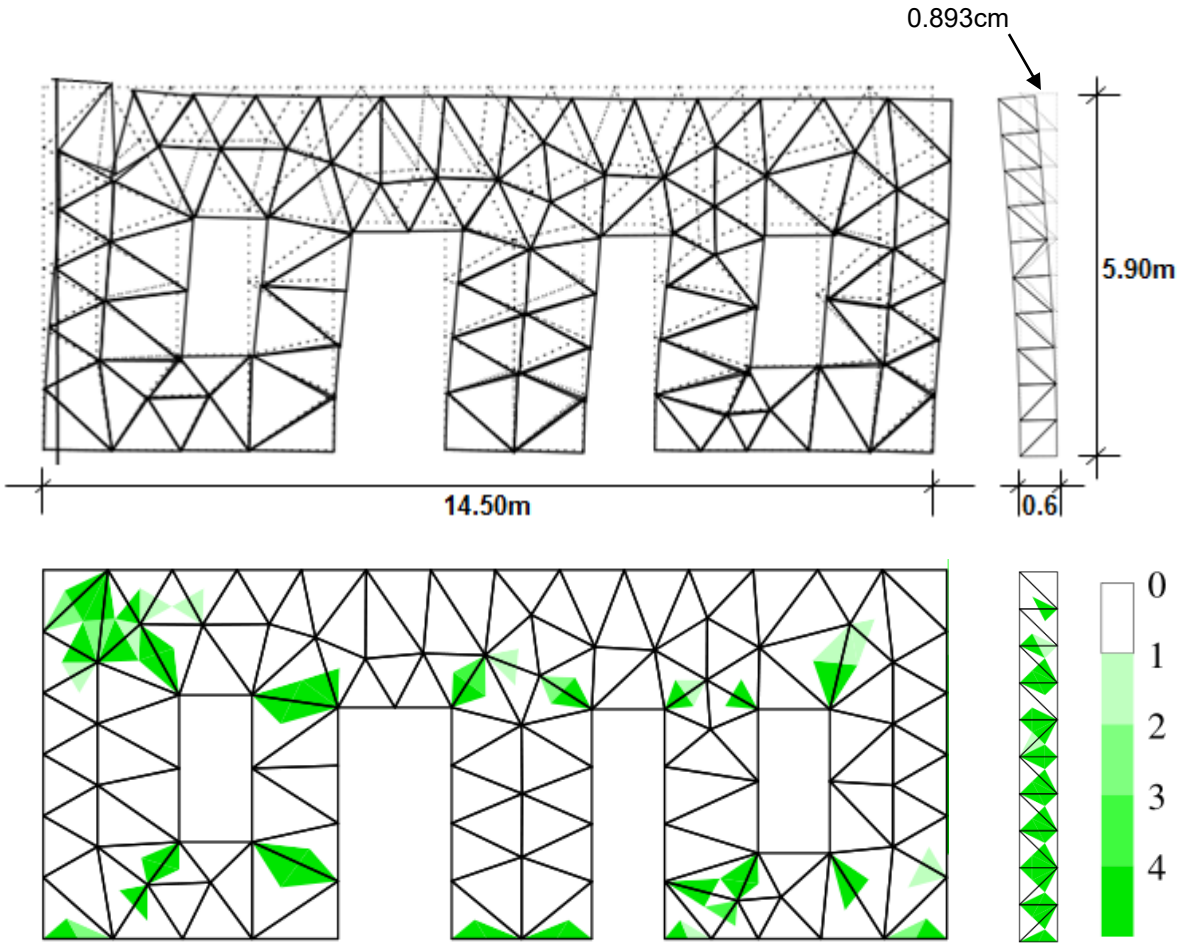


Figura 8. Respuesta en el plano y fuera del mismo para el registro de la estación SAPP en la fachada de Calle Guerrero.



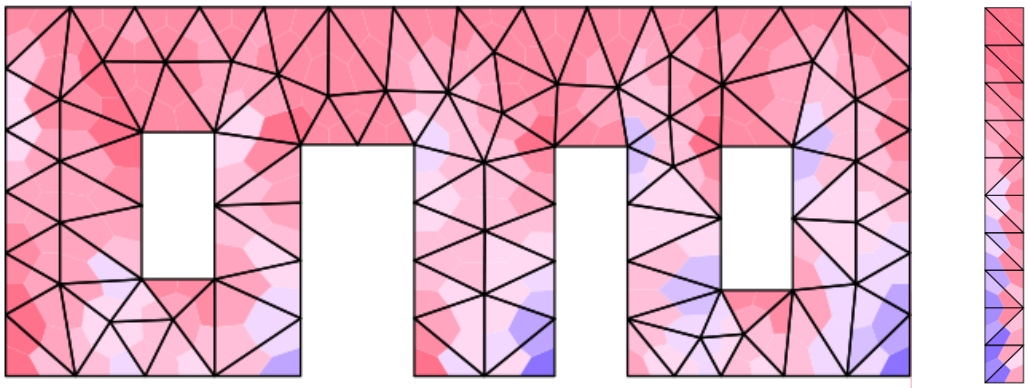
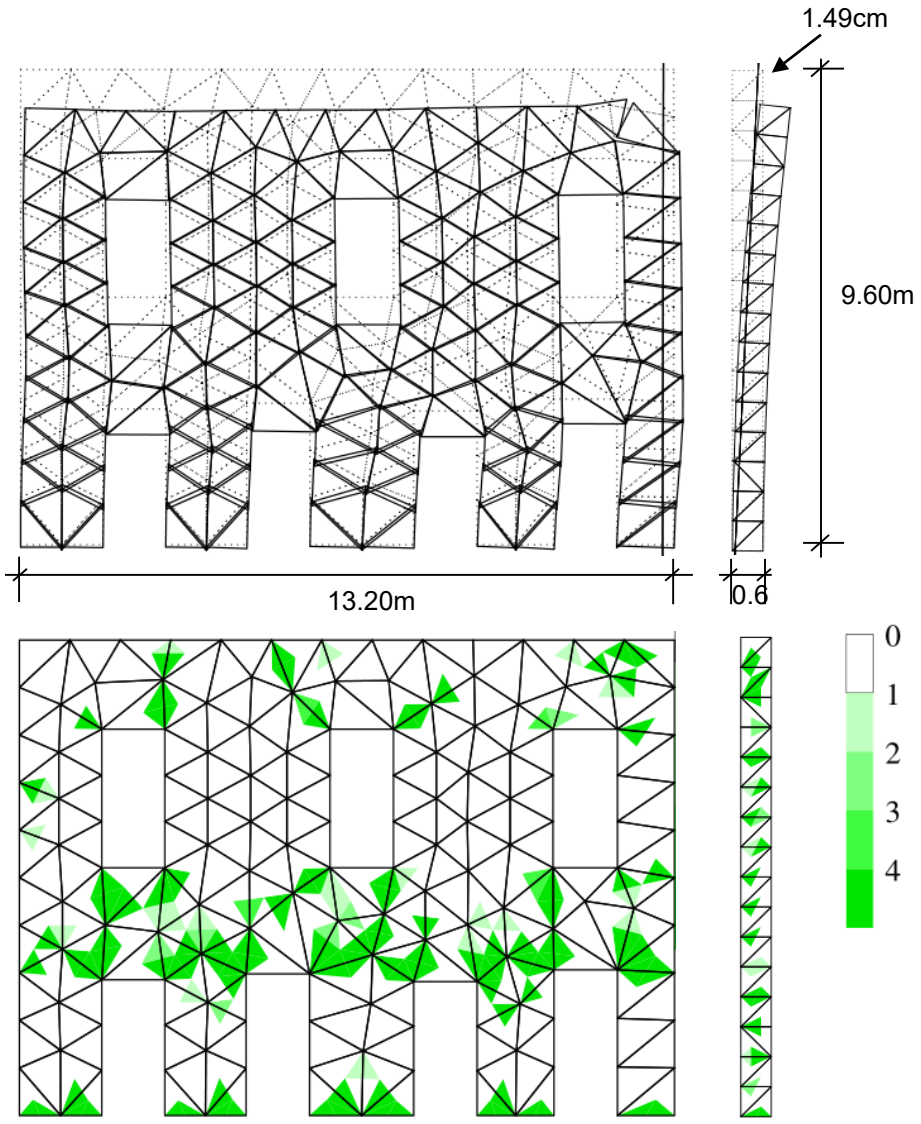


Figura 9. Respuesta en el plano y fuera del mismo para el registro de la estación SAPP en la fachada de Calle García Obeso.



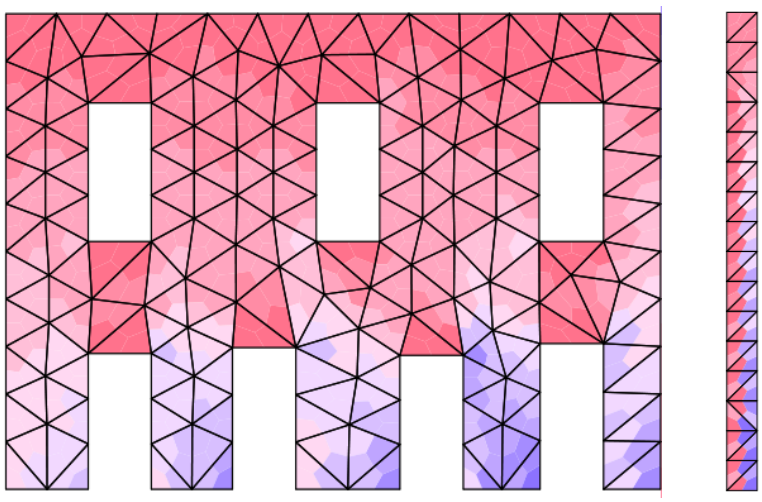


Figura 10. Respuesta en el plano y fuera del mismo para el registro de la estación SAPP en la fachada de San Cristóbal Ecatepec.

RESULTADOS

Desplazamientos laterales

Según las Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo 2023 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, la distorsión lateral límite para estructuras con mampostería de piedras naturales es de 0.0015 multiplicada por la altura del muro, la cual, en los tres casos de fachadas analizados es excedida ante el sismo crítico de diseño de la estación SAPP (Tabla 2) sin escalamiento alguno por peligro sísmico del sitio.

Tabla 2. Desplazamientos máximos calculados y permisibles para el registro de la estación SAPP.

FACHADA	Desplazamiento obtenido (cm)	Desplazamiento permisible (cm)
CALLE GUERRERO	1.23	0.75
CALLE GARCÍA OBESO	0.893	0.885
CALLE SAN CRISTÓBAL ECATEPEC	1.49	1.44

Daños por tensión

De las Figuras 8 a 10 se observa que a mayores alturas mayores serán los daños por tensión en el plano de la mampostería, concentrándose principalmente en la zona central de los muros de un solo nivel y alrededor de las aberturas de puertas y ventanas. Caso particular es el de la fachada de dos niveles, en la cual la mayor parte de los daños se concentran a nivel del entrepiso aun cuando en el

presente estudio no se consideró el posible efecto de martillamiento de la viguería sobre el muro, condición que se analizará en investigaciones posteriores. Por otro lado, a lo ancho de la sección transversal del muro los esfuerzos de tensión se concentraron en las dos terceras partes inferiores de los muros de un solo nivel, y en toda la altura del muro de dos niveles. Es importante resaltar que la resistencia a la tensión de la mampostería es prácticamente nula, por lo que el mapeo de tensiones define la configuración de daño final, que adicionalmente alcanza el grado 4, es decir, daños severos para este el evento sísmico máximo analizado.

Esfuerzos axiales verticales

En las figuras 8 a 10 se muestran los esfuerzos axiales resultantes de la combinación del peso propio de los muros de fachada y el sismo actuando en el plano y fuera del mismo. Los contornos de esfuerzos axiales en el plano denotan colores más intensos en la base, los cuales no revisten valores de riesgo ya que en ningún caso se alcanzaron los esfuerzos permisibles a compresión definidos por el programa empleado (Peña, 2010). Una situación similar en cuanto a la no excedencia de esfuerzos permisibles a compresión ocurre normalmente al plano del muro, sin embargo, se aprecian en los tercios inferiores zonas de compresión y tensión, lo cual hace patente la posibilidad de inestabilidad al vuelco.

CONCLUSIONES

Del análisis estructural no lineal ante sismos reales con características similares a los que se pudieran llegar a producir en la ciudad de Morelia, se evidenció de manera determinista que las fachadas de casas abandonadas de uno o dos niveles, pueden experimentar severos grados de daño por tensión que producirían agrietamientos de consideración, tanto en el plano de los muros en las esquinas de puertas y ventanas como a lo ancho del espesor de los mismos. Por otro lado, se descartan posibles daños por compresión, más sin embargo, es evidente que se presenta el típico cambio de esfuerzos de tensión a compresión sobre el ancho de la base de los muros cuando el sismo actúa normal al plano, acreditando la posibilidad de vuelco fuera del plano de las tres fachadas tipo analizadas, las cuales, tienen un espesor de 60 centímetros, que solía ser el más común en el siglo XIX debido a que el tamaño de las piezas de cantera no debía tener un peso excesivo, ya que se colocaban generalmente a mano sin la ayuda de sistemas mecánicos de izaje. Finalmente, los desplazamientos laterales producidos por el sismo más crítico de la demanda considerada exceden los valores límite establecidos por la normativa vigente.

De manera preliminar el presente trabajo evidencia el riesgo de vuelco fuera del plano de las fachadas de casas abandonas en ruina ante acciones sísmicas, las cuales podrían volcar hacia las banquetas y generar daños de consideración a personas y bienes, por lo que resulta necesario ampliar el presente estudio de cara a minimizar el riesgo de pérdida, tanto desde el punto de vista social como del patrimonial en esta bella ciudad patrimonio de la humanidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Castro, S. (2021). Casas del centro histórico de Morelia; al borde del colapso. *El Sol de Morelia.* https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/casas-del-centro-historico-de-morelia-al-borde-del-colapso-6861331.html.
2. García, E. (2014). La valoración Ramificada, Visiones en torno a la Quinta Eréndira de Pátzcuaro. Patrimonio Arquitectura del Siglo XX. Intervención y Valoración. R. Ettinger McEnulty y Enrique X. de Anda Alanís, Compiladores. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://www.arq.umich.mx/icomos-patrimoniosxx/.
3. Ramírez, E. (1985). Morelia en el espacio y el tiempo. Defensa del patrimonio histórico y arquitectónico de la ciudad de Morelia, *Comité Editorial del Gobierno del Estado de Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, Departamento de Investigaciones Artísticas.
4. Casolo, Siro. and Peña, Fernando. Rigid element model for in-plane dynamics of masonry

walls considering hysteretic behaviour and damage, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (2007), **36**: 1029-1048.
5. Peña, F. RIGID (v.0.4.1) *Programa de Elementos Rígidos para en Análisis Dinámico no Lineal de Estructuras de Mampostería*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México (2010).
6. Zienkiewicz O. C. (1977). Finite Element Method in Engineering Science, McGraw Hill.

MENTEFACTURA APLICADA A LA CONSTRUCCIÓN DE UN CANSAT

Karina Rosas Paleta, Miguel Ángel Rosales Carreón, Verónica Machorro Sánchez, Luis Ricardo Morales Juárez y María Guadalupe Araceli Rosas Paleta

TECNM / Instituto Tecnológico de Puebla.
karina.rosas@puebla.tecnm.mx

RESUMEN

Para atender la problemática sobre aplicaciones de programación en la especialidad de Ingeniería en Electrónica (IE) del Instituto Tecnológico de Puebla (ITP) para la materia de Telecomunicaciones se propone el uso de Mentefactura aplicado a la Construcción de un CanSat con Autogiro y cumplir con la misión de mantener un huevo a salvo dentro del mismo. El concepto de Mentefactura fue promovido en el año 2012 por Juan José Goñi Zabala y presenta su mayor auge a partir del año 2020. El objetivo principal es crear alternativas y/o soluciones que permitan mejorar los procesos, productos y servicios a partir del conocimiento, la tecnología y la creatividad siendo la piedra angular las personas a implementar dicho concepto. La construcción de un CanSat con Autogiro es un reto ya que no solo requiere el uso de electrónica sino del conocimiento previo adquirido del área de ciencias básicas como es física y dibujo y de otras áreas afines como la Ingeniería mecánica, la ingeniería en sistemas o informática, lo que convierte a este trabajo a un proyecto integrador. El satélite diseñado y construido es para uso educativo por lo tanto es de bajo costo, sin embargo, no por eso deja de ser interesante ya que los alumnos se enfrentan a muchas problemáticas a resolver como es la elección del tipo de material a utilizar para la impresión de las partes que lo constituyen, el lenguaje de programación a utilizar para la obtención de resultados, el tipo de electrónica a utilizar para elegir las tarjetas para la adquisición de datos, mantener la misión entre otras. El diseño en 3D de todas las partes que forman el cuerpo del satélite (carcasa) y el autogiro permite que los alumnos trabajen en equipo para investigar tipos de materiales, costos, tiempo de impresión, software, hardware y sensores. El diseño del satélite enlatado fue impreso con dos tipos de plásticos que es el PLA (plástico rígido) y el PTU (plástico flexible). Para poder controlar la caída del CanSat se diseñó el autogiro cuya función principal es la de minimizar la caída libre para garantizar que la carga (huevo) no se rompa. Para su impresión se utilizó el plástico tipo PLA por su resistencia al impacto. El proceso de construcción les permite a los alumnos generar, transformar y utilizar en beneficio propio las mejoras y además la obtención de resultados como es temperatura, humedad y la graficar los resultados en una interfase de monitoreo. Además, la satisfacción de poder ver en funcionamiento real sus capacidades para resolver problemas a partir de sus actitudes, aptitudes, habilidades, cualidades y la inteligencia de descubrir sus propias limitaciones para superarlas.

INTRODUCCIÓN

Juan José Goñi Zabala en el día de la mentefactura celebrado en Guanajuato en 2023. Define a la mentefactura como la capacidad que tiene el ser humano para agregar valor al trabajo mediante el conocimiento y las emociones vinculadas fundamentalmente con las relaciones de cooperación y de colaboración de pertenencia a una iniciativa global. El concepto de Mentefactura se ha vuelto un término muy utilizado por docentes y estudiantes de las carreras de ingeniería en materias relacionadas con la calidad de los procesos, sin embargo, es un concepto que puede aplicarse a todas las ramas de la ciencia e ingeniería que requieren alternativas y soluciones nuevas para mejorar los sistemas o procesos ya existentes.

Un pico-satélite (CanSat) es un tipo de satélite destinado a la exploración y la investigación. Debido a tales dimensiones y limitaciones de masa, sus componentes y subsistemas deben ser más pequeños en comparación con los satélites convencionales [1].

Los pico-satélites CanSat por sus siglas en ingles Can-Satellite fueron nombrados por el profesor Robert Twiggs del laboratorio de la Universidad de Stanford en 1999, cuya finalidad es transmitir a los estudiantes los conocimientos para el diseño y construcción de satélites [2, 9].

Para atender la problemática sobre aplicaciones en la especialidad de Telecomunicaciones de Ingeniería en Electrónica (IE) del Instituto Tecnológico de Puebla (ITP). Se propone que los alumnos participen en el concurso organizado por el Programa Espacial Universitario (PEU) de la UNAM celebrado en mayo de 2023. El cual pretende que estudiantes de nivel superior puedan identificar habilidades para resolver problemas con mayor grado de dificultad [8] al crear y diseñar un CanSat con Autogiro para cumplir con una misión, como una oportunidad única de obtener experiencia práctica en un proyecto con tecnología espacial mediante la implementación de las directrices de la mentefactura.

Los requisitos específicos que deben cumplirse en este proyecto integrador comprende principalmente el diseño, la construcción del autogiro, la obtención de datos mediante la telemetría, las comunicaciones, la autonomía del sistema, la explotación al máximo de las capacidades, las experiencias y las ideas de las personas para generar soluciones de alto impacto a nivel económico, social y medio ambiental y cumplir con la misión de mantener un huevo a salvo dentro de mismo durante y el impacto del satélite enlatado. Para cumplir con todo lo anterior, en este trabajo se sugieren las siguientes fases: creación y diseño, planeación y estrategia, implementación y fabricación, evaluación y aprendizaje e Iteración y mejoras. Las cuales se aplican directamente al proceso del Goñi Zabala.

TEORÍA

Un satélite enlatado, o cansat, es un dispositivo electromecánico cuyo principal objetivo es simular los componentes de un satélite real; como su nombre lo indica, sus elementos están integrados dentro de un volumen y una geometría de dimensiones aproximadas a las de una lata de refresco [3].

El proceso de Mentefactura que propone Zabala se resume utilizando cuatro figuras geométricas importantes. El círculo denominado identificación del problema el cual consiste en comprender la problemática o necesidad a resolver mediante la recopilación de información en diferentes fuentes de información. La segunda etapa se representa por el rectángulo y se denomina desarrollo y transformación del conocimiento, es aquí donde se realiza el análisis y procesamiento de la información obtenida para presentar la solución al problema, la tercera etapa representada por el rombo permite evaluar la solución es decir realizar pruebas y correcciones y finalmente el triángulo el cual implementa directamente la solución real. Para el proyecto del desarrollo del CanSat con autogiro se propone lo siguiente. La primera fase se denomina diseño del satélite, la siguiente fase se denomina programación y ensamblado, la tercera fase permite realizar la prueba de campo y la cuarta fase es la obtención de resultados como se presenta en la figura 1.

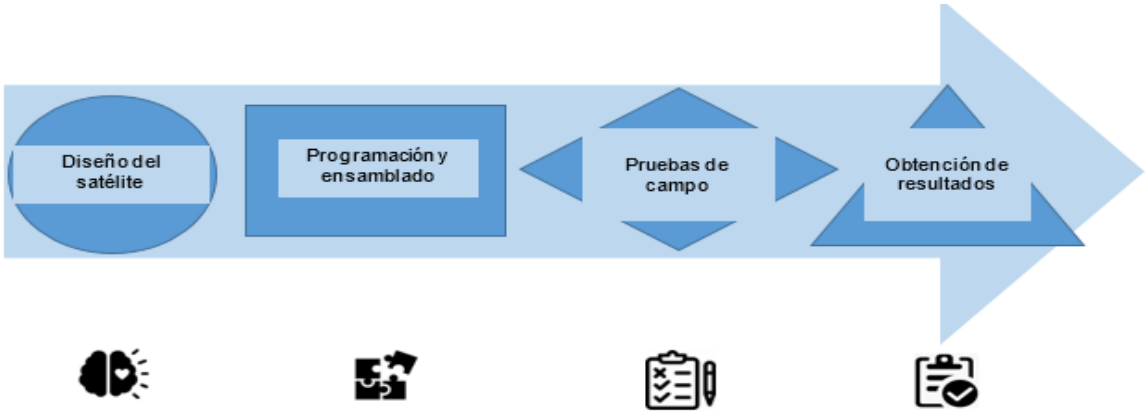


Figura 1. Modelo Mentefactura propuesto.

Las fases de la mentefactura antes mencionadas permiten que el proyecto sea un integrador final. Las tres primeras fases comprenden un diseño de bajo costo y una construcción para uso educativo, sin embargo, no por eso deja de ser interesante ya que los alumnos se enfrentan a muchas problemáticas a resolver para cumplir con los objetivos.

Para la primera fase del boceto del satélite enlatado se utiliza el software Solidworks®. Todas las partes que forman el cuerpo externo y la parte central donde debe estar a salvo el tripulante (huevo) del CanSat son diseñadas en 3D y se realiza la investigación en aeronáutica para el diseño del autogiro, también se realiza la investiga del material a utilizar para la impresión de las estructuras internas y externas.

Ventura 2021 menciona que el autogiro debe estar compuesto por dos pares de cuchillas colocadas en el mismo eje con rodamiento en sentido opuesto para mantener el descenso del satélite estable [4].

Para continuar con el seguimiento del proyecto es necesario implementar un diagrama de Gantt. Terrazas 2011. La única manera de poder ordenar, sistematizar, estructurar la posible realización y ejecución de un programa o proyecto, es a través de la utilización de herramientas y elementos planificadores que, a través de reglas sencillas y claras, permitan determinar los supuestos base para aminorar el riesgo de fracaso de la posterior ejecución efectiva de tareas [5]. Además, se realiza la investigación y solución de las ecuaciones, el lenguaje de programación a utilizar para la obtención de resultados, el tipo de electrónica a utilizar para elegir las tarjetas para la adquisición de datos y los sensores para las mediciones de presión, temperatura, orientación y aceleración [10].

Egger, 2003 [6] define a la presión como el cociente entre la acción de una fuerza sobre la unidad de superficie, según la fórmula (1).

ecuación de la presión $P = \frac{F}{S}$ (1)

donde:

$P = presión$

$F = fuerza$

$S = superficie$

Por lo tanto, la presión atmosférica es numéricamente igual al peso de una columna de aire que tiene como base la unidad de superficie y como altura la de la atmósfera.

Hewitt, 2007 [7], dice que la temperatura de la materia se expresa con un número que corresponde a lo caliente o frío que está algo, según determinada escala.

La orientación de un objeto mediante caída libre es el movimiento del cuerpo que se debe únicamente por la influencia de la gravedad ya que no se considera la resistencia del aire. La aceleración que presentan estos cuerpos es dirigida hacia abajo y su valor depende del lugar donde se encuentre y se calcula a partir de la ecuación 2.

ecuación de la aceleración $F = ma$ (2)

donde:

$F = fuerza$

$m = masa$

$a = aceleración$

En la segunda fase del proceso de mentefactura se realiza la programación y el ensamblado de todos los sistemas físicos (internos y externos); componentes, sensores, tarjetas y baterías como se puede observar en la figura 2.

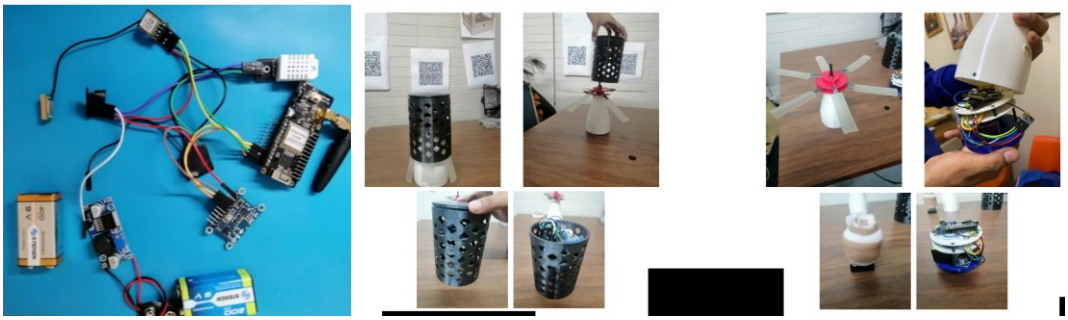


Figura 2. Se presenta el ensamble de todos los componentes.

En la tercera fase se llevan a cabo las pruebas de campo para la verificación de que todos los sistemas funcionen de manera correcta y realicen sus actividades conforme a lo programado. Además, esta fase permite identificar todos los errores que deben corregirse antes de la prueba final.

Finalmente, en la cuarta fase se obtienen los resultados de las diferentes pruebas realizadas y se procede a proponer las mejoras del proyecto de acuerdo a los resultados obtenidos.

PARTE EXPERIMENTAL

El diseño del CanSat desarrollado en solidwork® se presenta en la figura 3. En la imagen antes mencionada se presenta de manera explícita el diseño externo e interno, las dimensiones del cilindro equivalen a 9 cm de diámetro y una altura de 22 cm. El cuerpo externo diseñado es liso al tacto en toda la superficie.

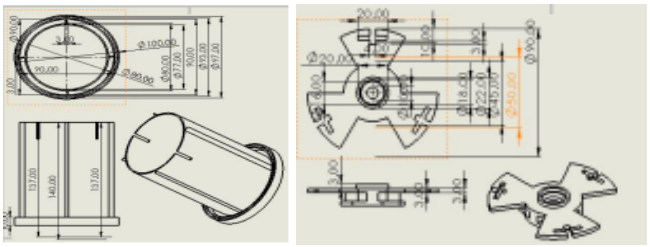
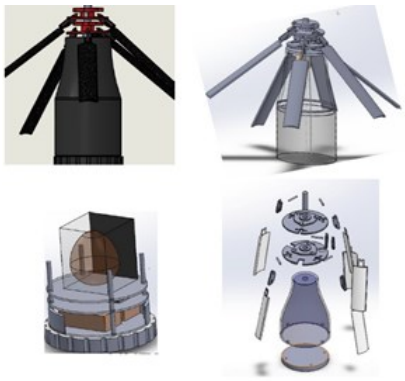


Figura 3. Diseño del proyecto en solidworks® cilindro y autogiro.



En la figura 4 se presenta el diseño del autogiro completo y las partes del autogiro.

En la imagen 4 se puede observar el sistema de autogiro que se encuentra embebido en el interior del satélite. El peso del satélite ensamblado es de 428 gramos. Distribuidos de la siguiente forma; el sistema de telemetría y comunicación pesa 119 gramos la estructura y el sistema de auto-giro 156 gramos y el sistema de liberación 153 gramos.

Tabla 1. Diagrama de Gantt.

FASES / TIEMPO	*1 mes*	*2 mes*	*3 mes*	*4 mes*	*5mes*	*6 mes*
Diseño y Construcción						
Planeación y Estrategia						
Implementación y Fabricación						
Evaluación y Aprendizaje						
Iteración y Mejoras						

En la tabla 1 se presentan las tareas o actividades a realizar de forma individual o en paralela y el tiempo que se requiere para cumplir y terminar el proyecto.

.

RESULTADOS

A través de toda esta travesía en la planeación, desarrollo e implementación del proyecto CanSat con autogiro todo el equipo tuvo que enfrentar y resolver adversidades para que el proyecto tuviera éxito. Una proeza importante a vencer fue el diseño del autogiro. Se realizó una investigación exhaustiva en el área de la aeronáutica para determinar su adecuado funcionamiento lo que permitió el desarrollo de varias hélices para la puesta en marcha de las pruebas.

Durante el ascenso, el dispositivo experimentó cambios en su orientación debido a la aceleración y movimiento ascendente. Los ángulos de Euler (rumbo, inclinación, cabeceo) medidos por los sensores de acelerómetro (LSM303) y giroscopio (L3G) reflejaron estos cambios en la interface gráfica de monitoreo. A partir de la caída libre, el dispositivo no se encontraba en un estado

estacionario, es decir se presenta una rotación con respecto a la gravedad. Los ángulos de Euler el rumbo, la inclinación del dispositivo, y el cabeceo, medidos por los sensores de acelerómetro (LSM303) y el giroscopio (L3G) mostraban cambios en la orientación de forma paulatina durante el descenso mediante la observación de los datos en la pantalla con la aplicación de Visual Studio® en tiempo real. En la tabla 3 se puede observar los ángulos calculados por el sistema los cuales se presentan en la columna x, y, z (recuadro morado).

Tabla 3. Resultados obtenidos por los sensores

Datos actuales

TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
21:15:35.83	63.1	108.89	2.72	0.29	0	0.17	0.58	10.39

Información histórica

TIME	Temp. (°F)	X	Y	Z	Barómetro	Acel. X	Acel. Y	Acel. Z
21:15:35.83	63.1	108.89	2.72	0.29	0	0.17	0.58	10.39
21:15:28.37	63	108.92	2.53	0.28	0	0.13	0.58	10.35
21:15:24.64	62.9	109.01	2.35	0.29	0	0.17	0.56	10.4
21:15:17.18	62.9	108.89	2.33	0.3	0	0.19	0.58	10.33
21:15:13.44	62.9	108.99	2.18	0.32	0	0.19	0.53	10.4
21:15:09.71	63	109.07	2.02	0.37	0	0.19	0.54	10.38
21:15:05.98	62.9	109.17	1.78	0.37	0	0.11	0.56	10.38
21:15:02.25	63.1	108.83	1.94	0.31	0	0.16	0.59	10.38
21:14:54.80	62.8	108.33	2.26	0.23	0	0.17	0.59	10.4
21:14:47.34	63	108.08	2.21	0.34	0	0.11	0.59	10.38
21:14:39.88	63	107.84	2.15	0.26	0	0.11	0.57	10.41
21:14:36.15	63.1	107.84	1.94	0.29	0	0.15	0.59	10.42
21:14:32.42	62.9	107.41	2.19	0.24	0	0.16	0.58	10.37
21:14:28.69	62.8	107.37	2.14	0.19	0	0.2	0.55	10.39
21:14:24.95	63.1	107.39	1.99	0.2	0	0.13	0.56	10.33

Lamentablemente en la prueba final a una altura de 400 metros el sistema de liberación se atascó lo que llevó al Cansat a un descenso precipitado. A pesar de ello la integridad de las piezas continuaba ya que no se rompieron. Lo único que colapsó fueron las uniones de las hélices a los soportes. Para resolver el problema se sustituyeron las piezas. Durante el impacto hubo una perturbación en el sistema que fue provocada por un desperfecto producto del impacto, un corto circuito provocado por 2 cables que se soltaron a la hora del impacto, sin embargo, después de rescatar el satélite, el equipo se percató que las tarjetas utilizadas para la comunicación y obtención de datos no presentaron ningún problema pesar de la caída.

A continuación, en la tabla 3 se muestran los datos obtenidos de los sensores instalados para adquirir; temperatura, presión, humedad presión ambiental y aceleración. En la figura 4 se observan las gráficas de los datos obtenidos.

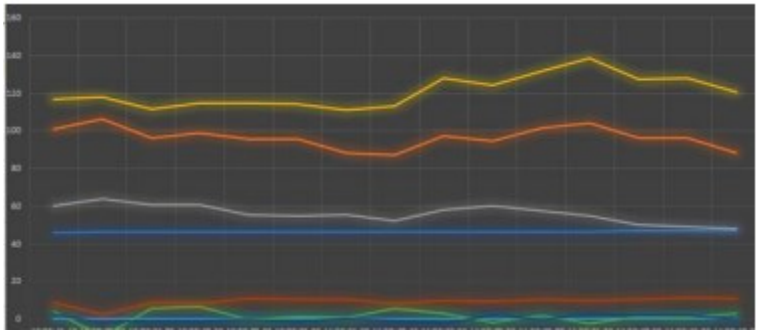


Figura 4. Grafica de resultados de las variables de temperatura, presión, humedad presión ambiental y aceleración

Una vez realizado la inspección del estado del Cansat tras la caída se procedió a revisar la obtención de datos y todas las tarjetas y se observó que todo estaba en orden y el único motivo por el cual dejó de transmitir (ver figura 6) durante un periodo corto de tiempo fue porque uno de los cables de alimentación se rompió por el golpe. Posteriormente se realizó una prueba alimentándose directamente desde su puerto Micro USB y se determinó que seguía en funcionamiento por lo tanto no se tuvo pérdida respecto al hardware utilizado. Se obtuvo una conexión punto a punto con frecuencias de 915 Mhz. La programación de la placa de lora se realizó con el mismo IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) de Arduino que utiliza el lenguaje de C++ para la obtención de la presión atmosférica y la temperatura.

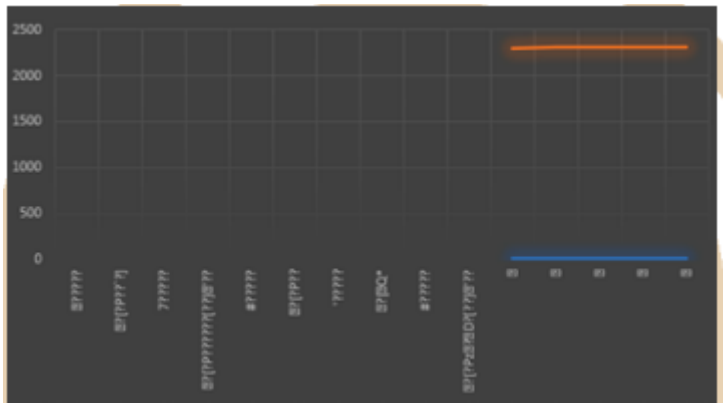


Figura 6. Lapso sin obtención de datos.

Durante el ascenso, la temperatura y la presión atmosférica experimento cambios significativos. A medida que el dispositivo se elevaba en altitud, la temperatura disminuyo debido a las condiciones atmosféricas. Además, la presión atmosférica también disminuyo a medida que se ascendía en la atmósfera. Estos cambios en la temperatura y la presión atmosférica fueron monitoreados y registrados por los sensores correspondientes.

Para la temperatura y la presión atmosférica, la caída libre no tenía un impacto directo en estas variables, ya que están más relacionadas con las condiciones ambientales. Sin embargo, podían producirse pequeñas variaciones debido a los cambios de altitud experimentados durante la caída. A medida que el dispositivo descendía en el aire, la presión atmosférica podía disminuir ligeramente, mientras que la temperatura podría verse afectada por factores como la exposición a corrientes de aire frío durante la caída.

Durante el ascenso, la aceleración medida por el LSM303 muestra variaciones de acuerdo con la aceleración ascendente experimentada por el dispositivo. La aceleración registrada fue positiva y aumento a medida que el dispositivo se aceleró hacia arriba. Esta aceleración fue adicional a la aceleración gravitacional y reflejará el impulso ascendente del dispositivo. En lo que respecta a la aceleración, durante la caída libre, la aceleración medida por el acelerómetro era aproximadamente igual a la aceleración debida a la gravedad (-9,8 m/s²), en dirección opuesta al vector de gravedad. Esto se debe a que, en la caída libre, la única fuerza actuante sobre el dispositivo es la gravedad, y no hay otras fuerzas externas que generen aceleración adicional. Por lo tanto, el acelerómetro registraría una aceleración constante y negativa debido a la gravedad.

El cambio en la humedad durante el ascenso estuvo sujeto a las condiciones atmosféricas y la humedad relativa existente en el entorno. En general la humedad relativa disminuyo a medida que se asciende en la atmósfera debido a la disminución de la presión atmosférica. En cuanto a la humedad, la caída libre no tenía un efecto significativo en las mediciones realizadas por el sensor DHT22. La humedad relativa se basa en la cantidad de agua presente en el aire y no está directamente relacionada con la caída libre. Por lo tanto, el sensor de humedad no registraría cambios relevantes en su lectura durante la caída.

Cabe destacar que no se perdió comunicación en ningún momento del ascenso ni durante el descenso, sin embargo, al momento del impacto pudimos apreciar una pérdida de datos útiles debido a un fallo provocado por el mismo impacto, es de notar que la comunicación no se interrumpió al momento del impacto pues a pesar de recibir información dañada, la comunicación seguía funcionando.

CONCLUSIONES

La Mentefactura no busca crear un producto a partir de una materia prima utilizando las manos o máquinas. El objetivo de aplicar este concepto en el trabajo anterior fue la creación de nuevas alternativas y soluciones que permitieron resolver problemas del proyecto mediante la creatividad e innovación. Lo que ha permitido al equipo que a través de participar en el concurso PEU de mayo 2023. Se puedan enfrentar a diferentes adversidades para resolver y corregir para la obtención de mejores resultados. Todos los puntos débiles y las nuevas posibilidades y/o correcciones del sistema permitieron vivir una gran experiencia para todos los integrantes ahora se pretende seguir participando en este tipo de concursos y se espera una mayor preparación emocionalmente y con experiencia en la solución de problemas de hardware y software en los próximos eventos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Antonio Gómez Roa, Mauricio Leonel Paz González, Andrés Calvillo Téllez, Juan Antonio Paz González, Oscar Adrián Morales Contreras, José Cruz Núñez Pérez. Análisis dinámico estructural de satélite educativo CanSat. Scielo. Comp. y Sist. vol.22 no.2 Ciudad de México abr./jun. 2018 Epub 21-Ene-2021. versión On-line ISSN 2007-9737versión impresa ISSN 1405-5546.
[2] UNISEC (2007). International CanSat Workshop Takeda Hall. University of Tokyo, Japan. [Links]

[3] Programa Espacial Universitario [PEU] (2022). ¿Qué es un Cansat? Universidad N}acional Autónoma de México. http://peu.unam.mx/descripcionCANSAT.html

[4] Alejandro Ventura, Johan Nuñez-Quispe, Godo Sanchez, Jafet Santivañez. CanSat payload with Autogyro for descent in experimental rocket flights: Development, CFD analysis, and preliminary test on free-fall. The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE 2021). Journal of Physics: Conference Series 2235 (2022) 012055 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2235/1/012055

[5] Journal of Physics: Planificación y programación de operaciones Operations planning and programming. Conference Series 2235 (2022) 012055 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2235/1/012055.

[6] Egger, A. (2003). La atmosfera de la tierra: composición y estructura. Documento en línea. Disponible en: http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=107&l=s. Consulta: 20/01/2010.

[7] Hewitt, P. Física conceptual. México: Pearson educación. 2007

[8] Diseño y Construcción de Cansat Meteorito M.I. María Guadalupe Araceli Rosas Paleta1 , M.I. Karina Rosas Paleta1 , Ing. Josué Olivares Ramírez1 , Carlos Enrique Flores Vázquez1 , Xiomara Ivett Hermitaño Martínez1 , Briane Isaac Rivera Escalona1 , Samuel Cabañas Blázquez1 , Josué Aguilar Martínez en el portal de Internet AcademiaJournals.com, con ISSN 1946-5351 online, Vol. 15, No. 01, 2023 e indexación en la base de datos Fuente Académica Plus de EBSCOHOST, Massachusetts, Estados Unidos y (2) en libros ebook digitales compilados por área temática, con números ISBN online*.

[9] Agencia Espacial Mexicana. (2016). Consultado el 29 de septiembre de 2016, http://www.educacionespacial. aem. gob.mx/ cansat.html

[10] NASA (2014). SmallSpacecraftTechnologyStateoftheArt. National Aeronautics and Space Administration, California. Technical TP2014- 216648. Disponible en http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/smallspacecrafttechn
ologystateoftheart2015tagged.pdf

MECANISMO DE DIFUSIÓN DE BORO EN UNA SUPERFICIE FERROSA UTILIZANDO DINÁMICA MOLECULAR

Mariana Bárcenas Castañeda[1], Francisco Javier Pérez Ramírez[1,2], María de la Luz Delgadillo Torres[1], María de los Ángeles Vargas Hernández[1], Víctor Augusto Castellanos Escamilla[2]

[1] TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, [2]TecNM: Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

mbarcenas@tese.edu.mx.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio computacional del mecanismo de difusión de boro en una superficie ferrosa. El estudio se realizó utilizando la técnica de dinámica molecular con el programa GROMACS. Se desarrolló un modelo de difusión como función del potencial de interacción, considerando una superficie metálica de hierro con estructura Fe110. Se construyo la superficie ferrosa utilizando programas de visualización y modelamiento molecular (Vesta y Avogadro). Se desarrollaron scripts para realizar los cálculos de simulación, por ejemplo, topologías. Se realizó un estudio tomando a la temperatura como variable de estudio y se determinó su efecto sobre la difusión de boro y la formación de capas FeB y Fe_2B. Se encontró la formación de Fe_3B, que ha sido reportado en la literatura como una capa no estable y en cantidades casi imperceptibles[3]. Se reporta la eficiencia de la difusión como función de la temperatura.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es el proceso electroquímico que causa el deterioro de las propiedades físicas y químicas de un material metálico, causando su desgaste y por lo tanto disminuyendo su tiempo de vida útil. La corrosión es un fenómeno que ocurre por las reacciones de oxido-reducción que dan inicio por el contacto de la superficie metálica con el medio con el que interactúa (NACE, 2016). Este fenómeno provoca severas pérdidas económicas a nivel industrial, pues se presenta durante el transporte, producción y transformación de un material, producto o servicio. Por lo tanto, es imperante el uso técnicas y tratamientos para controlar el fenómeno de la corrosión. En este sentido, se han desarrollado técnicas, productos y procedimientos para controlar el fenómeno de la corrosión, de los cuales destacan el uso de moléculas que inhiben o controlan la corrosión y tratamientos de endurecimiento que mejoran las propiedades superficiales y de resistencia de los materiales metálicos. De acuerdo con la aplicación y operación donde se pretende controlar el fenómeno de la corrosión, es el método para utilizar.

El uso de tratamientos termoquímicos para generar un recubrimiento que mejore las propiedades de un material metálico es una alternativa común para el control de la corrosión en superficies metálicas. En particular, el Borurado es un tratamiento de endurecimiento que se destaca por mejorar las propiedades mecánicas de las superficies ferrosas incrementando su resistencia al desgaste y por lo tanto su tiempo de vida útil. Este tratamiento consiste en incorporar átomos de boro a la superficie del material, a través del proceso de difusión térmica, formando principalmente capas $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$. Debido a su amplio uso, se ha estudiado ampliamente (desde el punto de vista experimental) la eficiencia del proceso de Borurado con respecto a las condiciones de temperatura y su efecto en el espesor de las capas de $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$ formadas, destacando el efecto de dicha variable sobre el proceso (Tavakoli et al., 2015; Erarslan et al., 2023). Se ha encontrado que el espesor de las capas formadas tiene una relación directa con las propiedades superficiales resultantes en el material.

La eficiencia del tratamiento de Borurado radica en la difusión de los átomos de boro en los espacios intersticiales de la superficie metálica generados por el efecto de la temperatura, formando capas de $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$, esta ultima en cantidades casi imperceptibles (Pomel'nikova, et al., 2011; Bartkowska et al., 2018, Sesen y Özgen, 2014). El proceso de difusión se ha estudiado principalmente desde un punto de vista cinético, a través del desarrollo de modelos que describen la formación de $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$ y las variables que afectan la velocidad de crecimiento y espesor de la

capa (Campos et al., 2007; Delai et al., 2021; Campos-Silva et al., 2011; Keddam y Kulka, 2018). Campos et al. (2007) reportaron que la cinética de crecimiento de las capas de boro formadas depende del potencial del boro, tiempo y temperatura del tratamiento termoquímico. Delai et al. (2021) desarrollaron un modelo cinético basado en los perfiles de concentración de boro y una ley crecimiento parabólico, que logra reproducir la formación de ambas capas $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$. Keddam y Kulka (2018) desarrollaron un modelo de difusión basado en el método integral, en el cual se consideró el efecto del tiempo de incubación de la capa total de boro, presentando buena concordancia entre los resultados experimentales y los del modelo.

Diversos modelos para describir la cinética de la formación de capas $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$ basados en la segunda ley de Fick se han desarrollado, logrando describir la formación de dichos recubrimientos con una certidumbre confiable respecto a lo observado experimentalmente (Mebareket al., 2015; Ortíz-Domínguez et al., 2022). Los modelos anteriores tienden a ser representativos y no predictivos, debido a la falta de información sobre el mecanismo de difusión. En este sentido, las técnicas de simulación molecular son una herramienta capaz de elucidar mecanismos y procesos microscópicos para describir un fenómeno. Con respecto de la difusión de boro en superficies metálicas, la simulación molecular no se ha utilizado ampliamente. Arkundato et al. (2019) realizaron cálculos de dinámica molecular (DM) para determinar la dependencia de los coeficientes de difusión con respecto de la temperatura del acero, boro y un sistema boro-acero, utilizando los modelos de Lennard-Jones, regla de Lorentz y regla de Berthelot; con el objetivo de generar información útil para su aplicación en reactores nucleares. Los autores encontraron ecuaciones representativas, sin embargo, no validaron los modelos con datos experimentales.

La simulación de dinámica molecular es una técnica computacional poderosa para estudiar, a nivel molecular, el mecanismo de los fenómenos, en este caso la difusión. Por lo tanto, en el presente trabajo se utilizó la técnica de DM para describir el mecanismo de difusión de boro en superficies ferrosas, para su aplicación como método de control de la corrosión y desarrollo de nuevos materiales.

TEORÍA

Borurado.

El termino borurado se entiende como el enriquecimiento de la superficie de un material con boro a través de un tratamiento termoquímico (Campos-Silva y Rodríguez Castro, 2015). El tratamiento consiste en la transferencia de átomos de boro por medio de energía térmica a la red del material original, es decir, se presenta una difusión intersticial de los átomos de boro en la red estructural de la superficie metálica (ver Figura 1). El tratamiento se lleva a cabo a temperaturas mayores a 1000K, con la finalidad de generar espacios intersticiales en la estructura metálica, en los cuales el boro será difundido (tal como se muestra en la Figura 1) formando capas de $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$, presentando una red rómbica, tetragonal y rómbica, respectivamente.

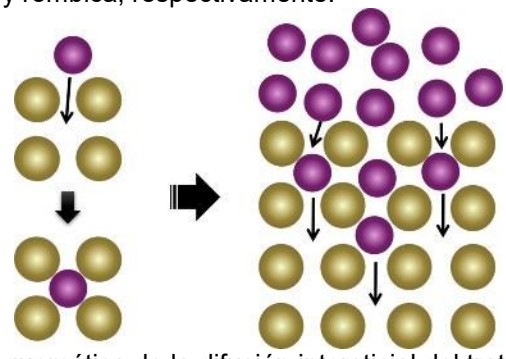


Figura 1. Representación esquemática de la difusión intersticial del tratamiento de borurado.

Dinámica Molecular.

La simulación molecular tiene por objetivo predecir el comportamiento de sistemas reales con base en sistemas modelo, generalmente para estudiar condiciones que un experimento no puede abordar. En simulación molecular existen diversas técnicas, las más utilizadas para estudiar propiedades sistemas son Monte Carlo (MC) y Dinámica Molecular (DM). DM, es un método determinista que se basa en resolver las ecuaciones de movimiento de Newton para el sistema de estudio (Frenkel, 2002).

La dinámica molecular es una técnica que permite obtener información de la trayectoria y propiedades de transporte de macromoléculas. La meta de esta técnica es calcular propiedades de un sistema en equilibrio. La simulación inicia con los componentes del sistema colocados en una caja de simulación con una posición inicial determinada y una velocidad, se calcula la energía potencial (es el producto de las fuerzas que actúan sobre cada átomo debido a los vecinos que lo rodean); posteriormente, se resuelves las ecuaciones de movimiento de Newton para calcular la aceleración de los átomos y la predicción de nuevas coordenadas para cada uno de ellos. Este proceso se repite para simular la trayectoria de cada átomo que compone el sistema y describe la configuración del sistema. El desarrollo de cálculos de dinámica molecular puede resumirse en tres etapas: inicialización, equilibrio del sistema, y descripción del sistema, tal como se describe en la Figura 2.

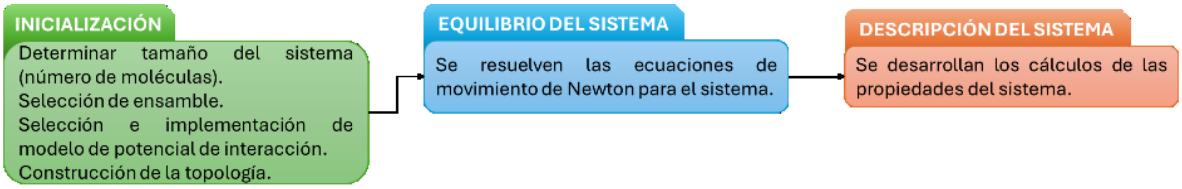


Figura 2. Etapas para el desarrollo de cálculos de dinámica molecular.

MÉTODOS

Se desarrollaron cálculos de dinámica molecular con base en el procedimiento descrito en la Figura 2. Para la etapa de inicialización se construyo un sistema constituido por una estructura de hierro con modelo cristalino Fe110 rodeado por partículas de boro. La estructura de hierro se generó utilizando el programa de visualización y construcción molecular AVOGADRO (Avogadro, 2022) con dimensiones de $\mathbf{30}$ Å en dirección x, y y z (ver Figura 3). La estructura se colocó en el centro de una caja cubica rodeada por vacío y con condiciones de frontera en las 3 direcciones. Se utilizó un campo de fuerza CHARMM. La topología del sistema se obtuvo utilizando la herramienta charmm-gui (Jo et al., 2008). Posteriormente se colocaron las partículas de boro, ubicadas aleatoriamente en la caja de simulación. Se utilizó el generador de topología automatizado ATB (Malde et al., 2011; Stroet et al., 2018) como apoyo para la construcción de la topología del boro.

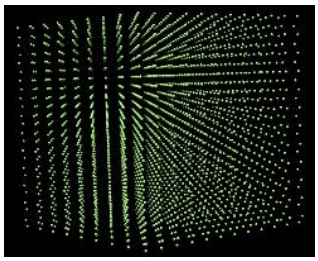


Figura 3. Estructura de hierro con modelo Fe110.

Se realizaron los cálculos de dinámica molecular utilizando el paquete GROMACS (GROMACS, s.f.), el cual es un paquete computacional versátil de código abierto (licencia libre) para desarrollar cálculos de dinámica molecular, todo el paquete GROMACS está disponible bajo la licencia Licencia

Pública General Reducida (Lesser General Public License – LGPL) de GNU, versión 2.1. GROMACS simula las ecuaciones de movimiento de Newton para sistemas de diverso tamaño, desde cientos hasta millones de partículas. Originalmente fue desarrollado para describir moléculas bioquímicas, sin embargo, su aplicación se ha extendido a diversas áreas y disciplinas, como polímeros, moléculas de origen químico, entre otras.

La simulación de los sistemas de estudio se realizó siguiendo tres etapas, minimización de energía del sistema, con aproximadamente $5X10^3$ pasos de simulación, llevar el sistema al equilibrio, con aproximadamente $1X10^6$ pasos de simulación y finalmente el cálculo de propiedades con $5X10^6$ pasos de simulación (15 ns).

RESULTADOS

Se construyó el modelo para describir el mecanismo de difusión del boro en los espacios intersticiales de la estructura metálica, con el objetivo de representar el tratamiento termoquímico del borurado y predecir el efecto de la variable temperatura sobre la eficiencia del tratamiento. El sistema de estudio está constituido por una estructura de hierro (Fe) con modelo cristalino 110 (ver Figura 3), cuya interacción se describió por el campo de fuerza CHARMM. Se desarrollaron los scripts con la topología de los componentes del sistema (extensión .top), posiciones iniciales de todas las moléculas del sistema con sus datos respectivos (extensión .gro), condiciones de simulación (extensión .mdp) donde se especificó que las partículas de Fe no cambian de posición a través de restricciones, termostato utilizado, etc. (ver figura 4).

```
define                  = -DPOSRES -DPOSRES_FC_BB=400.0
integrator              = md
dt                      = 0.001
nsteps                  = 125000
```

Figura 4. Ejemplo de script de modelo de difusión (archivo .mdp).

El modelo se implementó en el paquete GROMACS y se desarrollaron cálculos de simulación para tres temperaturas: 25°C, 100°C y 200°C. Para todos los casos de estudio, se colocó la estructura metálica en el centro de la caja de simulación, rodeada de partículas de boro, tal como se muestra en la Figura 5. En los tres casos se observó la formación de capas $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$ (ver Figura 6 y Figura 7).

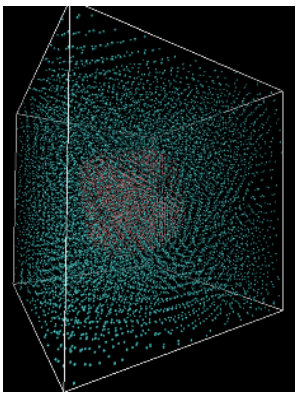


Figura 5. Imagen instantánea de caja de simulación del sistema Fe + B. Las partículas en color rosa corresponden a la estructura metálica y las partículas color verde a boro.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos para la temperatura de 25°C. En los apartados a) y b) se muestran imágenes instantáneas de las cajas de simulación, como puede observarse, las partículas de la estructura metálica conservan su posición. En el acercamiento (Figura 6b) se observa la formación de enlaces de Fe con B en la parte superficial de la estructura metálica, estas formaciones se presentan hacia el centro del solido formando capas de espesor no homogéneo, es

decir, quedan intercaladas las formaciones $\boldsymbol{FeB}$ con $\boldsymbol{Fe_2B}$ o $\boldsymbol{Fe_3B}$. Los apartados c, d y e de la Figura 6 muestran formaciones $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$ respectivamente.

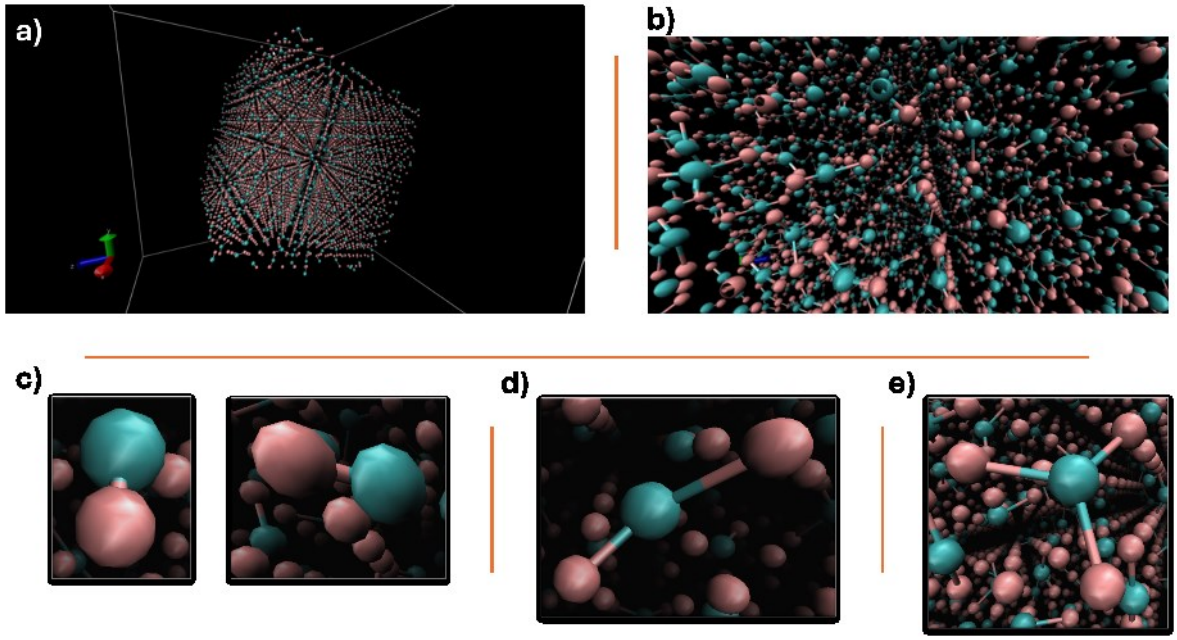


Figura 6. a) Imagen instantánea de estructura metálica con formación de capas $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$ a $\boldsymbol{T = 25°C}$. b) Acercamiento de caja de simulación. c) Formación de $\boldsymbol{FeB}$. d) Formación $\boldsymbol{Fe_2B}$. e) Formación $\boldsymbol{Fe_3B}$.

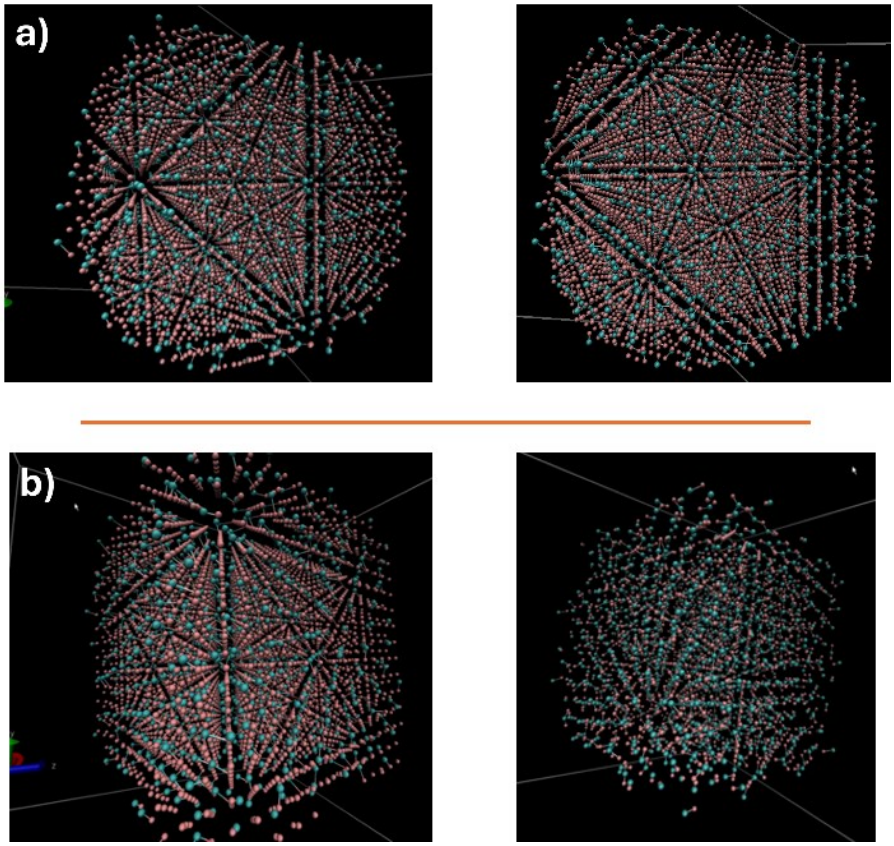


Figura 7. Imagen instantánea de caja de simulación con formación de capas $\boldsymbol{FeB}$, $\boldsymbol{Fe_2B}$ y $\boldsymbol{Fe_3B}$ a: a) $\boldsymbol{T = 100°C}$, b) $\boldsymbol{T = 200°C}$.

De acuerdo con micrografías de superficies metálicas tratadas con la técnica de borurado, la formación de capas $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$ es la que se presenta en mayor medida y cerca de la superficie (Bartkowska, 2018), este fenómeno se observa en los resultados de simulación (Figuras 6 y 7), por lo tanto, se validó la funcionalidad del modelo del mecanismo de difusión desarrollado. La formación de $\boldsymbol{Fe_3B}$ se ha observado mediante la técnica de difracción de rayos X con un tratamiento de calentamiento como una fase de no equilibrio (Bartkowska, 2018). Los resultados de simulación muestran la formación de $\boldsymbol{Fe_3B}$ en un estado de equilibrio, estas formaciones se encuentran distribuidas en diversas zonas de la superficie metálica.

La Figura 7 muestra los resultados de simulación para las temperaturas de 100°C (Figura 7a) y 200°C (Figura 7b). En ambos casos se observa que las restricciones de posición definidas en el modelo funcionan adecuadamente. Los resultados demuestran que a mayor temperatura se generan más espacios intersticiales y, por lo tanto, se enriquece el proceso de difusión de las partículas de boro hacia la superficie metálica.

CONCLUSIONES

Se desarrollo e implemento a la técnica de dinámica molecular un modelo para describir la difusión de boro sobre una superficie ferrosa en el paquete GROMACS. Se realizo un estudio computacional del mecanismo de difusión para tres casos de estudio a tres temperaturas 25°C, 100°C y 200°C. Los resultados de simulación validaron la capacidad del modelo para representar y predecir el mecanismo de difusión. Se presentó la formación de capas $\boldsymbol{FeB}$ y $\boldsymbol{Fe_2B}$, así mismo, se reporta la formación de $\boldsymbol{Fe_3B}$ en un sistema en equilibrio, compuesto que solo se observa mediante la técnica de rayos X y que no se ha demostrado experimentalmente en una zona de equilibrio.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Arkundato, M. Hasan, E. Purwndari, A. Pramutadi, F. Aziz, “Temperature dependence difusión coefficientas ofi ron, boron and iron-boron alculated by molecular dynamics method”, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1170, 2019, pp. 012008.
2. A. Bartkowska, D. Datkowski, R. Seadzba, D. Przestacki, A. Miklaszewski, “Microstructure, chemical composition, wear, and corrosión resistance of FeB-Fe2B-Fe3B surface layers produced on vanadis-6 steel using CO2 laser”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 95, 2018, pp. 1763.
3. A.K. Malde, L. Zuo, M. Breeze, M. Stroet, D. Poger, P.C. Nair, C. Oostenbrink, A.E. Mark, “An Automated force field Topology Builder (ATB) and repository: version 1.0”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 7, 12, 2011, pp. 4026.
4. A.S. Pomel’nikova, M.N. Shipko, M.A. Stepovich, “Features of structural changes due to the formation of the boride crystal structure in steels”, J. Surf. Inv. X-ray, Neu. Tech., Vol. 5, 2, 2010, pp. 298.
5. Avogadro: an open-source molecular builder and visualization tool. Version 1.97.0. http://avogadro.cc/
6. B. Mebarek, D. Madouri, A. Zanoun, A. Belaidi, “Simulation model of monolayer growth kinetics of Fe2B pase”, Matériaux & Techniques, Vol. 103, 7, 2015, pp. 703.
7. D. Frenkel, B. Smit, “Understanding Molecular simulation. Computational Science Series” (Academic Press, New York, 2001) pp 63.
8. F.E. Sesen, O.S. Özgen, “A study on electrothermochemical boronizing of an if steel”, Sigma J. Eng. Nat. Sci. Vol. 32, 3, 2014, pp. 334.
9. GROMACS, s.f., recuperado de https://doi.org/10.5281/zenodo.11148638.
10. H. Tavakoli, S.M. Mousavi-Khoie, F. Rasooli, S.P.H. Marashi, F. Momeni, “Electrochemical and physical characteristics of the steel treated by plasma-electrolysis boronizing”, Surf. Coat. Tech. Vol. 276, 2015, pp. 529.
11. I. Campos, G. Ramírez, U. Figueroa, J. Martínez, O. Morales, “Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe_2B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels”, App. Surf. Sci., Vol. 253, 7, 2007, pp. 3469.
12. I. Campos-Silva, M. Ortíz-Domínguez, H. Cimenoglu, R. Escobar-Galindo, M. Keddam, M.E. Elías-Espinosa, N. López-Perrusquia, “Diffusion model for growth of Fe_2B layer in pure iron, Surf. Eng., Vol. 27, 3, 2011, pp. 189.
13. I.E. Campos-Silva, G.A. Rodríguez Castro, “Boriding to improve the mechanical properties and corrosión resistance of steels” in Thermochemical Surface Engineering of Steels (Woodhead Publishing, 2015) Chapter 18, pp. 651.
14. M. Keddam, M. Kulka, “Simulation of the growth kinetics of FeB and Fe_2B layers on AISI D2 steel by the integral method”, Phys. Metals Metall, Vol. 119, 9, 2018, pp. 842.
15. M. Ortiz-Domínguez, A. Cruz-Avilés, I. Morgado-González, J.M. Farfán-García, J. Hernández-Pérez, J.D. Cruz-Bustamante, “Tratamientos termoquímicos”, Ingenio y conciencia boletín científico de la escuela superior Ciudad Sahagún, Vol. 7, 14, 2020, pp. 17.
16. M. Stroet, B. Caron, K. Visscher, D. Geerke, A.K. Malde A.E. Mark, “Automated Topology Builder version 3.0: Prediction of solvation free enthalpies in water and hexane”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 14, 11, 2018, pp. 5834.
17. NACE International Impact, “International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study”, 2016, Editorial NACE International.
18. O. Delai, C. Xia, L. Shiqiang, “Growth kinetics of the FeB/ Fe_2B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling”, J. Mat. Res. Tech., Vol. 11, 2021, pp. 1272.
19. R. Erarslan, U. Öztürk, F. Yilmaz, “Coating of AISI 1018 steel with the pack-boriding method”, J. New Results Sci., Vol. 12, 1, 2023, pp. 14.
20. S. Jo, T. Kim, V.G. Iyer, W. Im, “GHARMM-GUI: A web-based graphical user interface for CHARMM”, J. Comput. Chem., Vol. 29, 2008, pp. 1859.

PROTOTIPO NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL EPOC A TRÁVES DEL ALIENTO

Francisco Jacob Ávila Camacho[1], Adolfo Meléndez Ramírez[1], Mónica Mariel Sánchez Cabrera[1] , Juan Manuel Stein Carrillo [1,]

[1]Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec.
fjacobavila@tese.edu.mx

RESUMEN

La Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) es una de las principales causas de mortalidad a nivel mundial, exacerbada por factores como el tabaquismo y la exposición a contaminantes. La detección temprana es crucial para el manejo efectivo de la enfermedad. Este estudio presenta el desarrollo de un prototipo de nariz electrónica diseñado para prediagnosticar EPOC a través del análisis del aliento exhalado por los pacientes. El dispositivo utiliza una combinación de sensores MQ-2, MQ-7, MQ-9 y MQ-135, integrados en un diseño ergonómico y portátil fabricado mediante impresión 3D. La detección se basa en algoritmos de clasificación basado en redes neuronales que procesan los datos de los sensores para identificar la presencia de compuestos volátiles asociados con EPOC. Las pruebas realizadas demostraron una alta precisión en la detección de estos compuestos, facilitando un diagnóstico rápido y no invasivo. Este avance promete mejorar significativamente la calidad de vida de los pacientes al permitir un monitoreo continuo y una intervención temprana en el manejo de la EPOC.

INTRODUCCIÓN

La Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) es una afección respiratoria crónica que afecta a millones de personas en todo el mundo, caracterizada por una obstrucción del flujo de aire en los pulmones (Pazos, 2009). La detección temprana y el monitoreo continuo son fundamentales para la gestión efectiva de esta enfermedad, lo que destaca la necesidad de dispositivos innovadores y prácticos que faciliten el diagnóstico precoz y el seguimiento preciso de la salud respiratoria (FIRS, 2017). En este contexto, la nariz electrónica emerge como una herramienta prometedora para el prediagnóstico del EPOC, permitiendo la detección de compuestos específicos presentes en el aliento de los pacientes, los cuales pueden ser indicadores tempranos de la enfermedad (Campuzano-Maya, 2015; Pearce et al., 2003). La justificación de este enfoque radica en la necesidad de soluciones no invasivas y accesibles que puedan integrarse fácilmente en la práctica clínica diaria, superando las limitaciones de los métodos tradicionales, como la espirometría, que puede resultar incómoda y estresante para los pacientes (Esperanza Benítez-Pérez et al., 2016).

El desarrollo de dispositivos médicos efectivos va más allá de la tecnología subyacente, es crucial considerar la experiencia del usuario y la practicidad del dispositivo en su uso diario (Wilson & Baietto, 2011). La impresión 3D, con su capacidad para crear prototipos personalizados y ergonómicos, juega un papel clave en la fabricación de dispositivos ligeros, portátiles y fácilmente transportables, mejorando significativamente su utilidad y comodidad para los usuarios (Rossi et al., 2020).

Este trabajo se enfoca en el diseño y desarrollo de un prototipo de nariz electrónica con especial atención en la adaptación ergonómica para pacientes con EPOC. A lo largo de este estudio, se exploró el proceso de diseño del contenedor de aliento, destacando la importancia de considerar aspectos ergonómicos y las necesidades específicas de los usuarios, particularmente aquellos con EPOC. Además, se analizó la integración de los componentes clave de la nariz electrónica en este diseño, enfatizando la relevancia de la portabilidad y la accesibilidad en la efectividad del dispositivo como herramienta de prediagnóstico de la EPOC (Mikula et al., 2021; Pearce et al., 2003).

El diagnóstico de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) ha sido tradicionalmente dependiente de métodos como la espirometría, la cual mide la función pulmonar mediante la

evaluación del volumen y la velocidad del aire exhalado (Esperanza Benítez-Pérez et al., 2016). Aunque efectiva, la espirometría puede ser invasiva y estresante para los pacientes, especialmente aquellos en etapas avanzadas de la enfermedad (Motruk, 2018). Métodos complementarios incluyen radiografías de tórax, análisis de gases sanguíneos y tomografías computarizadas, los cuales, aunque útiles, requieren equipos costosos y acceso a instalaciones especializadas (Grupo de Trabajo de GesEPOC & Task Force of GesEPOC, 2012). En contraste, las tecnologías emergentes como la nariz electrónica ofrecen una alternativa prometedora. Un sistema de nariz electrónica utiliza sensores químicos y algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones específicos de compuestos volátiles en el aliento humano, relacionados con diversas condiciones de salud (Noorsal et al., 2006). Estudios recientes han demostrado la capacidad de estas tecnologías para detectar enfermedades como el cáncer de pulmón, la diabetes y diversas infecciones respiratorias (De Castro & Timmis, 2002; Wilson & Baietto, 2011).

En el ámbito de la EPOC, investigaciones previas han explorado el uso de sensores de gas para identificar biomarcadores específicos en el aliento exhalado (Borré Lara et al., 2016). Por ejemplo, el uso de sensores de óxido de zinc (ZnO) y dióxido de estaño (SnO_2) ha mostrado ser eficaz en la detección de compuestos como el monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles, que son indicadores potenciales de inflamación y daño pulmonar (Martínez-Pacheco et al., 2023). Además, las redes neuronales artificiales (ANNs) han sido implementadas con éxito para el análisis y clasificación de datos de sensores, mejorando la precisión y la velocidad del diagnóstico (Sarmiento-Ramos, 2020).

La presente investigación se basa en estos avances, integrando una combinación de sensores MQ-2, MQ-7, MQ-9 y MQ-135 en un dispositivo portátil y ergonómico, fabricado mediante impresión 3D. Esta integración no solo optimiza la detección de compuestos específicos en el aliento, sino que también mejora la usabilidad del dispositivo en entornos clínicos y de investigación. La elección de estos sensores se fundamenta en su capacidad para detectar una amplia gama de gases relevantes para el diagnóstico de EPOC, tales como monóxido de carbono, dióxido de carbono, amoníaco y varios hidrocarburos. Este trabajo busca avanzar el estado del arte en el diagnóstico temprano de la EPOC mediante el desarrollo de una nariz electrónica eficiente, precisa y accesible, superando las limitaciones de las tecnologías actuales y mejorando la calidad de vida de los pacientes.

TEORÍA

El desarrollo de una nariz electrónica para la detección de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) combina avanzados sensores químicos, procesamiento de señales y técnicas de aprendizaje automático para crear un dispositivo eficaz y no invasivo. Este enfoque innovador tiene el potencial de transformar el diagnóstico y manejo de la EPOC, proporcionando una herramienta valiosa para la detección temprana y el seguimiento continuo de esta enfermedad (Borré Lara et al., 2016).

Sensores Químicos

Los sensores químicos utilizados en la nariz electrónica son dispositivos que detectan la presencia de gases específicos mediante la variación de su resistencia eléctrica cuando entran en contacto con estos compuestos (Martínez-Pacheco et al., 2023). Cada sensor está diseñado para ser sensible a ciertos gases, lo que permite una detección selectiva y precisa. A continuación, se describen los sensores empleados en este proyecto:

- **Sensor MQ-2**: Detecta gases como el GLP (Gas Licuado de Petróleo), metano, alcohol, hidrógeno, humo y propano. Es útil para identificar la presencia de combustibles y vapores inflamables.
- **Sensor MQ-7**: Altamente sensible al monóxido de carbono (CO), un gas asociado con la exposición al humo del tabaco, uno de los factores de riesgo principales para la EPOC.

- **Sensor MQ-9**: Detecta monóxido de carbono y gases combustibles como el metano y el GLP. Su capacidad para detectar múltiples gases lo hace esencial para un diagnóstico más completo.
- **Sensor MQ-135**: Sensible a amoníaco, óxidos de nitrógeno, alcohol, benceno, dióxido de carbono y humo. Estos compuestos son relevantes para el diagnóstico de EPOC debido a su relación con la inflamación y el daño pulmonar.

Funcionamiento de los Sensores
Cuando el aliento del paciente, que contiene una mezcla de gases, entra en contacto con los sensores, estos reaccionan cambiando su resistencia eléctrica (Dirinck et al., 2009). Esta variación se convierte en una señal eléctrica que puede ser medida y registrada. El tiempo de precalentamiento es crucial para estabilizar los sensores y asegurar la precisión de las lecturas. Por ejemplo, el sensor MQ-7 requiere un precalentamiento de al menos 48 horas para alcanzar una estabilidad óptima.

Procesamiento de Señales
Las señales eléctricas generadas por los sensores son procesadas mediante una unidad de procesamiento, en este caso, una Raspberry Pi. La Raspberry Pi recopila los datos de los sensores y los prepara para el análisis. Este procesamiento incluye la normalización de los datos para minimizar las variaciones debido a factores externos como la temperatura y la humedad.

Redes Neuronales Artificiales (ANNs)
Las ANNs son modelos computacionales inspirados en el cerebro humano, capaces de reconocer patrones complejos y realizar clasificaciones precisas (Carpenter et al., 1992). En el contexto de la nariz electrónica, las ANNs se entrenan utilizando conjuntos de datos de las lecturas de los sensores para aprender a distinguir entre aliento de pacientes con EPOC y aliento de individuos sanos (Gutierrez-osuna & Nagle, 1999).

El entrenamiento de la red neuronal implica alimentar al modelo con datos etiquetados, donde se conoce la presencia o ausencia de EPOC. A través de múltiples iteraciones, la ANN ajusta sus parámetros internos para minimizar el error en la clasificación (AvilaCamacho FJacob, SteinCarrillo JuanManuel, 2013). Una vez entrenada, la ANN puede recibir nuevas lecturas de sensores y clasificar el aliento del paciente en tiempo real, indicando con una precisión binaria (0 para ausencia de EPOC y 1 para presencia de EPOC) la posible existencia de la enfermedad.

Ventajas del Enfoque
La combinación de sensores químicos y redes neuronales ofrece varias ventajas:

- **Precisión**: La ANN mejora la precisión de la clasificación al considerar patrones complejos en los datos de los sensores (Agatonovic-Kustrin & Beresford, 2000).
- **Rapidez**: El procesamiento y análisis en tiempo real permiten un diagnóstico rápido.
- **No invasivo**: La nariz electrónica proporciona una alternativa cómoda y no invasiva a los métodos tradicionales de diagnóstico.

En conjunto, la selección cuidadosa de los sensores y su integración en un sistema de procesamiento avanzado con redes neuronales contribuye significativamente a la capacidad del dispositivo para detectar la EPOC de manera rápida y efectiva. Este enfoque no solo facilita el diagnóstico temprano, sino que también permite un monitoreo continuo, mejorando así el manejo de la enfermedad y la calidad de vida de los pacientes (Rivera et al., 2019).

PARTE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

Diseño del Case para el Contenedor de Aliento
El diseño del case para la nariz electrónica se centró en crear un contenedor ergonómico y eficiente para el aliento de los pacientes. Se evaluaron varias propuestas, seleccionando finalmente un diseño hexagonal que permitiera una disposición eficiente del cableado, la pantalla, la Raspberry Pi y otros

componentes electrónicos en su interior. El contenedor de aliento se ubicó en la parte superior del case, integrando un ventilador para la limpieza del aire entre pruebas, lo que contribuye a la precisión de las lecturas.

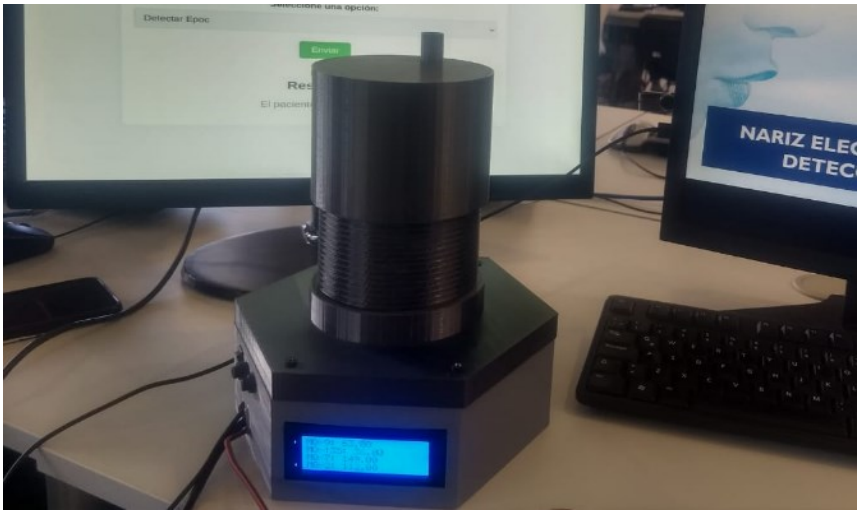


Figura 1. Dispositivo de nariz electrónica construido con impresión 3D

Sensores Utilizados

La nariz electrónica empleó una combinación de sensores MQ-2, MQ-7, MQ-9 y MQ-135, seleccionados por su capacidad para detectar compuestos relevantes en el aliento de los pacientes. En la tabla 1 se detallan las características y aplicaciones de cada sensor.

Tabla 1. Características y aplicaciones de los sensores utilizados en el prototipo

Característica	Sensor MQ-2	Sensor MQ-7	Sensor MQ-9	Sensor MQ-135
Aplicaciones	GLP, Metano, Alcohol, Humo Hidrógeno, Propano	Monóxido de Carbono (CO)	Monóxido de Carbono (CO) GLP, Metano	Amoníaco, Benceno Alcohol, Dióxido de Carbono (CO2)
Tiempo de Precalentamiento	Más de 24 horas	No menos de 48 horas	No menos de 48 horas	Más de 24 horas

Cada sensor desempeña un papel crucial en la detección temprana de la EPOC. Por ejemplo, el sensor MQ-7 es especialmente sensible al monóxido de carbono (CO), un gas comúnmente asociado con la exposición al humo del tabaco, un importante factor de riesgo para el desarrollo de la EPOC. El sensor MQ-9, por otro lado, es sensible a varios gases, incluido el CO, que también pueden estar presentes en el aliento de pacientes con EPOC debido a la inflamación de las vías respiratorias.

Importancia del Precalentamiento y Calibración

Antes de realizar las lecturas, se llevó a cabo un proceso de precalentamiento y calibración de los sensores. Este paso es crucial para estabilizar el funcionamiento de los sensores y garantizar mediciones precisas y consistentes a lo largo del tiempo.

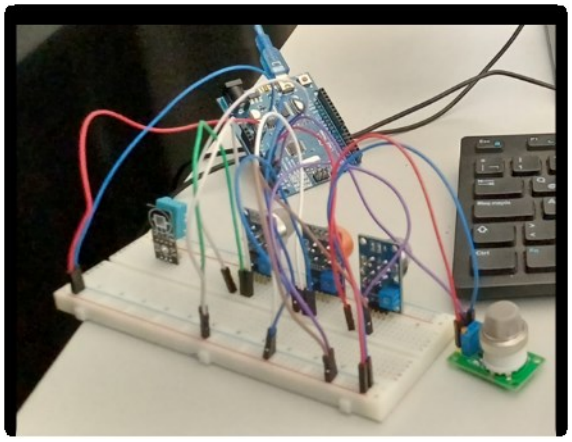


Figura 2. Conexión en Arduino para el precalentamiento y calibración de sensores

Lecturas de los Sensores
Una vez completado el proceso de precalentamiento y calibración, se realizaron las lecturas de los sensores. Cada sensor proporcionó datos sobre la concentración de los compuestos específicos presentes en el aliento de los pacientes, los cuales fueron registrados y procesados por la Raspberry Pi.

Figura 3. Pantalla LCD en el prototipo que muestra la lectura de los sensores

Utilización de la Raspberry para el Entrenamiento de las Lecturas de los Sensores
La Raspberry Pi fue utilizada para el entrenamiento de un modelo de red neuronal. Se empleó una matriz de lecturas de los sensores como entrada para la red neuronal, diseñada para clasificar las lecturas en dos categorías: 0 para indicar que no se detecta EPOC y 1 para indicar que se detecta EPOC. Esta clasificación binaria permite una evaluación rápida y precisa de la presencia de la enfermedad basada en las lecturas de los sensores.

Operación del Dispositivo

- **Recolección de Muestra de Aliento**: El paciente exhala en el cilindro superior del dispositivo, donde el aliento se concentra y se analiza por la matriz de sensores.
- **Análisis de Datos**: Los sensores químicos detectan la presencia de compuestos volátiles en el aliento. Los datos recopilados se procesan por la unidad de procesamiento de señales y se analizan utilizando algoritmos de clasificación basados en Redes Neuronales Artificiales (ANNs).

- **Presentación de Resultados**: El sistema presenta un resultado binario en la pantalla: uno indica la presencia de EPOC, mientras que cero indica su ausencia.
- **Limpieza del Aire**: Entre pruebas, se activa el ventilador en el contenedor de aliento para limpiar el aire residual y preparar el dispositivo para la siguiente muestra.

Importancia del Prototipo

El prototipo de nariz electrónica desarrollado en este proyecto representa una herramienta innovadora y eficiente para el prediagnóstico de la EPOC. Su diseño hexagonal y la inclusión de una matriz de sensores precisos, junto con un contenedor de aliento optimizado, garantizan mediciones confiables y repetibles. Además, el enfoque no invasivo del dispositivo mejora significativamente la comodidad del paciente, facilitando un monitoreo continuo y una detección temprana de la enfermedad. Este avance tecnológico tiene el potencial de transformar las prácticas de diagnóstico de la EPOC, ofreciendo una alternativa rápida y accesible a los métodos tradicionales. El sistema de sensores, compuesto por los modelos MQ-2, MQ-7, MQ-9 y MQ-135, es fundamental para el correcto funcionamiento del dispositivo, proporcionando una respuesta binaria clara y fácil de interpretar que facilita el diagnóstico temprano y efectivo de la EPOC.

La integración de algoritmos de clasificación basados en redes neuronales añade una capa adicional de precisión y fiabilidad a las lecturas de los sensores, mejorando así la capacidad del dispositivo para detectar la presencia de la enfermedad de manera rápida y precisa. La inclusión de un sistema de limpieza del aire entre pruebas garantiza la integridad de los resultados y la eficacia del dispositivo en entornos clínicos y de investigación. En conjunto, este prototipo representa un avance significativo en la detección temprana y el monitoreo de la EPOC, con el potencial de mejorar la calidad de vida de los pacientes y reducir la carga económica asociada a esta enfermedad.

RESULTADOS

Eficiencia en la Detección

La nariz electrónica demostró una alta eficiencia en la detección de compuestos volátiles presentes en el aliento de los pacientes, los cuales pueden ser indicadores tempranos de la EPOC. La combinación de sensores MQ-2, MQ-7, MQ-9 y MQ-135 permitió una detección precisa y confiable de estos compuestos, contribuyendo así a la identificación temprana de la enfermedad.

Figura 4. Prototipo de nariz electrónica finalizado y en operación

Precisión en los Resultados

Los algoritmos de clasificación basados en Redes Neuronales Artificiales (ANNs) entrenados con las lecturas de los sensores proporcionaron una clasificación binaria precisa de los resultados. Esta precisión en la presentación de los resultados en la pantalla de la nariz electrónica facilitó la interpretación y el diagnóstico rápido por parte de los profesionales de la salud.

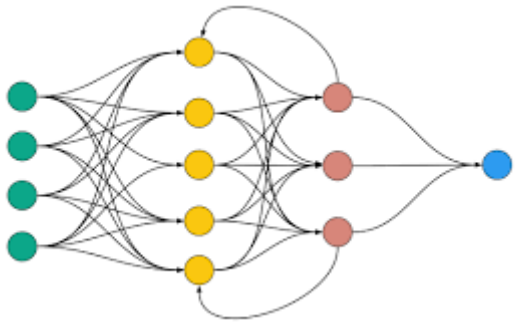


Figura 5. Arquitectura de la red neuronal para la clasificación binaria

Comodidad y Facilidad de Uso
El diseño ergonómico del case, junto con la integración de componentes ligeros y portátiles, garantizó la comodidad y la facilidad de uso tanto para los pacientes como para los profesionales de la salud. Además, el enfoque no invasivo del dispositivo mejoró la aceptación por parte de los pacientes, promoviendo así un monitoreo continuo de su salud respiratoria.

Limpieza y Mantenimiento
El sistema de limpieza del aire entre pruebas, activado por el ventilador en el contenedor de aliento, garantizó la integridad de los resultados y la eficacia del dispositivo en entornos clínicos y de investigación. Este proceso de limpieza automático también contribuyó a la durabilidad y la longevidad del dispositivo.

CONCLUSIONES

Eficiencia Diagnóstica
La nariz electrónica ha demostrado una eficacia significativa en la detección de compuestos volátiles en el aliento, lo que la convierte en una herramienta prometedora para el prediagnóstico de la EPOC. La combinación de sensores y algoritmos de clasificación ha permitido una identificación precisa de los patrones respiratorios asociados con la enfermedad.

Facilidad de Uso y Comodidad para el Paciente
El diseño ergonómico del dispositivo, junto con su enfoque no invasivo, garantiza la comodidad y la aceptación por parte de los pacientes. Esta característica es crucial para promover un monitoreo continuo de la salud respiratoria, especialmente en pacientes con EPOC que pueden requerir evaluaciones frecuentes.

Portabilidad y Adaptabilidad
La impresión en 3D del case y la integración de componentes livianos hacen que la nariz electrónica sea fácilmente transportable y adaptable a diferentes entornos clínicos o de atención médica domiciliaria. Esta portabilidad mejora la accesibilidad y la disponibilidad de la tecnología para una amplia gama de pacientes.

Fiabilidad y Mantenimiento
La inclusión de un sistema de limpieza automático entre pruebas asegura la integridad de los resultados y prolonga la vida útil del dispositivo. Además, el proceso de precalentamiento y

calibración de los sensores garantiza mediciones precisas y confiables en todo momento, lo que es crucial para la fiabilidad del diagnóstico.

Potencial de Impacto en la Atención Médica

La nariz electrónica representa una innovación significativa en el campo del diagnóstico y monitoreo de la EPOC. Su capacidad para proporcionar resultados rápidos, precisos y no invasivos tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de los pacientes al permitir un manejo más efectivo de la enfermedad y una intervención temprana en su progresión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 22(5), 717–727. https://doi.org/10.1016/S0731-7085(99)00272-1
2. AvilaCamacho FJacob, SteinCarrillo JuanManuel, M. A. (2013). Implementación de una Nariz Electrónica para la Detección de Materia Orgánica en Desechos de basura. 2o Congreso Sobre Tecnologias de La Información, 1(1), 102.
3. Borré Lara, J. A., Durán Acevedo, C. M., & Gualdron Guerrero, O. E. (2016). Mecanismos y procedimientos aplicados al análisis del aliento para diagnóstico de diferentes enfermedades utilizando métodos multisensoriales. BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS, 14(1), 99. https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2016.1940
4. Campuzano-Maya, G. (2015). Las pruebas de aliento con isótopos marcados con carbono 13: una nueva herramienta de diagnóstico, costo-eficiente y con seguridad para el paciente. Medicina y Laboratorio, 21(9–10). https://doi.org/10.36384/01232576.137
5. Carpenter, G. a, Grossberg, S., Markuzon, N., Reynolds, J. H., & Rosen, D. B. (1992). Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. In IEEE transactions on neural networks / a publication of the IEEE Neural Networks Council (Vol. 3, Issue 5, pp. 698–713). https://doi.org/10.1109/72.159059
6. De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). Artificial Immune Systems : A Novel Approach to Pattern Recognition. In L. A. J Corchado & C. Fyfe (Eds.), Artificial Neural networks in pattern Recognition (pp. 67–84). University of Paisley. http://eprints.whiterose.ac.uk/69719/
7. Dirinck, I., Van Leuven, I., & Dirinck, P. (2009). Hyphenated electronic nose techniques for aroma analysis of foods and beverages. LCGC Europe, 22(10), 525–531.
8. Esperanza Benítez-Pérez, R., Torre-Bouscoulet, L., Villca-Alá, N., Francisco Del-Río-Hidalgo, R., Pérez-Padilla, R., Carlos Vázquez-García, J., Silva-Cerón, M., Cid-Juárez, S., & Gochicoa-Rangel, L. (2016). Espirometría: recomendaciones y procedimiento. Revisión Neumol Cir Torax, 75(2). www.medigraphic.org.mx
9. FIRS. (2017). Foro de las Sociedades Respiratorias Internacionales El impacto mundial de la Enfermedad Respiratoria. In El impacto global de la Enfermedad Respiratoria – Segunda edición.
10. Grupo de Trabajo de GesEPOC, & Task Force of GesEPOC. (2012). Guía de Práctica Clínica para el Diagnóstico y Tratamiento de Pacientes con Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) - Guía Española de la EPOC (GesEPOC). Archivos de Bronconeumología, 48, 2–58. https://doi.org/10.1016/S0300-2896(12)70035-2
11. Gutierrez-osuna, R., & Nagle, H. T. (1999). A Method for Evaluating Data-Preprocessing Techniques for Odor Classification with an Array of Gas Sensors. 29(5), 626–632.
12. Martínez-Pacheco, C., Del-Ángel-Meraz, E., & Díaz-Flores, L. L. (2023). Las nanoestructuras de ZnO y sus aplicaciones como sensor de gas H2S. CienciaUAT, 17(2), 24–36. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v17i2.1632
13. Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoł, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. Environmental Science and Pollution Research, 28(10), 12321–12333. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8

14. Motruk, D. (2018). GLOBAL INITIATIVE FOR CHRONIC OBSTRUCTIVE LUNG DISEASE. Medicine of Ukraine, 0(1(217)). https://doi.org/10.37987/1997-9894.2018.1(217).195220
15. Noorsal, E., Sidek, O., & Mohamad, J. (2006). Automated Odour Measurement in Electronic Nose System Using Microcontroller.
16. Pazos, R. (2009). Enfermedad Obstructiva Cronica (Epoc) Revisión Clínica Y Estudio de Campo. Asepeyo.
17. Pearce, T. C., Schiffman, S. S., Nagle, H. T., & Gardner, J. W. (2003). Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology. 3 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
18. Rivera, C. G., Rodríguez, B. S., & Aranda, S. S. (2019). Actualización de las guías clínicas en la EPOC. Revista de Patologias Respiratorias, 22.
19. Rossi, E., Di Nicolantonio, M., Barcarolo, P., & Lagatta, J. (2020). Sustainable 3D printing: Design opportunities and research perspectives. Advances in Intelligent Systems and Computing, 975, 3–15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_1/COVER
20. Sarmiento-Ramos, J. L. (2020). Aplicaciones de las redes neuronales y el deep learning a la ingeniería biomédica. Revista UIS Ingenierías, 19(4), 1–18. https://doi.org/10.18273/REVUIN.V19N4-2020001
21. Wilson, a. D., & Baietto, M. (2011). Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications. Sensors, 11(1), 1105–1176. https://doi.org/10.3390/s110101105

EVALUACIÓN REOLÓGICA DE ASFALTO MODIFICADO CON ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO FUNCIONALIZADO CON ANHÍDRIDO MALEICO (SBS-G-MA) Y DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

María de los Ángeles Vargas Hernández[1], Maricela Zapata Arroyo[2], Miguel Ángel Vargas[3], Humberto Vázquez Torres[4], Antonio Sánchez Solís[2] y Octavio Manero[2]

[1]TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, [2]Instituto de Investigaciones en Materiales -UNAM, [3]Facultad de Química-UNAM, [4]Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa
maria_vargas@tese.edu.mx

RESUMEN

El problema principal en la ingeniería de pavimentos es el pobre desempeño del asfalto base bajo condiciones de tráfico intenso o cambios severos de las condiciones climáticas. En la actualidad, existe una amplia variedad de modificadores de asfalto para mejorar su desempeño, por ejemplo: el caucho, resinas, polímeros con masa molecular grande, sales inorgánicas, etc. El uso de nanomateriales como modificadores de asfalto se ha convertido en un área de creciente interés, ya que se mejoran las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas a bajas y altas temperaturas como las registradas en invierno y verano. Las nanopartículas de óxido de grafeno (GO) representan un modificador potencial para asfaltos debido a la presencia de grupos funcionales con oxígeno adjuntos a su estructura aromática, lo que diversifica su comportamiento hidrofílico e hidrofóbico. Esto permite mejorar las interacciones y compatibilidad entre el asfalto, polímero y partículas de GO. A pesar de las ventajas que el GO aporta al asfalto base, existen muy pocos estudios que analizan el desempeño reológico de las mezclas de asfalto con polímeros del tipo estireno-butadieno-estireno-funcionalizado con anhídrido maleico (SBS-g-MA) y GO. Con este propósito, se prepararon mezclas de asfalto AC-20 con SBS-g-MA a una de concentración de 4 % en masa y diferentes concentraciones de GO (0.5, 1.0 y 1.5 % masa respecto al asfalto). Bajo las mismas condiciones de procesamiento (180 °C, 950 rpm y 4 horas de mezclado), se prepararon mezclas de asfalto/SBS/GO como referencia. El GO se obtuvo en el laboratorio por el método de Hummer, las muestras de asfalto se caracterizaron por pruebas oscilatorias de esfuerzo controlado y barrido de frecuencias (0.1-100 rad/s) a diferentes temperaturas de prueba (20, 40, 60, 75 y 100 °C) en un reómetro TA Instruments. El GO sintetizado se caracterizó por espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y Raman. Los resultados muestran que la presencia de GO y el grupo polar MA injertado en el polímero SBS aumentan la elasticidad, la viscosidad del material a temperaturas mayores a 60 °C en comparación al SBS/GO, además se reduce la susceptibilidad térmica, aumentando la resistencia a la deformación permanente por acanalamiento (rutting), por lo que este material (A/SBS-g-MA/GO) es adecuado para aplicaciones en regiones con clima caluroso. El efecto observado en los resultados podría deberse al aumento de las interacciones físicas entre los componentes de la mezcla. La cantidad requerida de óxido de grafeno para mejorar las propiedades reológicas del SBS-g-MA es menor (1.0 % masa) que la utilizada en el SBS (1.5 % masa).

INTRODUCCIÓN

Las variaciones de temperatura por el cambio climático, la mala calidad de los materiales utilizados en las carpetas asfálticas, el rápido envejecimiento del asfalto y el aumento del tráfico han motivado el desarrollo de nuevos materiales para pavimentos que presenten un mejor desempeño [1].

Parte de esta solución es la modificación del asfalto con polímeros, fibras, nanopartículas, cerámicos, etc. Los polímeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS) se utilizan ampliamente en pavimentos debido a sus excelentes propiedades, pero tienen importantes limitaciones: en los enlaces C=C y α-H de su cadena principal ocurren procesos de oxidación o envejecimiento en presencia de rayos UV, no son resistentes al calor, son poco económicos e incompatibles con algunos asfaltos, etc [2].

El polímero modificador SBS tiene una estructura lineal, que se caracteriza por dos bloques PS unidos a un bloque de PB [3]. Cuando se agrega el SBS al asfalto, éste se hincha absorbiendo los componentes ligeros de la matriz asfáltica (maltenos). Esto conduce a la formación de una red tridimensional que tiene un papel crucial en la resistencia a la deformación permanente (rutting) [4].

Además, entre los diversos nanomateriales utilizados como modificadores del asfalto, el óxido de grafeno (GO) es más activo en comparación con otros nanomodificadores debido a su similitud y compatibilidad con el asfalto [5]. El GO es el producto de la oxidación química y del decapado del polvo de grafito, que puede prepararse mediante el método de Hummer [6].El GO tiene una estructura aromática como cualquier otro derivado del grafeno y grupos funcionales como epoxi, carbonilo, hidroxilo, fenol, etc. [7]. Estos grupos activos hacen del GO un material anfifílico que posee compatibilidad tanto con los polímeros polares como con los no polares, esta característica mejora su capacidad para dispersarse en diferentes matrices, puede formar enlaces de hidrógeno con los componentes del asfalto a través de fuerzas de van der Waals y rápida absorción de estas moléculas [2,8].

Las interacciones físicas y químicas entre asfalto y GO se ven favorecidas por la elevada área superficial del GO (2600 m^2/g). Esto mejora el comportamiento reológico, resistencia a la deformación permanente, propiedades eléctricas y térmicas y reduce el envejecimiento oxidativo de las mezclas asfálticas [9]. El óxido de grafeno también se ha utilizado como aditivo en el asfalto modificado con SBS, el GO se incrusta en la cadena molecular del SBS durante el mezclado, lo que causa una reticulación física estable, sin reacción química, con las fracciones del asfalto [10]. Durante la preparación de la mezcla asfáltica se deben tener en cuenta algunas condiciones experimentales; como la cantidad de GO para evitar aglomeración y alta velocidad de agitación para lograr una dispersión uniforme de las partículas de GO [11].

Para mejorar la compatibilidad entre el SBS y GO se adiciona un agente compatibilizador polar como el anhídrido maleico (MA) al polímero [11,12]. El SBS funcionalizado (SBS-g-MA) se obtiene por la reacción entre el anhídrido maleico (MA) y el polímero. La reacción puede hacerse en solución, fundido, estado sólido, etc [5].

En este trabajo se modificó asfalto AC-20 con SBS o SBS-g-MA y diferentes concentraciones de GO (0.5, 1.0 y 1.5 % en masa respecto al asfalto). Los aditivos o modificadores se agregaron directamente al asfalto a una temperatura de 180 °C y 950 rpm. Se evaluó el efecto del GO sobre el asfalto/polímero mediante las pruebas de penetración, temperatura de ablandamiento y caracterización reológica en un intervalo de temperaturas de 25 °C a 100 °C y frecuencias de 0.1-100 rad/s. El GO se preparó por el método de Hummer y se caracterizó por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopia Raman.

TEORÍA

El análisis reológico es crucial para entender si un aditivo es eficiente para cambiar el punto de transición viscoelástico de líquido a sólido del asfalto. Los principales parámetros viscoelásticos que se obtienen son el módulo de corte complejo (G*) y el ángulo de fase (δ). El valor absoluto de G* (|G*|) contiene componentes elásticos y viscosos que se definen como módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G"), respectivamente:

$$G^*(\omega)=G'(\omega)+iG''(\omega) \quad (1)$$

G'(ω) es una medida de la energía elástica reversible, mientras que G”(ω) representa la disipación viscosa irreversible de la energía mecánica. La dependencia de estas funciones materiales con la frecuencia de oscilación da lugar al llamado espectro mecánico, que permite una caracterización reológica cuantitativa de los materiales estudiados.

Los dos módulos G' y G" están relacionados con el módulo complejo a través del ángulo de fase (o de pérdida) (δ), que es el desfase o tiempo de respuesta entre la tensión cortante aplicada y la deformación cortante durante una prueba.

El ángulo de fase es una medida del equilibrio viscoelástico del comportamiento del material, con valores extremos de 90° correspondiente a una respuesta puramente viscosa y 0°, a un comportamiento puramente elástico. Entre estos dos extremos, el comportamiento del material puede considerarse de naturaleza viscoelástica con una combinación de respuestas viscosas y elásticas.

El principio de superposición tiempo-temperatura permite determinar el módulo complejo del asfalto y la mezcla en una amplia gama de frecuencias de carga a una temperatura de referencia. El módulo complejo se determina a diferentes temperaturas con un barrido de frecuencia y se utiliza un factor de cambio para construir la curva maestra. Varios métodos empíricos pueden utilizarse para determinar el factor de cambio, una de esas ecuaciones es la Williams-Landel-Ferry (WLF), que explica esta relación como:

$$\mathbf{log a_T} = \frac{-\mathbf{C_1(T - T_1)}}{\mathbf{C_2 + T - T_1}} \tag{2}$$

donde a_T es el factor de corrimiento, C_1 y C_2 son contantes empíricas, T es la temperatura de prueba en °C y T_1 es la temperatura de referencia, igual a 25 °C.

La frecuencia reducida se define de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\omega_r = a_T * \omega} \tag{3}$$

Para la construcción de las curvas maestras del módulo elástico (G'), viscosidad compleja (η^*) y ángulo de fase (δ) se empleó el siguiente algoritmo: 1) se aplicó el principio de superposición tiempo-temperatura, según la ec. 2, fijando la temperatura de referencia T_1=25 °C y se determinaron los parámetros C_1 y C_2 de la ec. de WLF. 2) Los datos experimentales de G', η^* y δ obtenidos a diferentes temperaturas (25, 40, 60, 75 y 100 °C y barrido de frecuencia0.1-100 rad/s fueron trasladados aplicando la ec.3 a la los datos experimentales correspondientes de la temperatura de referencia 25°C. Las curvas maestras fueron construidas con el promedio de dos repeticiones en las mediciones reológicas.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

El óxido de grafeno se obtuvo por el método de Hummer, utilizando como reactivos grafito en polvo (<20 μm), ácido sulfurico, nitrato de sodio, permanganato de potasio y el peróxido de hidrógeno, los cuales fueron suministrados por Aldrich, México.
La sintesis del GO consiste en oxidar el grafito en polvo con ácido sulfúrico (H_2SO_4), nitrato de sodio ($NaNO_3$) y permanganato de potasio (K_2MnO_4). El procedimiento detallado para la sintesis del GO se describe a detalle en [14].

El óxido de grafeno obtenido se caracterizó por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Spectrum GX System (Perkin Elmer, Waltham, MA, EE. UU.) con ATR (Smith modelo *DurasamplII*), se realizaron 32 escaneos en el intervalo de longitud de onda de 650 - 4000 cm^{-1} y una resolución de 4 cm^{-1} [14].

Los espectros Raman del grafito y del óxido de grafeno se obtuvieron de un espectrómetro Raman DXR (Thermo Scientific) con λ = 532 nm, energía de excitación de 2,33 eV, con una potencia del láser inferior a 6 mW en la muestra evitando el calentamiento inducido por láser. Los escaneos se realizaron en el rango de 3500 a 50 cm^{-1} [14].

En este trabajo se prepararon dos grupos de mezclas asfálticas con diferentes concentraciones de GO (0.5, 1.0 y 1.5% masa) y se compararon con el asfalto sin modificar AC-20 (A); Los grupos son; 1) asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno y óxido de grafeno (A/SBS/GO), y 2) asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno-óxido injerto anhídrido maleico y oxido de grafeno (A/SBS-g-MA/GO). La matriz asfáltica AC-20 fue suministrada por PEMEX, Salamanca-México. El copolímero SBS fue proporcionado por Chemche, México, es Kraton D1102 con 30 % masa de estireno y arquitectura lineal. El copolímero SBS-g-MA fue preparado en el laboratorio por medio de un proceso de extrucción reactiva [15].

La preparación de asfalto modificado se realizó en el equipo mostrado en la figura 1; 100 g de asfalto AC-20 se calentaron a una temperatura de 160 °C en un recipiente de acero. Posteriormente, se agregó 4% en masa del polímero (SBS o SBS-g-MA) y GO a las diferentes concentraciones establecidas (0.5 %, 1.0 % y 1.5 % masa). La mezcla se mantuvo a 180 °C y una velocidad de rotación de 950 rpm durante 4 horas hasta lograr la homogeneidad deseada. Las muestras preparadas se nombraron de la siguiente manera: A/SBS/0.5GO, A/SBS/1.0GO, A/SBS/1.5GO, A/SBS-g-MA/0.5GO, A/SBS-g-MA/1.0GO y A/SBS-g-MA/1.5GO.

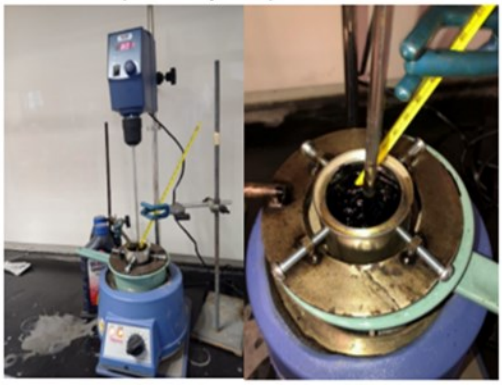


Figura 1 equipo empleado en la modificación de asfalto

Las propiedades empíricas como la penetración a 25 °C y la temperatura de ablandamiento del asfalto y las mezclas fueron determinadas por los métodos ASTM D36 y ASTM D5, respectivamente (figura 2). Las pruebas reológicas se realizaron en un reómetro Discovery HR-3 hybrid rheometer a esfuerzo controlado, barrido de frecuencia de 0.1-100 rad/s y diferentes temperaturas (25, 40, 60, 75 y 100 °C). La geometría utilizada corresponde a la de platos paralelos con un diámetro del palto de 25 mm y el espacio entre los dos platos paralelos de 1 mm. Todas las pruebas se realizaron dentro del intervalo viscoelástico lineal de la muestra.

Figura 2 Medición de la temperatura de ablandamiento

RESULTADOS

El espectro FTIR del grafito y óxido de grafeno se muestra en la Figura 3a. Se observa que el grafito no muestra señales significativas. Durante la oxidación del grafito aparecen señales en la región de 3300-3600 cm^{-1} correspondiente al OH y otros grupos funcionales base oxígeno, como C-O-C localizado a 1044 cm^{-1}, carbonilos C=O a 1724 cm^{-1}, C-O a 1400 cm^{-1} y 1264 cm^{-1} y epoxi a 1044 cm^{-1}. Los grupos C=C aparecen a 1620 cm^{-1} atribuidos a los dominios del grafito sin oxidar.

Los espectros Raman del grafito y oxido de grafeno se muestran en la Figura 3b. Tres picos, a 1350 (banda D), 1590 (banda G) y 2790 cm^{-1} (banda 2D o G') son característicos de las nanopartículas de grafito [13]. La banda D se atribuye a la vibración sp^2 del carbono en el anillo y surge por los defectos inherentes del grafito y a sus cristales en el borde. La banda G se asigna a la dispersión de primer orden del fonón E_{2g} de los átomos de C sp^2. La banda 2D (banda G') se origina por el apilamiento de las nanohojas del grafito. El área de la banda D es mayor para las nanohojas de grafeno y aumenta por oxidación (GO). El cociente de las intensidades de las bandas D y G (I_D/I_G) está relacionada con el tamaño de los cristales y los defectos estructurales en las superficies del grafeno. Por lo tanto, un menor número de defectos da como resultado un mayor tamaño del cristal, el valor del cociente I_D/I_G disminuye [13]. Por tanto, el aumento de I_D/I_G indica una reducción del tamaño de las láminas de grafito. Las nanohojas de grafeno reducen su tamaño, se arrugan y las interacciónes entre las nanohojas del GO aumentan por la oxidación. De esta manera, el valor del cociente I_D/I_G para el grafito es de 1.82, mientras que para el GO es de 2.14.

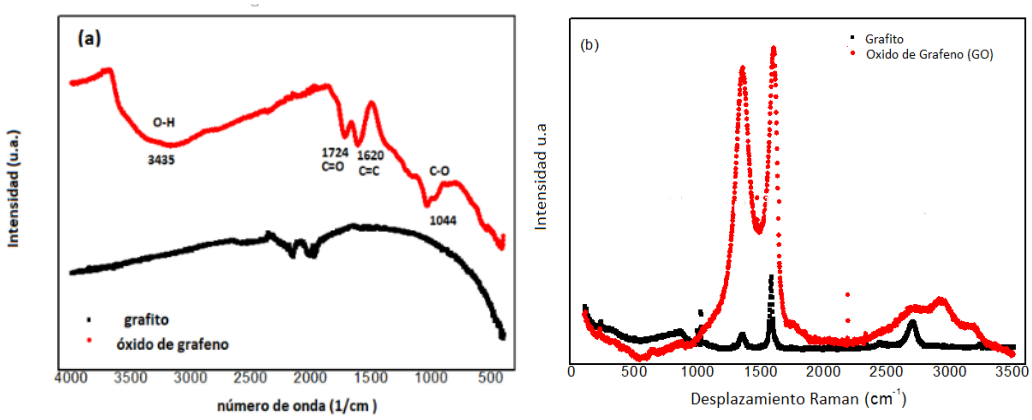


Figura 3 (a) espectro infrarrojo del grafito y óxido de grafeno; (b) espectro Raman

La composición del asfalto AC-20 basado en su solubilidad en n-heptano es de 20 % de asfalténos y 80 % de malténos (método ASTM D3279-90). Los resultados de la prueba de penetración se muestran en la Figura 4a, la presencia de GO reduce la penetración en ambos grupos de asfalto

modificado analizados, por tanto, la rigidez aumenta en estos sistemas. La muestra asfalto/SBS-g-MA/GO presenta valores constantes de penetración a concentraciones de 1.0 y 1.5 de GO. Este efecto podría deberse a la aglomeración de las partículas de GO.

La figura 4b presenta la temperatura de ablandamiento ($T_{R\&B}$) de los diferentes sistemas de asfalto analizados. El asfalto tiene un valor de 45 °C, esta temperatura indica el inicio de su deformación permanente. Al agregar polímero al asfalto, la temperatura aumenta hasta 79 °C mostrando menor sensibilidad a los cambios de temperatura de servicio. Cuando las muestras se refuerzan con GO, los valores de la temperatura de ablandamiento aumentan, especialmente en el sistema A/SBS-g-MA con una carga de GO de 1.5 % masa.

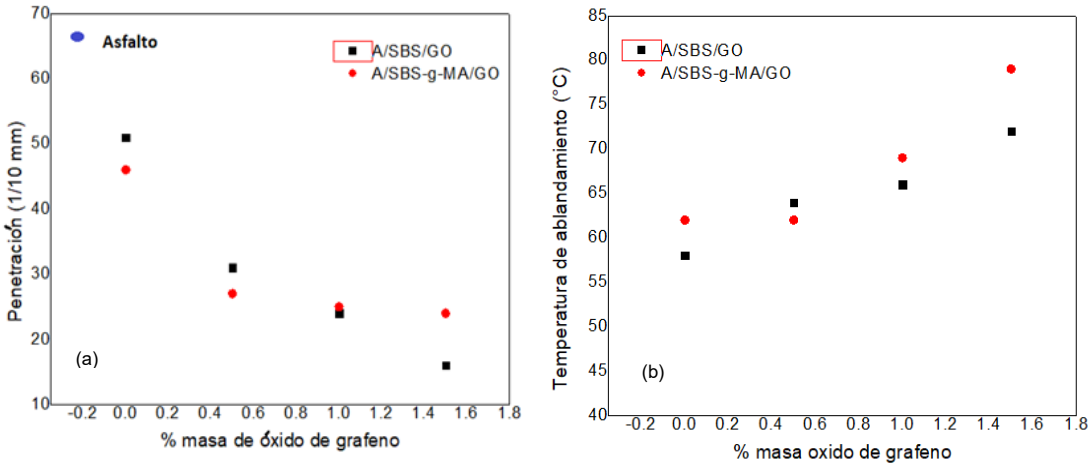


Figura 4 (a) Penetración a 25 °C; (b) Temperatura de ablandamiento

Las propiedades reológicas del asfalto y las diferentes mezclas se determinaron en la región viscoelástica lineal. Se seleccionó como temperatura de referencia 25 °C, y los factores de cambio se muestran en la Figura 5a para cada muestra. La figura 5b muestra los parámetros C1 y C2 de la ecuación WLF para cada sistema.

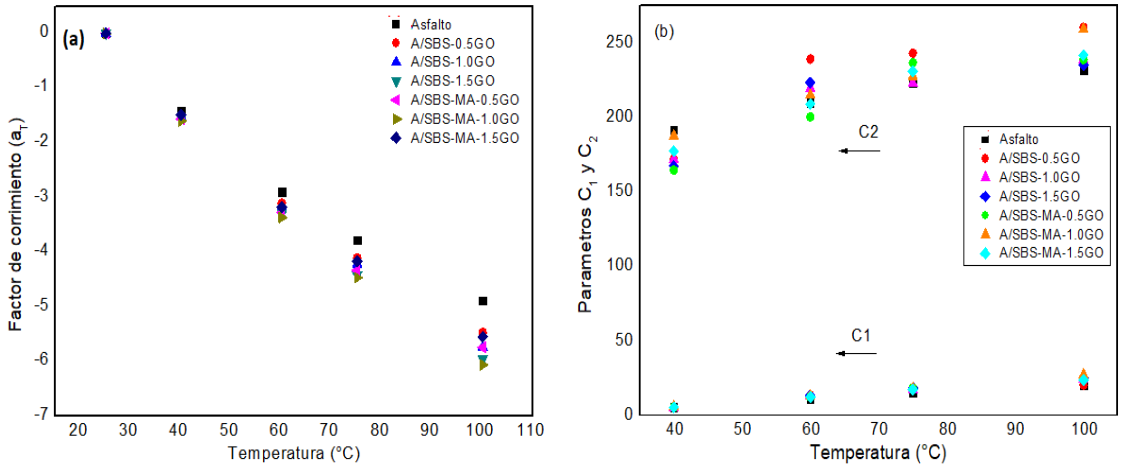


Figura 5 (a) Factor de corrimiento (a_T) de cada muestra de acuerdo a la ec. de WFL; (b) parámetros C_1 y C_2

Una curva maestra típica para el módulo de almacenamiento G' en este estudio se muestra en la Fig. 6, esta curva fue construida con 5 temperaturas de prueba y un barrido de frecuencias de 0.1-

100 rad/s. Esta figura compara las curvas maestras del asfalto y los dos grupos de asfalto modificado analizados en este trabajo; 1) polímero sin injerto (SBS) y; 2) polímero con injerto de anhídrido maleico (SIS-g-MA) con diferentes cargas de GO.

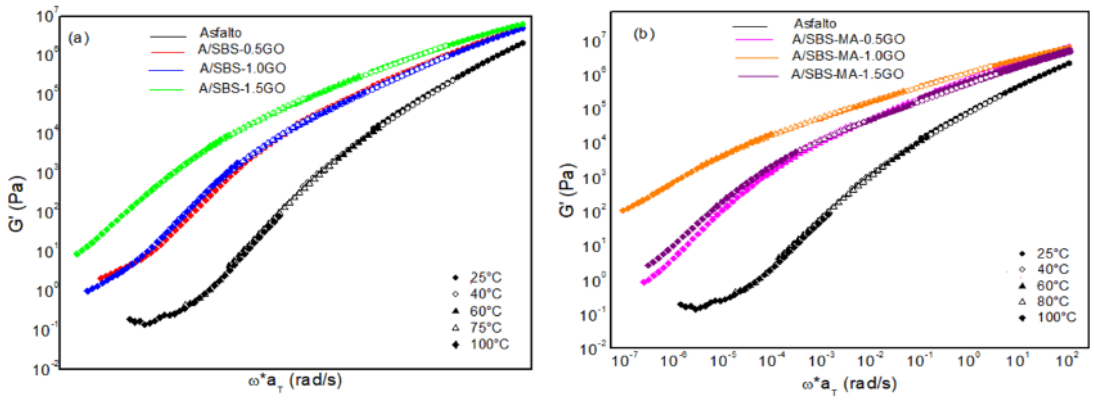


Figura 6 Curva maestra del módulo elástico (G') para asfalto y mezclas; a) SBS/GO y b) SBS-g-MA/GO.

Se observa que la curva del A/SBS-g-MA-1.0GO mostró un crecimiento considerable de G' a bajas frecuencias (alta temperatura) en comparación a todos los sistemas trabajados, inclusive con la muestra A/SBS-1.5GO con mayor carga de GO. Asimismo, A/SBS-g-MA-1.0GO exhibe una disminución en la pendiente en la zona terminal, esto indica menos susceptibilidad a la frecuencia de carga vehicular o a los cambios drásticos de temperatura. Con base a este resultado, la mezcla A/SBS-MA-1.0GO puede utilizarse en un rango amplio de temperatura de servicio.

En general, las curvas maestras muestran una dependencia con la frecuencia reducida (ω^*a_T), el incremento de G' en la zona de baja frecuencia indica que la presencia de GO a bajos porcentajes (por ejemplo a 0.5% en masa) puede mejorar la rigidez del asfalto y resistencia a la deformación permanente (rutting) a temperaturas altas. Este resultado puede deberse a que el GO puede intercalarse con el polímero SBS durante la mezcla con el asfalto y producir una reticulación física estable y a la buena distribución de las partículas de GO en la matriz asfáltica, la cual reduce la movilidad de las cadenas del polímero, produciendo una densidad de reticulación efectiva.

La muestra A/SBS-1.5GO presentó valores mayores de G' a bajas frecuencias en comparación con el polímero injertado SBS-g-MA con una carga de 1.5% de GO, esto puede deberse a una posible aglomeración de las partículas de GO. A altas frecuencias (baja temperatura), el módulo de almacenamiento de los diferentes sistemas de asfalto modificado con GO son ligeramente mayores a la del asfalto sin modificar, esto implica que la adición de GO y polímero tienen poca influencia sobre el desempeño reológico del asfalto a bajas temperaturas.

Los resultados del ángulo de desplazamiento o delta grados se muestra en la Figura 7, se observa que delta grados (δ) disminuye con el aumento de la temperatura. Los ángulos (δ) se utilizan para identificar los cambios en las propiedades reológicas. Este ángulo de fase refleja la proporción de componentes viscosos y elásticos en el asfalto. Cuanto menor sea δ, mayor será la recuperación elástica del asfalto cuando es sometido a condiciones de alta densidad de tráfico a temperaturas altas, como se observa, la adición de GO produce un endurecimiento en las muestras modificadas con polímero.

La Figura 7 (b) muestra que el sistema A/SBS-g-MA-1.0GO exhibió el ángulo de fase más bajo en todo el intervalo de frecuencia reducida en comparación a los otros sistemas, incluyendo a las

muestras de A/SBS/GO. Además, hay un cambio en la tendencia de la curva de este material en comparación a la curva típica del asfalto de referencia; el comportamiento elástico es independiente de la frecuencia reducida en zona intermedia de frecuencia, ya que existe una ligera zona de meseta.

En esta figura 7, se observa que las muestras de asfalto con SBS-g-MA/GO son sistemas más complejos que los homólogos A/SBS/GO ya que no forman curvas maestras únicas como ocurre en los sistemas A/SBS/GO y con el asfalto sin modificar.

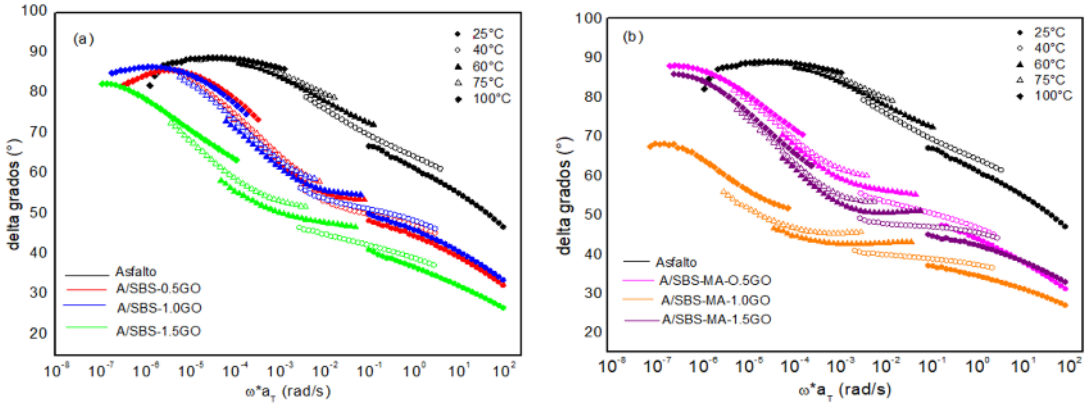


Figura 7 Curvas maestras del ángulo de desfasamiento o delta grados (δ) del asfalto comparado con las muestras de asfalto modificado.

Por otro lado, la viscosidad es un parámetro importante para evaluar la facilidad para manipular la mezcla asfáltica y su desempeño a temperaturas altas. El estado de fluidez del asfalto correspondiente a las temperaturas de 100-200 °C y está relacionado con el control de calidad del producto, el almacenamiento, transporte y características de la mezcla asfáltica.

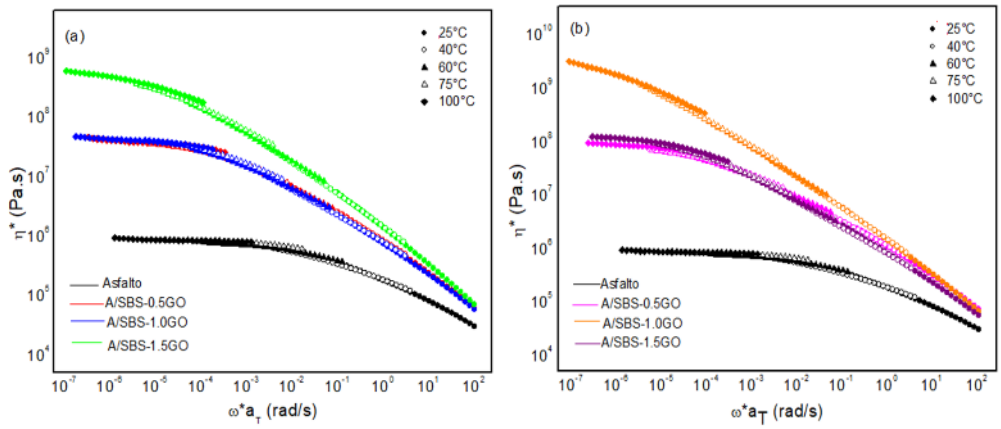


Figura 8 curva maestra de la viscosidad compleja del asfalto y sus respectivas mezclas; (a) A/SBS/GO y (b) A/SBS-g-MA/GO.

La Figura 8 muestra la viscosidad compleja (η*) del asfalto y sus mezclas. Se observa que las mezclas con el polímero SBS-g-MA-GO presentan una viscosidad mayor en comparación a las mezclas SBS-GO en la zona de baja frecuencias (alta temperatura) y el valor máximo corresponde al sistema A/SBS-g-MA-1.0GO. En el caso del asfalto modificado con SBS-GO, la viscosidad aumenta con la concentración de GO, mientras que para las mezclas con SBS-g-MA-GO, la viscosidad de la mezcla con mayor cantidad de GO (A/SBS-g-MA-1.5GO) disminuye en comparación con la de A/SBS-g-MA-1.0GO, debido a una posible aglomeración de GO. Se podría considerar que

el 1% es la concentración límite de GO para el asfalto modificado con polímeros con mayor polaridad (SBS-g-MA), y en el caso de agregar mayor concentración de GO, se requiere de un aumento de la velocidad de agitación para evitar la aglomeración de las partículas de GO.

En general, la viscosidad aumenta con la adición de GO y los polímeros SBS o SBS-g-MA en comparación con el asfalto virgen. El efecto de GO sobre las mezclas asfálticas es evidente en la región de bajas frecuencias o altas temperaturas, mientras que a altas frecuencias todas las muestras presentan valores similares, pero ligeramente superiores al asfalto virgen. Adicionalmente, las muestras A/SBS-1.5GO y A/SBS-g-MA-1.0GO presentaron una desviación al comportamiento Newtoniano, mientras que los otros sistemas muestran la zona newtoniana a bajas frecuencias.

CONCLUSIONES

El aumento constante de la temperatura debido al cambio climático ha motivado al desarrollo e investigación de nuevos modificadores de asfalto con el propósito de producir materiales más resistentes a los cambios drásticos de temperatura, al aumento de la carga vehicular e incrementar el tiempo de vida útil. Una de las propuestas incluye el uso de materiales semiconductores para modificar el asfalto como el óxido de grafeno. En este trabajo se prepararon mezclas de asfalto con polímeros tribloque SBS y SBS-g-MA con óxido de grafeno sintetizado por el método de Hummer. El propósito fue evaluar el efecto de GO y el injerto de anhídrido maleico en el SBS sobre las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas asfálticas. La adición de trazas de GO (no más del 1.5 % en masa) aumenta la viscosidad, la elasticidad, la rigidez (disminuye la penetración) y la resistencia a la deformación permanente a temperaturas altas (temperatura de ablandamiento). Este efecto se atribuye al aumento en el grado de reticulación entre el polímero y partículas de GO. El sistema A/SBS/GO mejora su desempeño con el aumento de GO, mientras que el sistema A/SBS-g-MA presentó como concentración máxima de GO el 1.0% masa, un aumento de esta concentración podría producir aglomeración de las partículas de GO y una reducción en las propiedades analizadas como viscosidad compleja, elasticidad y resistencia a la deformación. Se necesita análisis por microscopia para evidenciar la aglomeración de las partículas de GO y un análisis por infrarrojo para demostrar que no hay reacción química entre el injerto del polímero anhídrido maleico y grupos funcionales del GO a las condiciones de procesamiento de la mezcla.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, F. Gámiz, M.C. Rubio-Gámez, “Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders”, Constr. Build. Mater. 180, 2018, pp. 265-274.
2. Q. Yang, Q. Liu, J. Zhong, B. Hong, D. Wang, M. Oeser, “Rheological and micro-structural characterization of bitumen modified with carbon nanomaterials”, Constr. Build. Mater. 201, 2019, pp. 580-589.
3. P.K. Ashish, D. Singh, “Development of empirical model for predicting G*/sinδ and viscosity value for nanoclay and Carbon Nano Tube modified asphalt binder”, Constr. Build. Mater.165 2018, pp. 363-371.
4. Y. Li, P. Hao, C. Zhao, J. Ling, T. Wu, D. Li, J. Liu, B. Sun, “Anti-rutting performance evaluation of modified asphalt binders: A review”, J. Traffic Trans. Eng. (english edition), 8 (3), 2021, pp. 339-355.
5. Q. Zeng, Y. Liu, P. Liu, Y. He, Y. Zeng, “Preparation and modification mechanism analysis of graphene oxidemodified asphalt”, Constr. Build. Mater., 238, 2020, 117706.
6. M. Han, J. Li, Y. Muhammad, Y. Yin, J. Yang, S. Yang, S. Duan, “Studies on the secondary modification of SBS modified asphalt by the application of octadecyl amine grafted graphene nanoplatelets as modifier”, Diamond & Related Materials, 89, 2018, pp. 140-150.
7. R. Wang, Y. Xiong, M. Yue, M. Hao, J. Yue, “Investigating the effectiveness of carbon nanomaterials on asphalt binders from hot storage stability, thermodynamics, and mechanism perspectives”, J. Clean Product., 276,2020, pp. 124180.

8. A.M. Adnan, C. Lü, X. Luo, J. Wang, G. Liu, “Fracture properties and potential of asphalt mixtures containing graphene oxide at low and intermediate temperaturas”, Inter. J. Pavement Eng., 2022, pp.1-16.
9. R. Yu, Q. Wanga, W. Wang, Y. Xiao, Z. Wang, X. Zhou, X. Zhang, X. Zhu, C. Fang, “Polyurethane/graphene oxide nanocomposite and its modified asphalt binder: Preparation, properties and molecular dynamics simulation”, Mater. Design 209, 2021, 109994.
10. J. He, W. Hu, R. Xiao, Y. Wang, P. Polaczyk, B. Huang, “A review on Graphene/GNPs/GO modified asphalt”, Constr. Build. Mater., 330, 2022, pp. 127222.
11. X. Li, P. Bandyopadhyay, T.T. Nguyen, O. Parka, J.H. Lee, “Fabrication of functionalized graphene oxide/maleic anhydride grafted polypropylene composite film with excellent gas barrier and anticorrosión properties”, J. Membrane Sci, 547, 2018, pp. 80-92.
12. H. Shi, D. Shi, C. Li, S. Luan, J. Yin, R.Y. Li, “Preparation of functionalized graphene/SEBS-g-MAH nanocomposites and improvement of its electrical, mechanical properties”, Materials Letters133, 2014, pp. 200-203.
13. B.S. Hari, K.V. Mahesh Kumar, K. Krishnamurthy, P. Sathish Kumar, V.K. Gobinath, R. Sachinbala, R. Rajasekar, “Influence of graphene oxide on the morphological and mechanical behaviour of compatibilized low density polyethylene nanocomposites”, Materials Today: Proceedings, Vol. 39, Part 4, 2021, pp. 1487-1493.
14. M.A. Vargas-Hernández, B. Sulbarán-Rangel, H.Vázquez-Torres, “Non-isothermal curing kinetics of biocomposite from poly(furfuryl alcohol) and graphene oxide or reduced graphene oxide with different contents of oxygen-groups by DSC”, Thermochim. Acta, 684, 2020, pp. 178485.
15. K. Debbarma, B. Debnath, P.P. Sarkar, “A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes”, Constr. Build. Mater., 361, 2022, pp. 129634

APLICACIÓN DE PROGRAMAS DE SIMULACION NUMERICA PARA EL ESTUDIO DE LA PRECIPITACION Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LAS SUPERALEACIONES INCONEL 713-C Y UDIMET 700 DESPUES DE SERVICIO EN TURBINAS DE AVIÓN

V.M. López-Hirata[1], M.L. Saucedo-Muñoz[2], S.S. Bautista-Fuentes[3], P.J. Ensastiga-Pichardo[4].

Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Instituto Politécnico Nacional, 07300, CDMX, México.

vmlopezh@ipn.mx, msaucedom@ipn.mx, sebastian23.bautista@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización microestructural y mecánica de 2 alabes de turbina de avión fabricadas de las superaleaciones Inconel 713-C y Udimet 700 en un rango de temperaturas de 700-900°C. Para llevar a cabo dicha caracterización se realizó de forma experimental y utilizando el programa Thermo Calc, por medio de este programa se calculó el diagrama de cantidad de fases en equilibrio vs temperatura para ambas aleaciones. Para el Inconel 713-C el diagrama mostró que las fases presentes son g rica en Ni y la fase (Nb-Ti)C, mientras que para la superlación de Udimet 700 el diagrama indicó que la primera fase en formarse es γ seguida de la fase γ', estos datos fueron corroborados experimentalmente utilizando las técnicas de microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X en ambos casos. Al calcular el diagrama de Scheil del Inconel 713-C predijo la formación de la fase γ'que es una fase rica de Ni3Al, mientras que este mismo diagrama, pero para la aleación de Udimet 700 mostro que las fases encontradas fueron gamma, γ', carburo del tipo MC y M23C6, corroborando de nuevo los datos obtenidos experimentalmente. El diagrama TTP para ambas aleaciones fueron calculados mediante el programa TC-Prisma. De acuerdo con lo anterior queda demostrada la importancia de programas de simulación como Thermo Calc y TC prisma en el estudio de las transformaciones de fase de componentes industriales ya que brindan un ahorro muy significativo de tiempo y de capital. La caracterización mecánica de los 2 componentes se determinó mediante un ensayo de microdureza Vickers, la parte de ambos alabes que tuvo el valor más alto de dureza fue la punta lo que se atribuye al endurecimiento de la precipitación de la fase γ'.

INTRODUCCIÓN

Desde su creación en 1903, los seres humanos han utilizado los aviones para diversos propósitos, siendo su función principal el transporte de pasajeros largas distancias en el menor tiempo posible. Entre otros usos importantes del avión se encuentra el transporte de carga, que incluye alimentos, medicamentos, y equipo militar, entre otros.

Uno de los componentes fundamentales en la estructura de un avión es la turbina, la cual está compuesta por diversas piezas, tales como la cámara de combustión, la turbina, la tobera, y el compresor, entre otras. Esta investigación se enfocará principalmente en los álabes, ya que son de suma importancia para este componente al encargarse de comprimir el aire que ingresa a la turbina. Esta pieza posee una longitud de 9.5 cm. Los álabes operan en un rango de temperatura entre 700 y 900°C, por casi 12,000 horas, todo esto en una atmósfera corrosiva.

Debido a las condiciones de operación de un álabe, es importante que sean fabricados con un material capaz de soportar dichas condiciones. Por lo tanto, las superaleaciones son una opción muy viable, ya que presentan propiedades mecánicas capaces de soportar los parámetros de operación mencionados. Entre algunas de estas propiedades se encuentran la capacidad de trabajar a temperaturas mayores de 1000°C, la resistencia a la corrosión, la resistencia a la termofluencia, y la resistencia mecánica, entre otras. Las principales aplicaciones de las superaleaciones se extienden a la industria aeroespacial, la industria marina, la producción de submarinos, reactores nucleares,

tubos de intercambiadores de calor y turbinas de gas, así como a la industria de procesos químicos, etc.

Un ejemplo de las superaleaciones base níquel utilizadas en la fabricación de álabes son el Inconel 713-C y el Udimet 700. Estas aleaciones basan su resistencia mecánica a altas temperaturas en la precipitación de la fase γ´(Ni3Al) sobre la fase matriz γ rica en Ni. Adicionalmente, un gran número de fases pueden formarse tanto durante el tratamiento térmico, así como a la temperatura de operación en un componente industrial. Estos cambios microestructurales pueden modificar las propiedades mecánicas, lo que puede llevar a la sustitución del componente.

Por lo tanto, es importante caracterizar microestructuralmente las superaleaciones desde la precipitación de las diferentes fases hasta el engrosamiento de las mismas para entender su efecto sobre las propiedades mecánicas. Algunas herramientas utilizadas para el análisis microestructural de las aleaciones son los programas de simulación numérica, los cuales permiten ahorrar tiempo, recursos humanos y económicos. Algunos ejemplos de estos programas de simulación numérica son Thermo-Calc y el módulo TC-PRISMA, los cuales son interfaces gráficas fáciles de emplear, pues realizan cálculos termodinámicos para el estudio científico o para aplicaciones ingenieriles. Por ejemplo, Thermo-Calc permite construir diagramas de Scheil, así como diagramas de pseudobinarios, mientras que con TC-PRISMA se pueden construir diagramas de temperatura, tiempo, precipitación y diagramas de radio y fracción volumen vs. tiempo. Por su parte, el software J ayudará en la obtención de valores aproximados de las propiedades mecánicas de la aleación al ingresar la composición química de la aleación en el software, facilitando de esta forma la experimentación.

TEORÍA

Superaleaciones

Se denominan superaleaciones o aleaciones de alto rendimiento a un grupo de materiales o aleaciones metálicas de base níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) y titanio (Ti) que presentan excelentes propiedades mecánicas a temperaturas elevadas, es decir, son utilizados a menudo de más de 0.7 de su temperatura de fusión absoluta (a temperaturas de 540 °C y superiores). Las superaleaciones se basan en elementos del Grupo VIII B y contienen grandes cantidades de elementos de aleación. Por lo general, consisten en diversas combinaciones de Fe, Ni, Co y Ti, así como cantidades pequeñas de W, Mo, Ta, Nb, Cr y Al, con el fin de producir una combinación de alta resistencia a temperaturas elevadas, a la corrosión, a las vibraciones y a la termofluencia a temperaturas superiores a los 1000ºC.

La gama de aplicaciones para las que se utilizan superaleaciones se ha extendido a muchas otras áreas y ahora incluye las aeronaves y en tierra las turbinas de gas, motores de cohetes, industria química y plantas de petróleo. Son especialmente adecuadas para estas aplicaciones exigentes debido a su capacidad para retener la mayor parte de su resistencia, incluso después de largos tiempos de exposición por encima de 650°C. Su versatilidad se debe al hecho de que combinan esta alta resistencia con buena ductilidad a baja temperatura y estabilidad superficial. Las superaleaciones, que son aleaciones de alto rendimiento, han llegado a ser la opción preferida en lugar del acero para resistencia a la corrosión y versatilidad. El desarrollo de las superaleaciones ha dependido en gran medida de las industrias químicas y de la innovación de procesos, y ha sido impulsado principalmente por la industria aeroespacial y de energía [1,2].

Características o propiedades generales de las superaleaciones

Las superaleaciones o aleaciones de alto rendimiento resisten las condiciones más críticas, y presentan las siguientes características generales [3]:

- Elevada resistencia a temperaturas mayores de 1000°C.

- Resistencia a la termofluencia (creep)
- Buena resistencia a cargas elevadas.
- Resistencia a la ruptura por estrés.
- Excelente resistencia mecánica.

Programas de simulación numérica.

La investigación y el desarrollo que vinculan la ciencia y la ingeniería de materiales con cálculos y simulaciones computacionales han dado origen, en la última década, a un enfoque revolucionario para el diseño conceptual cuantitativo de diversos materiales. Una combinación completa de modelos termodinámicos y cinéticos permite predecir la composición del material, las estructuras y las propiedades resultantes del procesamiento de diversos materiales. La creciente importancia de la modelización matemática para el desarrollo de productos y el control de procesos ha demostrado la gran necesidad de cálculos termodinámicos y simulación cinética [4]:

Thermo-Calc
Es un software que sirve para todo tipo de cálculos de propiedades termodinámicas, como funciones no solo de temperatura, presión y composición. El programa de cómputo Thermo-Calc permite calcular los diagramas de fase de aleaciones con sistemas de multicomponentes como el acero, basado en los algoritmos y base de datos establecidos en Calphad, Calculation of Phase Diagrams. Se utiliza para la simulación de diagramas de fases, aleaciones en equilibrio y también para simular la formación de fases fuera del equilibrio. Con ayuda de este programa, se pueden obtener diagramas de fases pseudobinarios y pseudoternarios, diagramas con puntos de equilibrio y diagramas de composición. Además, se puede conocer cuál será el comportamiento de aleaciones a diferentes temperaturas, las fases que se forman y su composición [5].

TC-Prisma
Es un módulo que puede realizar cálculos de la cinética de precipitación en aleaciones multicomponentes y multifases. Se basa en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales establecidas en la teoría de Langer y Schwartz y el modelo numérico de Kapmann. TC-Prisma utiliza datos de composición química, temperatura del envejecido, energía interfacial de la matriz y el precipitado para realizar cálculos de: Nucleación y crecimiento, disolución y engrosamiento de precipitados, evolución de la distribución de tamaño de partícula, radio de la partícula, fracción de volumen y composición del precipitado, velocidad de nucleación y velocidad de engrosamiento, y diagrama TTP [5].

PARTE EXPERIMENTAL

El material de estudio fue un alabe de Inconel 713-C y un alabe de Udimet 700, la composición química de los álabes se presenta en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Composición química del Udimet 700

%Ni	%Cr	%Al	%Mo	%Co	%C	%Fe	%Ti	%B
51.8	16.55	4.3	5.25	18	0.1	0.9	0.8	0.012

Tabla 2. Composición química del Inconel 713-C

%Ni	%Cr	%Al	%Mo	%Ta	%C	%Nb	%Ti	%Zr	%B
74	12.5	6	4.2	1.75	0.12	0.9	0.8	0.1	0.012

Dos metodologías fueron empleadas en el desarrollo de este estudio. La primera consistió en la simulación numérica, utilizando el programa Thermo-Calc y agregando la base de datos termodinámica TCNi9.tdb, la composición química y la temperatura al módulo single point para equilibrio simple, se calculó el diagrama de fases en equilibrio vs temperatura para ambas aleaciones. Además, para calcular los diagramas de Scheil de los dos materiales, se utilizó el módulo "old Scheil diagram" en modo consola.

El módulo TC-Prisma se utilizó para obtener el diagrama TTP. Se seleccionaron las bases de datos TCNi9.tdb y MOBNi6.mdb para realizar los cálculos. Además, se introdujeron la composición química y la temperatura de ambas aleaciones.
Para finalizar, se empleó el programa de dominio libre J para determinar las propiedades mecánicas y las gráficas de termofluencia de los dos materiales introduciendo la composición química y el tamaño de radio de los precipitados de la fase γ'

Los componentes de estudio se caracterizaron microestructuralmente empleado las técnicas de: Microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido convencional y de alta resolución, y difracción de rayos x. La caracterización macroestructural se realizó mediante microscopia óptica y se realizaron cálculos de termofluencia con el programa de uso libre J.

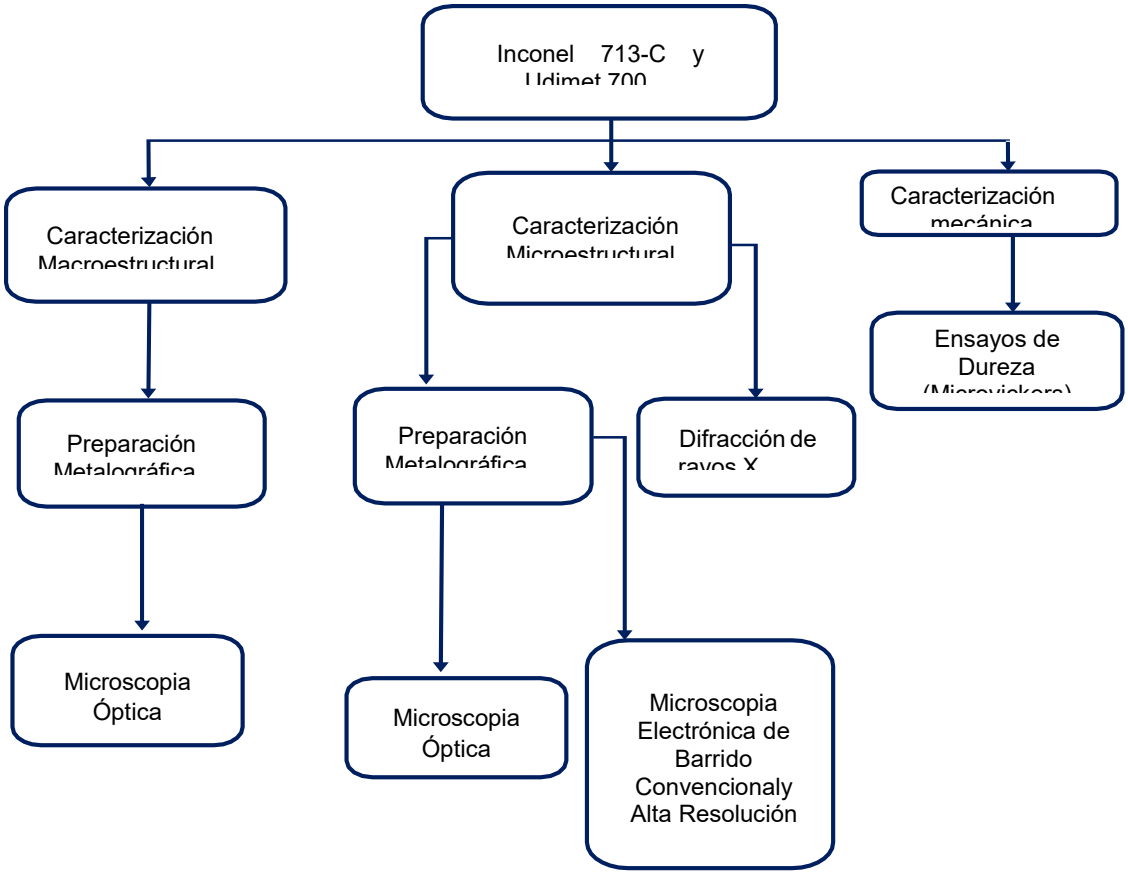


Figura 1. Diagrama de bloques de la metodología experimental.

RESULTADOS

Diagrama de fases en equilibrio vs. Temperatura

En la **Figura 2** se puede observar el diagrama de fases en equilibrio vs. temperatura del álabe de Inconel 713-C. Aquí se observa que la primera fase sólida en formarse es la fase g a 1350 °C, después comienza a precipitar γ' cerca de los 1200 °C, seguida del carburo $M_{23}C_6$ a 1050 °C, y a 750 °C comienza la precipitación del M_3B_2. La **Tabla 11** muestra la composición química de las fases en equilibrio y muestra que la fase γ está formadaprincipalmente por Ni, Cr, Mo y Al entre otros elementos de aleación. Los elementos formanuna solución sólida en Ni que la hace resistente a la oxidación y tenaz. Mientras que la fase γ' está principalmente constituida por Ni, Al, Cr y Ta, formando un compuesto intermetálicodel tipo Ni_3Al. El compuesto M_3B_2 está formado por Mo, B, Cr y Ni, y finalmente $M_{23}C_6$ está formado Mo, C, Cr y Ni, siendo rico en Cr.

La **Figura 3** muestra el diagrama de fases en equilibrio en función de la temperatura del álabe de Udimet 700. Este diagrama indica que la primera fase sólida en formarse es γ a 1350°C. Cerca de los 1100°C la fase γ' comienza a precipitar. La precipitación del carburo de titanio (TiC) y de la fase σ ocurre cerca de los 1000°C. A temperaturas menores a 800°Cprecipitan los boruros M_2B y finalmente a 650°C se precipita la fase τ y el carburo $M_{23}C_6$. Eldiagrama indica que la cantidad de γ se mantiene constante hasta los 1100°C a partir de estepunto disminuye la cantidad de esta fase debido a la aparición de la fase γ'.

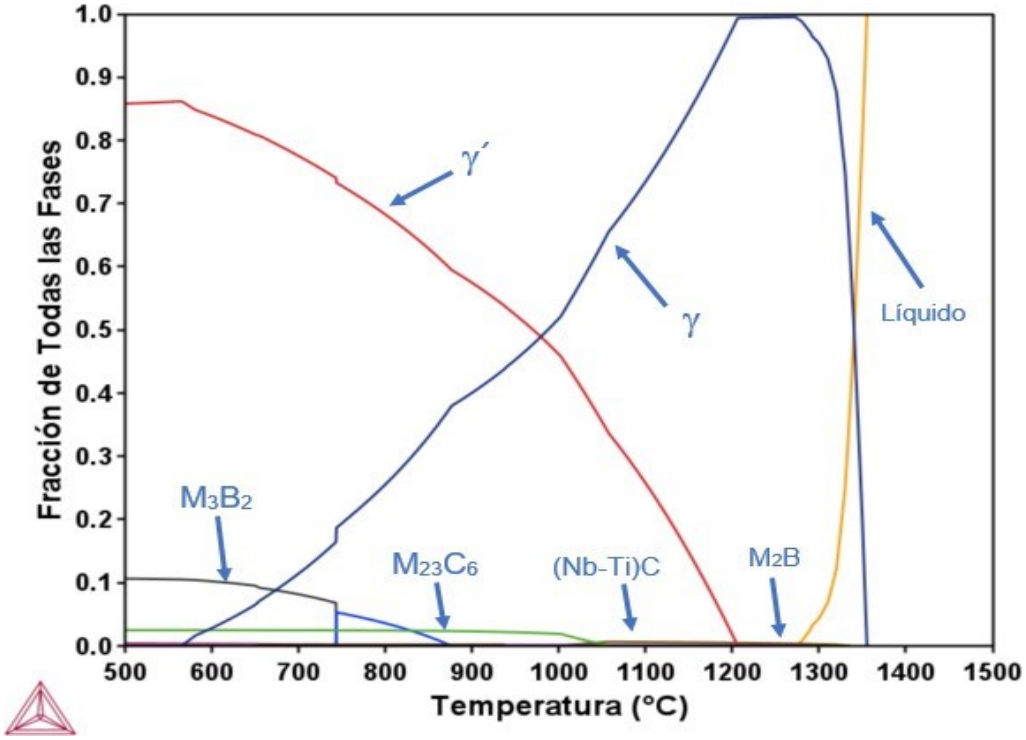


Figura 2. Diagrama de fases en equilibrio vs. Temperatura Inconel 713-C.

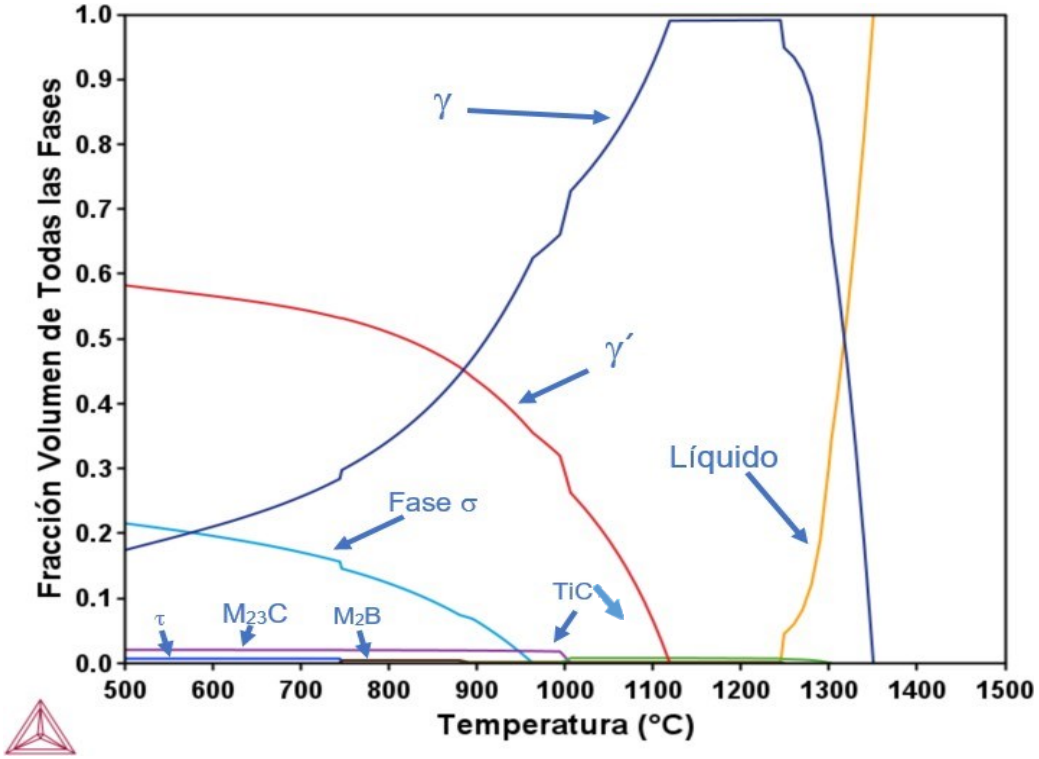


Figura 3. Diagrama de fases en equilibrio vs. Temperatura Udimet 700.

Diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación (TTP)

La **Figura 4** presentael diagrama TTP para la precipitación intragranular de la fase γ´ del álabe de Inconel 713-Ccalculado con el modulo TC-Prisma, ingresando la composición (% peso) de la fase γ en condiciones de no equilibrio: 75.668% Ni, 12.25% Cr, 5.92% Al, 3.57% Mo, 0.5 %Ti, 0.55%Nb, 1.43 %Ta, 0.11 %C, 0.002 %Zr.

En el diagrama se observa que la cinética de reacción es mucho mayor en la nariz de la curvay ocurre aproximadamente a 1050 °C. Con el diagrama también es notorio que la precipitación de la fase γ' ocurre fácilmente a una exposición isotérmica de entre las temperaturas de 700 a 1200°C.

En la Figura 5 se observa el diagrama TTP para la precipitación de la fase γ´ de la aleación de Udimet 700. A la temperatura de aproximadamente 950°C se presenta la mayor cinética de reacción (nariz de la curva). Para este caso la composición de la fase γ fue la siguiente: 53.592 %Ni, 20.22 %Co, 16.6 %Cr, 4.29 %Al, 3.94 %Mo, 1.32 %Ti, 0.028 %Fe, 0.01 %C.

La cinética de precipitación del Udimet 700 es más rápida que la del Inconel 713-C debido al mayor contenido de soluto de Al que causa una mayor fuerza motriz para la precipitación de la fase γ´ [6].

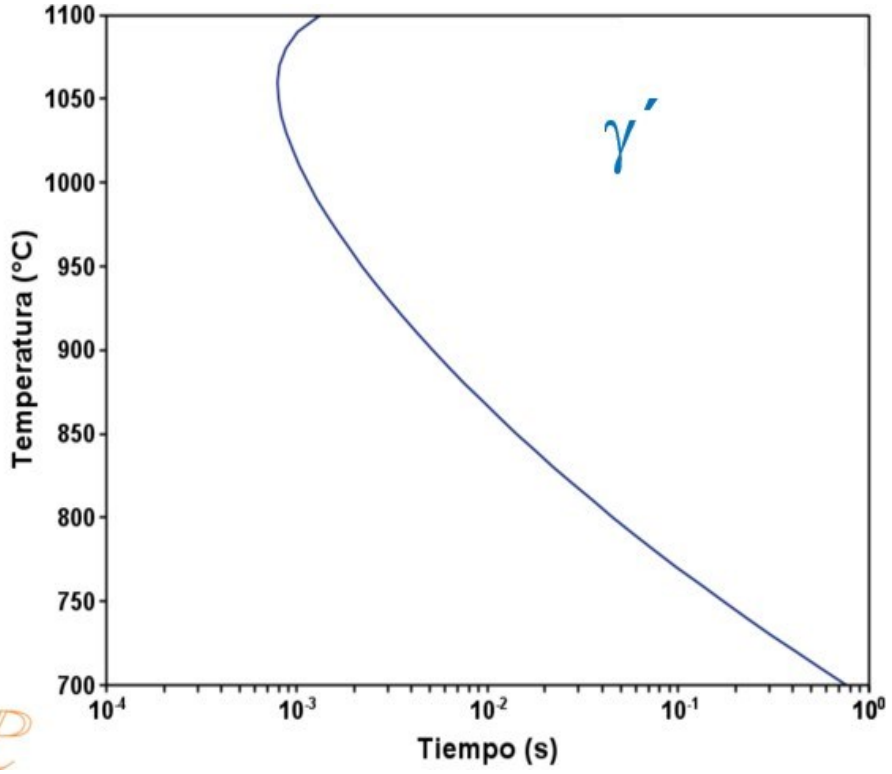


***Figura 4**. Diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación dela fase γ´ para la aleación Inconel 713-C.*

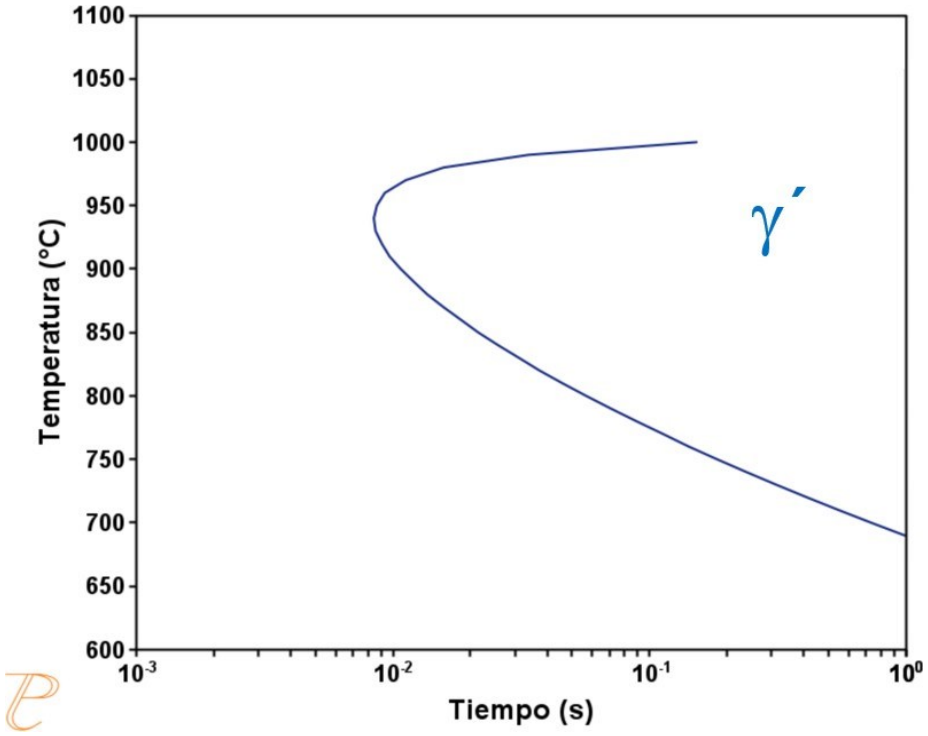


***Figura 5**. Diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación dela fase γ´ para la aleación Udimet 700.*

Microscopia electrónica de barrido de alta resolución.

En las **Figuras 6 (c y d)** se observa la matriz γ del alabe de Inconel 713-C compuesta en su mayoría por Ni, Cr, Mo y Al, además se observa la fase γ´ constituida de Ni, Al, Cr y Ta, formando un compuesto intermetálico del tipo Ni3Al, que presenta una morfología de cubos con un alineamiento preferencial con la matriz todo esto provocado por la adición de aluminio en la aleación tal como se reportan en la literatura para este tipo de aleaciones.

La **Figura 6 (a y b)** confirma la presencia del precipitado M23C6 (carburo de cromo) que precipita en los límites de la fase γ, se aprecian precipitados con geometría irregular y en ocasiones con forma casi circular identificados como carburos de titanio, niobio y molibdeno dispersos en las zonas dendríticas de la fase γ. Tanto la presencia de las fases γ y γ´ concuerdan con los resultados calculados mediante el programa Thermo-Calc.

En la **Figura 7** se muestra la microestructura del alabe de Udimet 700 donde se observa que dicho componente posee una matriz γ formada en su mayoría por Ni y Cr, mientras que la fase γ' está constituida por Ni, Al y Ti, como se observa en la **Figura 7 (b y c)** la fase γ´ posee una morfología esferoidal sin alineamiento preferencial con la matriz.

Las **Figuras 7 (a)** se muestran carburos del tipo Mc constituidos de Ti y Mo en su mayoría, presentan una geometría irregular y en algunos casos circular muy parecidos a los carburos de la aleación de Inconel, estos carburos se forman de inmediato después de la fase γ y se localizan en las dendritas de la aleación. Lo observado en las micrografías concuerda con todas las fases y carburos calculados en los diagramas del programa Thermo-Calc.

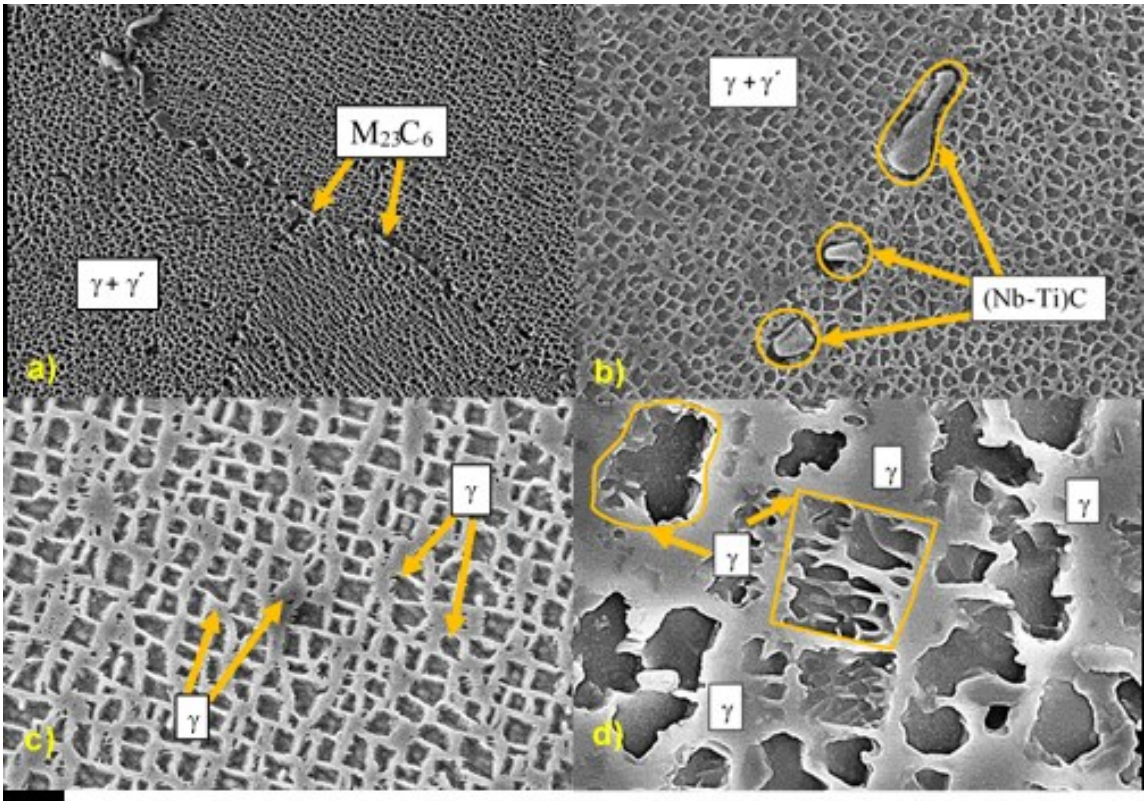


***Figura 6**. Microestructuras obtenidas por MEB de alta resoluciónde la superaleación Inconel 713-C a) 2000x b) 5000x c) 10,000x y d) 30,000x.*

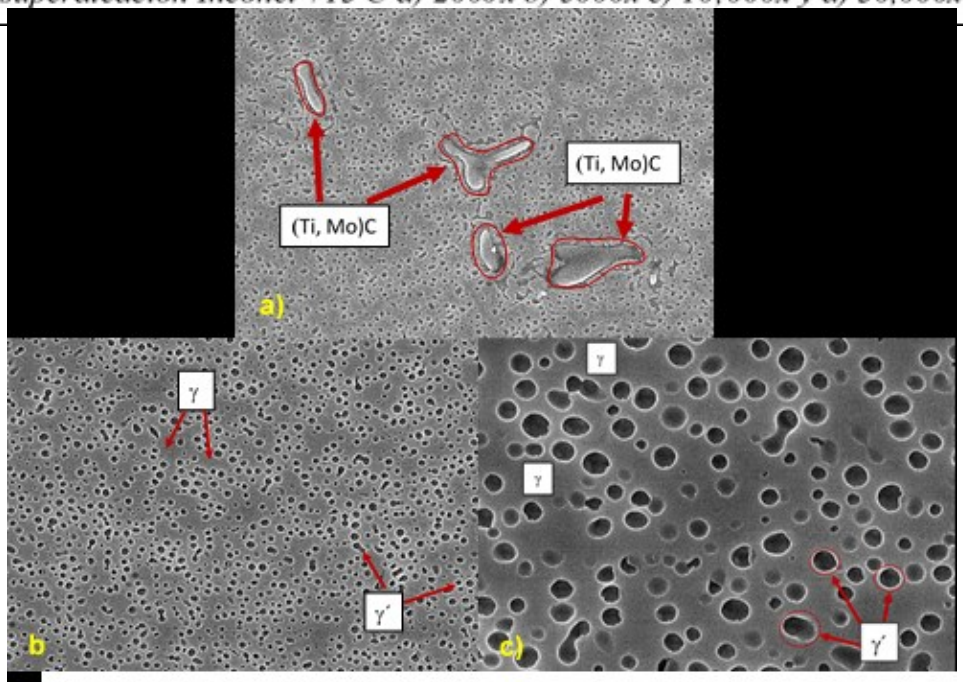


***Figura 7**. Microestructuras obtenidas por MEB de alta resoluciónde la superaleación Inconel 713-C a) 5000x c) 10,000x y d) 30,000x.*

Caracterización mecánica.

La zona de la base del álabe de Inconel 713-C presenta una dureza promedio de 412.21 HV, la zona media posee una dureza de 368.41 HV y la punta una dureza de 413.19 HV. Mientras que en el perfil longitudinal la dureza en la base es de 396.56 HV, en la zona media la durezaes de 357.12 HV y en la zona de la punta la dureza tiene un valor de 396.29 HV, con los resultados obtenidos se observa una disminución de dureza en la zona media del alabe, **Figura 8**, debido a que esta zona fue expuesta a la mayor temperatura de operación generando un engrosamiento del precipitado γ'.

La zona de la base del alabe de Udimet 700 presenta una dureza de 353.93HV en su sección transversal, mientas que para el perfil longitudinal la dureza tiene un valorde 374.69 HV, en la zona media del alabe la dureza en su sección transversal presenta un valor de 390.59 HV y en el perfil longitudinal tiene un valor de 394.59 HV, finalmente en lazona de la punta el alabe presenta un valor de dureza de 398.96 y 378.13 HV en su sección transversal y un valor de 402.28 HV en su perfil longitudinal, **Figura 9**.

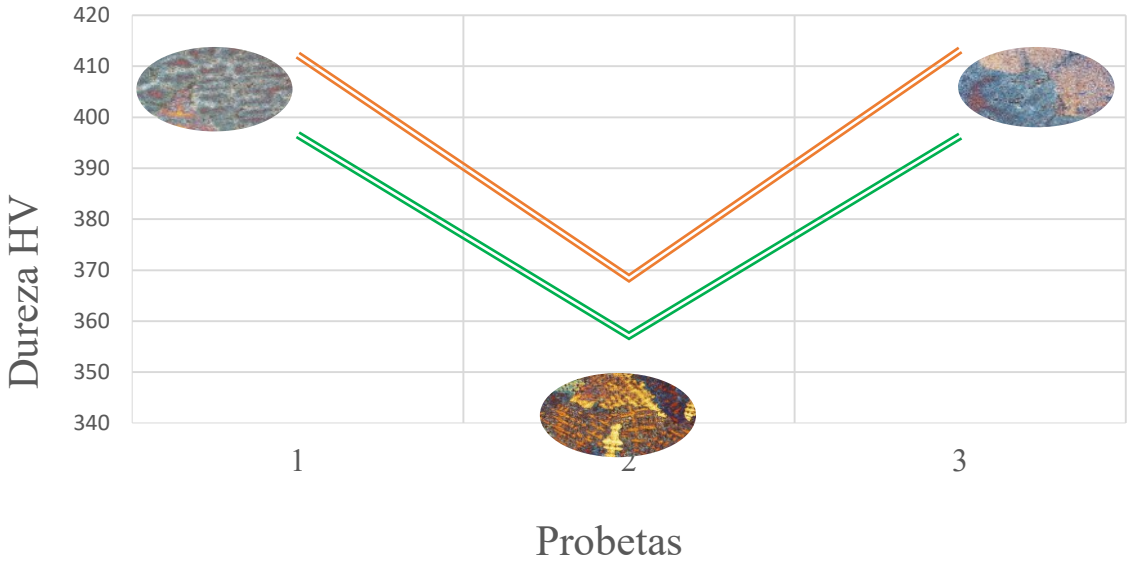


Figura 8. *Gráfica de dureza promedio del alabe de Inconel 713-C.*

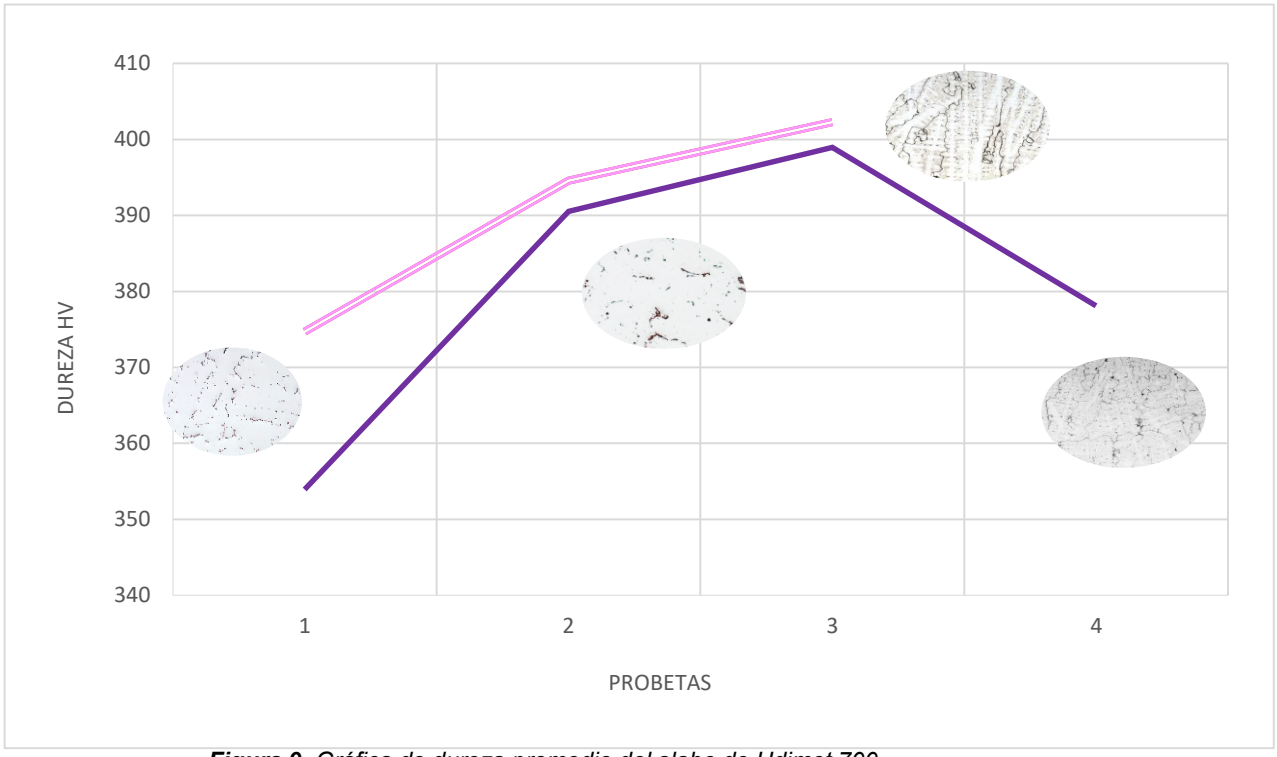


***Figura 9**. Gráfica de dureza promedio del alabe de Udimet 700.*

CONCLUSIONES

Después de finalizar el estudio microestructural de ambos álabes después de estar en servicio en turbinas de avión, se llegó a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo al diagrama de Scheil para la aleación de Inconel 713-C las primeras fases en solidificar son □ y □' seguidas del carburo M23C6 Y M3B2.
- Las primeras fases que solidificaron en el alabe de Udimet 700 fueron la fase □ y el carburo (Ti, Mo) C.
- Gracias a los resultados obtenidos en los mapeos, se pudo observar que la aleación Inconel 713-C presenta carburos ricos en Nb, Mo y Ti en forma cuboidal, mientras que la aleación de Udimet 700 presenta carburos en forma de esferas ricos en Ti y Mo.
- En la zona expuesta a la mayor temperatura de trabajo sufrió una disminución en su dureza, esto debido al engrosamiento de precipitados.

BIBLIOGRAFÍA

1) J. Cárdenas y F. Castillo, Lecturas para ingeniería No.23 “Superaleaciones, pp. 22-96. 2015.
2) M.J. Donachie, S.J. Donachie, Superalloys a Technical Guide Second Edition, 2002.
3) J.K. Tien, Thomas Caulfield, Superalloys, Supercomposites and Superceramics, Material science and Technology Series, 1989.
4) J.O. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P.F. Shi, y B. Sundman, Thermo-Calc and DICTRA, Computational Tools for Materials Science, Calphad, Vol 26, pp. 273–312, 2002.
5) Thermo-Calc. Thermo-Calc. Thermo-Calc Software.[online] 2024[Marzo 23, 2024] https://thermocalc.com/about-us/methodology/the-calphad-methodology/.
6) F. Bińczyk y J. Śleziona, Phase transformations and microstructure of In-713C nickel superalloy, Arch of Found Eng 2 vol 9, pp. 109-112. 2009.

REDUCCIÓN DE LA VISCOSIDAD EN UN CRUDO PESADO CON CATALIZADORES BASE GRAFENO IMPREGNADO CON COBALTO Y MOLIBDENO

Alondra Ochoa Torres[1,2], Esther Torres Santillán[1*], Marco Antonio Domínguez Aguilar[2], Mayahuel Ortega Avilés[1], Selene Capula Colindres[1], Gerardo Terán Méndez[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional, [2]Instituto Mexicano del Petróleo
*estorress@ipn.mx

RESUMEN

La necesidad de transportar hidrocarburos de manera más rápida y eficiente surge como resultado del constante crecimiento de la industria petrolera. Generalmente, los pozos de petróleo se encuentran lejos de las zonas donde se realiza el procesamiento y refinación del petróleo crudo, por lo que el transporte es esencial durante su extracción, distribución, transformación y comercialización. El principal obstáculo del transporte de crudos pesados es la alta viscosidad, por lo que se requiere reducir la viscosidad para incrementar la movilidad del crudo pesado y con ello disminuir la fricción que este genera en los oleoductos durante su transporte [1]. Por lo tanto, en este trabajo se aplicaron catalizadores base grafeno impregnados con cobalto y molibdeno a un crudo pesado mediante un proceso de aquatermólisis, con el objetivo de disminuir la viscosidad del crudo; los resultados muestran que la relación del catalizador Co_2Mo_8 es la que presenta un mejor desempeño, con una disminución del 57.29 % de la viscosidad en el crudo pesado.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la creciente demanda mundial de energía y las declinantes reservas de petróleo crudo convencional, se ha dirigido un interés mundial hacia el petróleo pesado y extrapesado [2]. Sin embargo, el alto contenido de azufre en los hidrocarburos pesados, relacionado con su alta viscosidad y baja gravedad API, causa dificultad en su extracción y transportación. La aquatermólisis es una técnica para mejorar la extracción de crudo pesado y extrapesado mediante la inyección de agua caliente o líquidos iónicos y/o catalizadores con el objetivo de reducir la viscosidad del petróleo crudo [3-5]. Inicialmente, Hyne propuso en 1982, el mecanismo de hidrogenación para la reducción de la viscosidad en crudos pesados [6]. Hoy en día, es bien sabido que los tioles, sulfuros, disulfuros, sulfóxidos, tiofenos y los componentes pesados como resinas y asfaltenos son los responsables de la alta viscosidad del petróleo crudo pesado y extrapesado. Por lo tanto, se ha propuesto que la hidrodesulfuración debe incluirse en el proceso de aquatermólisis como mecanismo de reducción de la viscosidad [7, 8]. Ante esto, se han empleado muchos catalizadores en el proceso de aquatermólisis, para alterar la estructura del petróleo crudo pesado, eliminando las moléculas de azufre contenidas en este e interactuando con los hidrógenos, para reducir irreversiblemente la viscosidad del crudo [7, 9]. Los primeros catalizadores utilizados fueron monometálicos, como el catalizador de carburo de molibdeno para el proceso de aquatermólisis [10]. Posteriormente, se han utilizado en mayor proporción, sistemas de catalizadores que comprenden elementos del grupo VIB y del grupo VIIIB de la tabla periódica [11]. Un grupo de catalizadores muy eficientes para la hidrodesulfuración son los basados en nanopartículas de Ni y Mo o aleaciones de Ni y Mo soportados o Ni-Mo y Co-Mo sobre soportes de alúmina (Al_2O_3) y Titania (TiO_2) [12-15]. Últimamente, los carburos laminares han sido probados para la desulfuración con buenos resultados, pero en esta investigación se han utilizado altas cargas metálicas y catalizadoras en las pruebas [11,16]. A pesar de los grandes avances obtenidos con los cambios realizados a los catalizadores convencionales, estos no son lo suficientemente activos y selectivos para cumplir con los futuros requerimientos impuestos a los combustibles en el contenido de azufre y aromáticos permitidos. Actualmente, los trabajos de mejora de los procesos en bruto se orientan a modificar el soporte de Al_2O_3 o utilizando nuevos medios como carburos o nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT, por sus siglas en inglés Multi-walled carbon nanotubes), modificando la fase activa con un aditivo [4, 10, 17-19], o el uso de metales nobles o metales diferentes a los no convencionales Co, Ni, Mo y W [4, 17]. Un aspecto importante por considerar es el proceso de temperatura de la

aquatermólisis en la actividad de los catalizadores, ya que a bajas temperaturas los catalizadores pierden su actividad [20]. Por lo tanto, cada vez más investigaciones se centran en hacer que este proceso sea más económico. Desarrollos en la refinación del petróleo han producido combustibles más limpios con menos de 15 ppm de azufre. El óxido de grafeno ha sido analizado como posible soporte y en este trabajo se propone impregnarlo con nanopartículas de cobalto y molibdeno, que permitan obtener catalizadores selectivos al azufre y estables químicamente que ayuden a la disminución de la viscosidad de un crudo Maya mediante su aplicación en un proceso de aquatermólisis.

TEORÍA

Definición, composición y clasificación del petróleo crudo

El petróleo es un recurso natural no renovable que está compuesto por una mezcla compleja en la que coexisten partes sólidas, líquidas y gaseosas de hidrocarburos que están formados principalmente de carbono e hidrógeno [21-23], denominando al estado sólido betún natural, al líquido petróleo crudo y al gaseoso gas natural, esto a condiciones atmosféricas [24].

El petróleo crudo es una mezcla de constituyentes puros (hidrocarburos, heteroátomos y organometálicos) y compuestos indefinidos químicamente que se han clasificado como resinas y asfaltenos [25]. Dentro de su composición contiene cantidades elevadas de impurezas como azufre, oxígeno, nitrógeno, vanadio, níquel, hierro y otros elementos [26]. Su color varía entre ámbar y negro; aunque por luz reflejada, es usualmente verde, debido a la fluorescencia [27].
Los asfaltenos son materiales orgánicos formados por compuestos de anillos aromáticos y nafténicos, al igual que las resinas. Ambos contienen abundantes cantidades de azufre, nitrógeno, oxígeno, níquel y vanadio; y tienen un elevado peso molecular, por lo que son las fracciones más pesadas del petróleo crudo [21].

Existen distintas clasificaciones referentes a las características generales de un tipo de crudo. Sin embargo, a nivel mundial la industria petrolera clasifica al petróleo crudo con base en su gravedad específica, gravedad API o grados API, por sus siglas en inglés American Petroleum Institute. Esta es una propiedad que precisa cual liviano o pesado es el petróleo para efectos de calidad y comercialización [28]
En México, en el año 2015, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) emitió el acuerdo en el cual se expiden las reglas de carácter general para definir los métodos de ajuste del valor de los hidrocarburos, en el cual se establece la clasificación del petróleo crudo tomando como referencia la gravedad API [24] como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de petróleo crudo por gravedad API (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2020).

Clasificación por gravedad API	
Superligero	39.0° < API
Ligero	31.1° < API ≤ 39.0°
Mediano	22.3° < API ≤ 31.1°
Pesado	10.0° < API ≤ 22.3°
Extrapesado	API ≤ 10.0°

En la actualidad se manejan 13 tipos de petróleo crudo, siendo el Maya, Istmo y Olmeca los más importantes debido a que son los más utilizados. Estos petróleos crudos se encuentran en el Anexo E del "*Contrato de Compraventa de Petróleo Crudo celebrado entre PEMEX Exploración y*

Producción y PEMEX Transformación Industrial", en el que se establecen las especificaciones de calidad de los tipos de petróleo crudo por ducto que manejan en las refinarías del país [29], como se muestra en la Tabla 2 la cual tiene como base la clasificación emitida por la SHCP.

Tabla 2. Especificaciones de calidad de los diferentes tipos de petróleo crudo [29].

Tipos de petróleo crudo	Gravedad (°API)	Azufre (% peso)	Clasificación (°API)
	Mínimo	Máximo	
Panuco Cacalilao	11.9	5.5	Pesado
Tamaulipas Altamira	17.5	5.5	Pesado
Muro	18.5	4.0	Pesado
Maya	21.0	3.6	Pesado
Horcón	22.0	3.2	Pesado
Alamo	24.0	3.2	Mediano
Marfo Antares	25.0	3.0	Mediano
Naranjos	26.0	3.0	Mediano
Pozoleo	29.0	2.0	Mediano
Istmo	32.0	1.6	Ligero
Arenque	32.0	2.5	Ligero
Olmeca	38.0	0.95	Superligero*
Papaloapan	41.0	2.0	Superligero

*Nota: A pesar de que la gravedad API mínima reportada debe ser de 38.0, de acuerdo con lo establecido en el contrato, el petróleo crudo Olmeca es clasificado mundialmente como superligero.

Gran parte de la producción total de petróleo corresponde a crudos pesados, de los que se obtiene un menor rendimiento en la producción de gasolina y diésel, además de que son más difíciles de extraer, transportar y procesar en las refinerías. Los crudos medianos y ligeros tienen un mayor rendimiento en la obtención de gasolinas y destilados intermedios (diésel y turbosina); y los crudos superligeros tienen un mayor rendimiento en la obtención de lubricantes y petroquímicos [30]

Entre más contaminantes tenga el petróleo crudo, incrementara su densidad y viscosidad, por lo que tendera a comportarse como un fluido no newtoniano [25]. El petróleo crudo pesado se caracteriza por tener una gran cantidad de componentes químicamente indefinidos y de heteroátomos (azufre, vanadio, nitrógeno, oxígeno), los cuales son causantes de su alta viscosidad [31]. Por lo que, la reducción de esta se ha convertido en la vía más demandada para que su extracción, transporte y procesamiento sean más eficientes y de bajo costo [32].

Transporte y distribución

La necesidad de transportar hidrocarburos de manera más rápida y eficiente surge como resultado del constante crecimiento de la industria petrolera. Generalmente, los pozos de petróleo se encuentran lejos de las zonas donde se realiza el procesamiento y refinación del petróleo crudo, por lo que el transporte es esencial durante su extracción, distribución, transformación y comercialización. Esto implica una mayor inversión financiera y en infraestructura [33]. Específicamente la distribución interna y externa de petróleo crudo, se hace por medio de oleoductos, buquetanques y autotanques [34].

A pesar de que los oleoductos son el medio más eficiente y económico para el transporte y distribución de petróleo crudo, gran porcentaje de la producción total de petróleo corresponde a crudos pesados. Los cuales generan un problema para la industria petrolera en México, debido a que el principal obstáculo del transporte de crudos pesados es la alta viscosidad. Por lo que se requiere reducir la viscosidad para incrementar la movilidad del crudo pesado y con ello disminuir la fricción que este genera en los oleoductos durante su transporte [1].

Viscosidad

La viscosidad es una propiedad física importante que puede ser medida en todo tipo de petróleo crudo y fracción líquida de petróleo. Esta puede ser utilizada como un parámetro para estimar otras propiedades físicas o para determinar la composición y calidad de las fracciones de petróleo [35]. También es importante para estimar las condiciones óptimas de almacenamiento, manejo y operación del petróleo crudo y sus fracciones [36]. En la industria petrolera la viscosidad se puede medir y reportar como viscosidad absoluta o dinámica, viscosidad cinemática, viscosidad Saybolt Universal y viscosidad Saybolt Furol.

La medición de la viscosidad es relativamente sencilla, pero el método y los instrumentos empleados dependen del tipo de muestra. Especialmente para el petróleo crudo pesado es una de las propiedades más difíciles de evaluar, por lo que no se puede utilizar cualquier método para determinar su viscosidad [35]. El viscosímetro Brookfield es un instrumento sencillo de utilizar, determina la viscosidad del petróleo crudo y fracciones del petróleo midiendo la fuerza necesaria para hacer girar un elemento sumergido en la muestra. El medidor de viscosidad da vueltas sobre sí mismo por la acción de un motor síncrono, obteniéndose el valor de viscosidad de la muestra que se visualiza en una pantalla digital [37].

Figura 1. Viscosímetro Brookfield DV2T de AMETEK disponible en el Laboratorio de Nanotecnología del edificio z5, 2do piso de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Aquatermólisis

Es una tecnología emergente que ha sido ampliamente estudiada y aplicada para mejorar las propiedades de fluidez in situ del petróleo crudo pesado y extrapesado, así como su extracción, transporte y distribución [2]. En el proceso denominado “aquatermólisis” se lleva a cabo la interacción química entre el vapor de agua y los compuestos orgánicos del petróleo crudo a condiciones específicas de presión y temperatura, logrando un cambio en la estructura molecular de los compuestos orgánicos debido al rompimiento de sus enlaces durante el proceso. La viscosidad del petróleo pesado y extrapesado se reduce irreversiblemente, por lo que esta tecnología tiene una gran ventaja en comparación a otros métodos de extracción [38].

En 1997 Weissman y colaboradores mencionaron que al adicionar catalizadores al proceso de aquatermólisis se mejoraba el rompimiento de los enlaces, transformando los compuestos pesados (resinas y asfaltenos) y los compuestos con heteroátomos en hidrocarburos ligeros, provocando un aumento en la eliminación de azufre y en la reducción de la viscosidad [31]. Por lo que, surgió la "aquatermólisis catalítica" [19], que consiste en agregar catalizadores adecuados que activen las moléculas de agua para producir un craqueo catalítico al interior del yacimiento que contiene petróleo crudo, a fin de disminuir su viscosidad [32]. La efectividad de este proceso está relacionada con el tipo de catalizador que se quiera utilizar, ya sea homogéneo o heterogéneo [31]. Sin embargo, para cualquier opción, se busca asegurar que tenga una alta actividad y sea respetuoso con el medio ambiente para evitar la contaminación del medio ambiente durante su elaboración y uso [39].
Gran parte de los catalizadores homogéneos y heterogéneos utilizados en la aquatermólisis catalítica se basan en metales de transición como hierro, cobalto, molibdeno, níquel y aluminio. La mayoría de los iones de estos metales rompen los enlaces carbono-azufre (C-S), transformando los compuestos de mayor peso molecular en compuestos más ligeros, contribuyendo en la reducción de la viscosidad en petróleos pesados y extrapesados; este efecto reductor aumenta al incrementar el tiempo y la temperatura de reacción de los iones metálicos [40].

Óxido de grafeno

El óxido de grafeno es un compuesto aislante con una red de átomos de carbono semejante a la del grafeno, pero con grupos funcionales intercalados. Algunos estudios han confirmado que en el plano basal y en los bordes de las capas del GO hay grupos epóxidos e hidroxilos, así como otros grupos funcionales que están compuestos por alquilos y oxígenos. Estas alteraciones químicas causan que la hibridación sp^2 cambie a sp^3, formando monocapas de carbonos con una hibridación sp^2 y sp^3 [41-43].
La oxidación del grafito con agentes oxidantes fuertes y su posterior exfoliación con agua, provoca la formación de monocapas de óxido de grafeno; siendo esta técnica la más empleada para su obtención. Actualmente, los métodos que se emplean para la oxidación del grafito son los propuestos por Staudenmaier, Hummers y Tour; no obstante, el método sugerido por Hummers es el más utilizado de los tres métodos [41, 42].

Método Hummers

El óxido de grafito se obtuvo por primera vez en 1859 por el químico B. C. Brodie, pero en 1958 W. S. Hummers y R. E. Offeman desarrollaron un método alternativo, reduciendo el tiempo y la temperatura de experimentación [44]. En el método propuesto, el grafito se coloca en un matraz redondo y luego se mezcla con ácido sulfúrico (H_2SO_4), nitrato de sodio ($NaNO_3$) y permanganato de potasio ($KMnO_4$) para oxidarlo. Después de que el grafito se oxida, quedan restos de iones de permanganato y sulfato que se remueven con una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), agua desionizada (H_2O) y lavados con ácido clorhídrico (HCl). El método se realiza en un tiempo aproximado de dos horas a temperaturas bajas [45, 46]

De este método se obtiene óxido de grafito que está constituido por láminas de óxido de grafeno, estas láminas contienen en su estructura grupos funcionales con oxígeno que provocan que el GO sea un material altamente hidrófilo. Esto hace que las interacciones de Van der Waals entre las láminas se debiliten y permitan la entrada de moléculas de agua, lo que hace que la distancia entre las láminas aumente significativamente. Como resultado, la energía de interacción disminuye y el óxido de grafito se puede exfoliar fácilmente en agua mediante el uso de energía externa, como la vibración ultrasónica. De esta manera, se obtienen láminas de GO, que están estabilizadas por repulsión electrostática causada por la carga negativa que adquieren en dispersión como consecuencia de la ionización de los diferentes grupos funcionales que contienen en su estructura [44].

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de nanomateriales

La síntesis de óxido de grafeno (GO) se llevó a cabo mediante el método de Hummers, para la cual se utilizó grafito con un grado químicamente puro del cien por ciento. En un matraz balón de fondo plano de 3 boquillas se agregaron 0.5 g de grafito, 27 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y 0.5 g de nitrato de sodio ($NaNO_3$). Después de 1 hora se agregaron 3 g de permanganato de potasio ($KMnO_4$). Durante este proceso el matraz fue colocado en baño de hielo y con un sistema de reflujo para controlar la temperatura debido a que la reacción es exotérmica. También se mantuvo con agitación constante hasta que el producto paso de una tonalidad morada a verdosa y por último a un color café chocolate, lo cual indico la completa oxidación del material.

Posteriormente de que el grafito se oxido, la mezcla se retiró del baño de hielo para mantenerla a temperatura ambiente, se le agregó 47 ml de agua desionizada y 3 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30%, este último se añadió hasta que la solución cambio su coloración a un tono ligeramente dorado. Finalmente, la solución se filtró en un equipo de vacío con una membrana de nylon (0.45 µm) y se realizaron lavados con HCl 0.1 M para neutralizar la solución y después con agua desionizada hasta obtener un pH de 7.

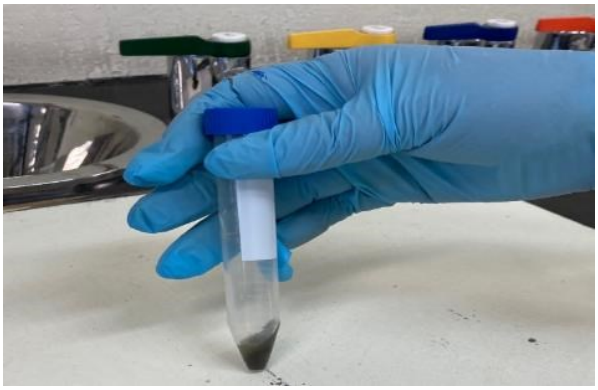


Figura 2. Nanopartículas de GO obtenidas mediante el método Hummers, el resultado visualizado muestra el GO separado del solvente después de haber sido sometido a un proceso de centrifugación.

Impregnación del óxido de grafeno con nanopartículas de cobalto y molibdeno

El óxido de grafeno reducido (rGO) fue usado como soporte para depositar sobre este las nanopartículas de Cobalto (Co) y Molibdeno (Mo) por un método de impregnación vía húmeda usando acetil acetonato de cobalto [$(CH_3\text{-}COCHCO\text{-}CH_3)_2Co$ Aldrich, 97% pureza] y acetilacetonato de molibdeno de [$(CH_3\text{-}COCHCO\text{-}CH_3)_2Mo$ Aldrich, 97% pureza] como precursores. Los precursores fueron adecuadamente pesados en una relación calculada para obtener contenidos al 10% en peso y de Co-Mo a una relación en peso de 1:1, 1:4, 4:1, 1:0 y 0:1 en un contenido del 10% en peso con lo restante de óxido de grafeno al 90% diluyéndose en agua destilada. Se colocó metanol en un matraz balón de fondo plano de 3 boquillas y con agitación se agregó por goteo la cantidad de precursores pesados y al mismo tiempo el reductor $NaBH_4$ al 50% en peso en solución. Transcurrido un tiempo de 3 horas, los catalizadores obtenidos se filtraron y finalmente se secaron en una estufa durante 24 horas a una temperatura de 80 °C.
La estructura cristalina, el tamaño de particular y la morfología de los catalizadores fueron analizados por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM).

Evaluación de la actividad catalítica de las nanoestructuras por aquatermólisis

Los catalizadores Co-Mo/rGO se evaluaron en un equipo de autoclave a la presión atmosférica. Se colocó en una charola de aluminio una muestra de crudo Maya y agua de mar en una proporción 1:1. Se adicionó el catalizador al 0.5% peso de la mezcla Crudo-Agua. De igual manera, una muestra fue colocada sin catalizador, para ser tomada como blanco de referencia.

RESULTADOS

Como se observa en la Figura 3, los cinco catalizadores muestran una reflexión intensa situada a 25.95° y una menos intensa a 53.64°, ambas reflexiones son características del óxido de grafeno reducido, lo que confirma la presencia del soporte en los catalizadores.

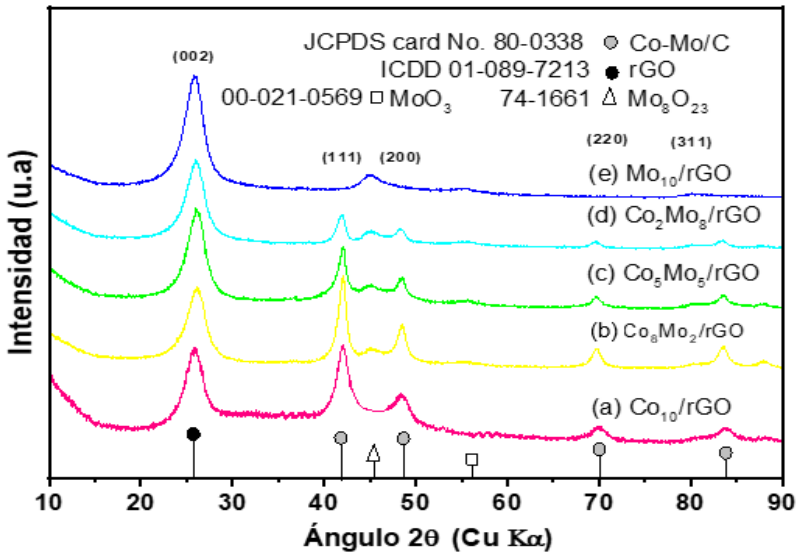


Figura 3. Difractograma de los catalizadores Co-Mo/rGO con relación a su contenido de Co-Mo (a) 10:0, (b) 8:2, (c) 5:5, (d) 2:8 y (e) 0:10, con 90 partes de rGO en su estructura.

La Figura 4 se obtuvo mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido, en la cual se muestra la morfología de la superficie del óxido de grafeno. Las láminas de GO tienen un tamaño menor de 1 μm.

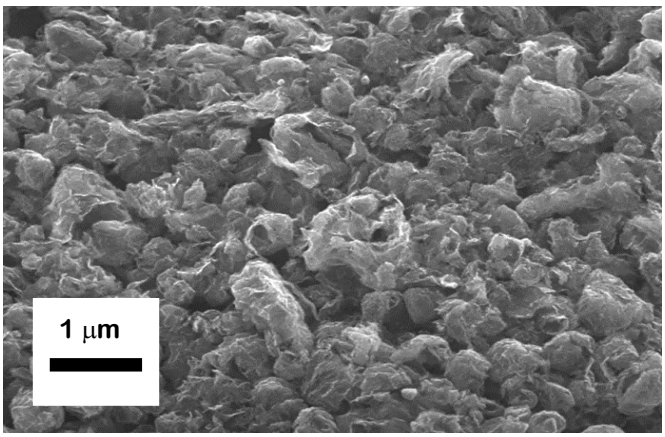


Figura 4. Imagen SEM del óxido de grafeno (GO).

En la imagen obtenida mediante la técnica de microscopía electrónica de transmisión se puede observar una aglomeración en la Figura 5 donde se obtuvo un tamaño de partícula de 10 nm del catalizador Co-Mo/rGO.

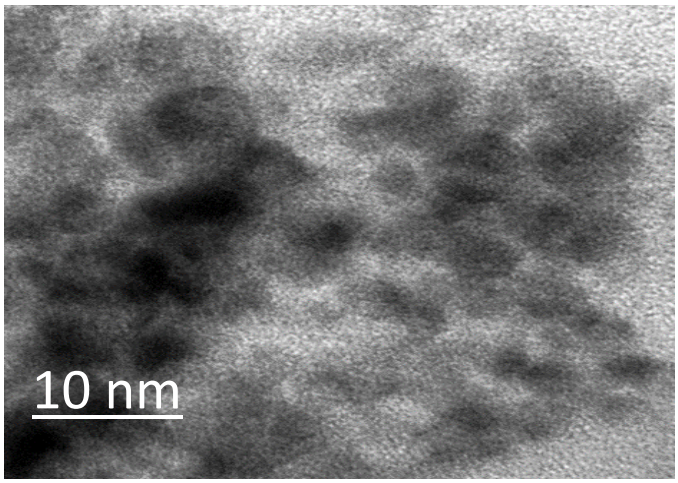


Figura 5. Imagen TEM de la muestra Co-Mo/rGO.

Evaluación de la actividad catalítica de las nanoestructuras por aquatermólisis

Las muestras fueron pesadas antes de su evaluación, para tratar de mantener una proporción 1:1 con 0.5% peso de catalizador Co-Mo/rGO, como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 3. Porcentajes de catalizador utilizados en el crudo pesado Maya.

Soporte rGO	**Muestra Co_2Mo_8 (g)**	**Muestra Co_5Mo_5 (g)**	**Muestra Co_8Mo_2 (g)**	**Muestra Mo_{10} (g)**	**Muestra Co_{10} (g)**
Crudo	15.1470	15.0032	15.1730	15.045	15.350
Agua	14.9957	15.2915	14.2976	15.065	15.345
Catalizador	0.0753	0.0717	0.0721	0.0745	0.0722
Porcentaje catalizador	0.2492%	0.2361%	0.244%	0.2468%	0.2347%

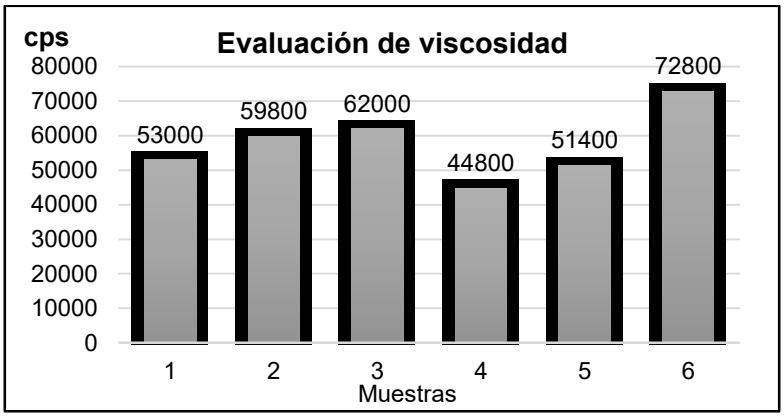


Figura 6. Resultados de viscosidad del crudo Maya con los diferentes catalizadores Co-Mo/rGO después del proceso de aquatermólisis

Las muestras fueron puestas a reacción a 50 °C durante las primeras 24 horas, y elevando su temperatura a 100 °C en las siguientes 24 horas, ambas a presión atmosférica. En la Figura 6 se observan los resultados del comportamiento que tuvo el crudo Maya con los diferentes catalizadores después del proceso de aquatermólisis. El crudo sin catalizadores (muestra 6) tiene el mayor valor de viscosidad con 72800 cps, mientras que el crudo tratado con el catalizador Co_2Mo_8/rGO (muestra 4) resultó con la menor viscosidad con un valor de 44800 cps.

El crudo Maya sin catalizadores contiene una mayor cantidad de azufre y una menor transmitancia. Sin embargo, el crudo Maya con el catalizador Co_2Mo_8/rGO es el que presenta la menor cantidad de azufre después del tratamiento (ver zona de enlace S-O). Sin embargo, de acuerdo con la señal en la Figura 6, el catalizador que hidrogena más es el que tiene Co al 8% y al 10%, ya que la intensidad de picos es mayor. Por lo que se puede suponer que el metal de cobalto es un elemento que nos permite hidrogenar al crudo, mientras que el molibdeno permite romper las cadenas de azufre.

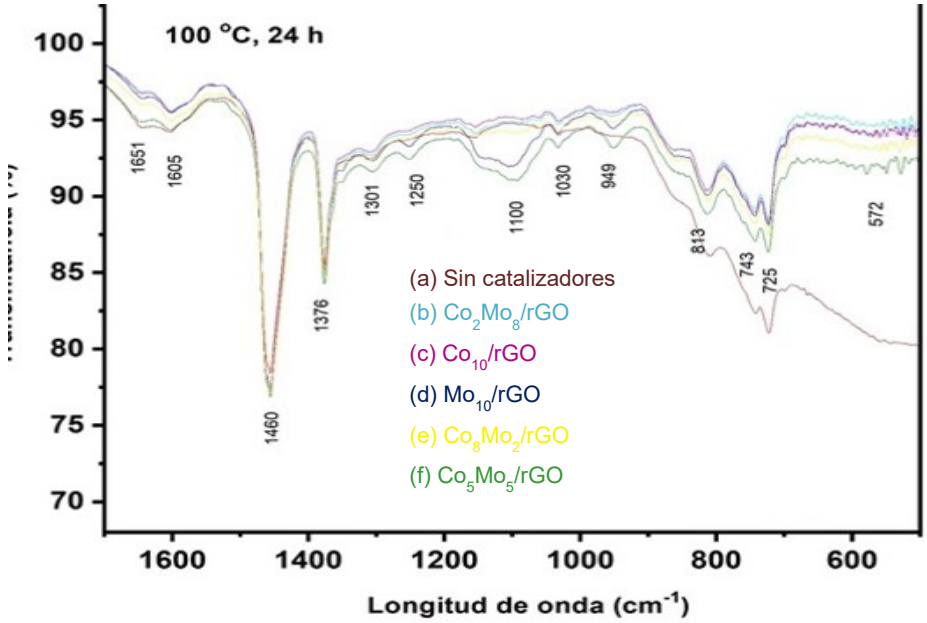


Figura 6. Curvas FT-IR del catalizador Co-Mo/rGO en un crudo Maya después de 24 h a 100 °C.

CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización corroboran la presencia de nanopartículas de Co-Mo uniformemente distribuidas sobre la superficie del óxido de grafeno, teniendo un tamaño de cristalita en un rango de 12 a 25 nm. Las nanoestructuras sintetizadas fueron aplicadas para el proceso de aquatermólisis a un crudo pesado Maya con 3.845 %peso de azufre y una viscosidad inicial de 72800 cps, obteniéndose una reducción del contenido de azufre entre 50 al 85%. La formación de hidrocarburos ligeros y la hidrodesulfuración durante el proceso de aquatermólisis provocaron la disminución del contenido de azufre y con esto la reducción de la viscosidad de manera irreversible, siendo el catalizador Co_2Mo_8/rGO una opción viable ya que al ser evaluado en el crudo Maya se obtuvo una viscosidad de 44800 cps. Esto se confirmó con la técnica de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), ya que después del tratamiento con este catalizador, el crudo Maya mostro un menor contenido de azufre.

BIBLIOGRAFÍA

1. Palacio P., A., Rodríguez V., A., & Guzmán V., E. (2017). *Transporte de Crudos Pesados y Extra-Pesados en Conductos*.
2. Tirado, A., Félix, G., Kwofie, M., Al-Muntaser, A., Varfolomeev, M. A., Yuan, C., & Ancheyta, J., “Kinetics of heavy oil non-catalytic aquathermolysis with and without stoichiometric coefficients”. *Fuel,* 2022, pp. *323*.
3. Chuan, W. U., Guang-Lun, L., Chuan-Jin, Y., Ke-Ji, S., Ping-Yuan, G., & Yan-Bin, C. (2010). Mechanism for reducing the viscosity of extra-heavy oil by aquathermolysis with an amphiphilic catalyst. In J *Fuel Chem Technol* (Issue 6).
4. Guo, K., Li, H., & Yu, Z. (2016). In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review. In Fuel (Vol. 185, pp. 886–902). Elsevier Ltd.
5. Zhao, F., Liu, Y., Wu, Y., Zhao, X., & Tan, L. (2012). Study of catalytic aquathermolysis of heavy oil in presence of hydrogen donor. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, Vol. 48 (4), 2010, pp. 273–276.
6. Maity, S. K., Ancheyta, J., & Marroquín, G. (2010). Catalytic aquathermolysis used for viscosity reduction of heavy crude oils: A review. *Energy and Fuels*, Vol. *24(5)*, 2809–2816.
7. Hao, H.-R., Su, H.-J., Chen, G., Zhao, J.-R., & Hong, L. (2015). Viscosity Reduction of Heavy Oil by Aquathermolysis with Coordination Complex at Low Temperature. *The Open Fuels & Energy Science, 8*, 93–98.
8. Primerano, K., Mirwald, J., & Hofko, B. (2024). Asphaltenes and maltenes in crude oil and bitumen: A comprehensive review of properties, separation methods, and insights into structure, reactivity and aging. In *Fuel* (Vol. 368). Elsevier Ltd.
9. Alvarez-Amparán, M. A., & Cedeño-Caero, L. (2014). Cumene hydroperoxide effect on the oxidative desulfurization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, 13*(3), 787–797.
10. Díaz Barriga Arceo, L., Orozco, E., Mendoza-León, H., Palacios González, E., Leyte Guerrero, F., & Garibay Febles, V. (2007). Nanostructures obtained from a mechanically alloyed and heat-treated molybdenum carbide. *Journal of Alloys and Compounds, 434–435*(SPEC. ISS.), 799–802.
11. Olvera, J. N. R., Gutiérrez, G. J., Serrano, J. A. R., Ovando, A. M., Febles, V. G., & Arceo, L. D. B. (2014). Use of unsupported, mechanically alloyed NiWMoC nanocatalyst to reduce the viscosity of aquathermolysis reaction of heavy oil. *Catalysis Communications, 43*, 131–135.
12. Katritzky, A. R., & Allin, S. M. (1996). Aquathermolysis: Reactions of Organic Compounds with Superheated Water. *Acc. Chem. Res., 29*, 399–406.
13. Rad, M. R., Rashidi, A., Vafajoo, L., & Rashtchi, M. (2014). *Preparation of Co-Mo supported multi-wall carbon nanotube for hydrocracking of extra heavy oil. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20*(6), 4298–4303.
14. Speight, J. (2013). *Heavy and Extra-Heavy Oil Upgrading Technologies* (1st ed.).
15. Zhang, L., Long, X., Li, D., & Gao, X. (2011). Study on high-performance unsupported Ni-Mo-W hydrotreating catalyst. *Catalysis Communications, 12*(11), 927–931.

16. Fan, H., Zhang, Y., & Lin, Y. (2004). *The catalytic effects of minerals on aquathermolysis of heavy oils*. 83, 2035–2039.
17. Greff, J., & Babadagli, T. (2013). Use of nano-metal particles as catalyst under electromagnetic heating for in-situ heavy oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 112*, 258–265.
18. Li, M. H., & Su, Y. L. (2005). The overview of the heavy oil explotation Neimenggu. *Chem. Indust., 3*, 110–112.
19. Muraza, O., & Galadima, A. (2015). Aquathermolysis of heavy oil: A review and perspective on catalyst development. In *Fuel* (Vol. 157, pp. 219–231). Elsevier Ltd.
20. Khansari, Z., Kapadia, P., Mahinpey, N., & Gates, I. D. (2014). A new reaction model for low temperature oxidation of heavy oil: Experiments and numerical modeling. *Energy, 64*, 419–428.
21. Alexandra C., M. (2011). *Influencia de variables en la precipitación de asfaltenos de crudos de petróleo.* Universidad Rey Juan Carlos.
22. Chaparro P., A. (2012). *Explotación de campos maduros empleando sistemas artificiales de producción*. Universidad Nacional Autónoma de México.
23. Durán R., J. F., & Ruiz T., J. (2009). *Explotación de campos maduros, aplicaciones de campo*. Universidad Nacional Autónoma de México.
24. Secretaría de Energía. (2016). *Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2016-2030*.
25. Arboleda, J., Castillo, Á., & Muñoz, S. (2018). Estudio de la acuatermólisis catalítica en procesos de upgrading de crudos pesados como método complementario en el recobro térmico de hidrocarburos. *Revista Fuentes El Reventón Energético, 16*(1), 57–69.
26. Martínez, J. M. (2013). *Estudio de la viscosidad de un aceite extrapesado bajo la influencia de un catalizador Ni10 Mo40 soportado en carbono.* Instituto Politécnico Nacional.
27. Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Características del petróleo*. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html
28. Noriega E., K. G. (2014). *Descripción y funcionamiento del sistema flotante de producción, almacenamiento y descarga "FPSO" para el manejo de hidrocarburos en aguas profundas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
29. PEMEX Exploración y producción, & PEMEX Transformación Industrial. (2021). *Contrato de Compraventa de Petróleo Crudo celebrado entre PEMEX Exploración y Producción y PEMEX Transformación Industrial*.
30. Gaceta Instituto Mexicano del Petróleo. (2022). *Tecnología para transportar y procesar crudos pesados en las refinerías y aumentar su valor*.
31. Li, C., Huang, W., Zhou, C., & Chen, Y. (2019). Advances on the transition-metal based catalysts for aquathermolysis upgrading of heavy crude oil. In *Fuel* (Vol. 257). Elsevier Ltd.
32. Wang, J., Tang, X., Li, J., Guo, E., Guan, W., & Jiang, Y. (2021). Quartz sand proppant loaded with Ni and Mo for in-situ aquathermolysis of heavy oil. *Fuel, 306*.
33. Leyva T., M., & Salazar A., S. I. (2017). *Emisiones, fugas y derrames en el trasporte de hidrocarburos por ductos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
34. Petróleos Mexicanos. (2019, December 5). *Productos Crudo Maya*. https://www.pemex.com/comercializacion/productos/Paginas/petroleo/crudo-maya.aspx.
35. Riazi, M. R. (2005). *Characterization and properties of petroleum fractions* (First).
36. ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*.
37. Trujillo, S., Schmid, W., Lazos, R., & Galván M. del C. (n.d.). *Incertidumbre en la calibración de un viscosímetro Brookfield.* Retrieved October 31, 2023.
38. Wang, J., Tang, X., Li, J., Dai, L., Deng, G., & Zhang, Z. (2022). Sawdust biomass promotes aquathermolysis of extra-heavy oil. *Fuel Processing Technology, 238*.
39. Qu, X., Zhou, G., Lu, Y., Li, S., Zhang, L., Wang, J., & Xu, H. (2022). Catalytic aquathermolysis of Mackay River bitumen with different types of Mo-based catalysts. *Fuel, 326*.
40. Abdelsalam, Y. I. I., Aliev, F. A., Mirzayev, O. O., Sitnov, S. A., Katnov, V. E., Akhmetzyanova, L. A., Mukhamatdinova, R. E., & Vakhin, A. V. (2023). Aquathermolysis of Heavy Crude Oil:

Comparison Study of the Performance of Ni(CH3COO)2 and Zn(CH3COO)2 Water-Soluble Catalysts. *Catalysts, 13*(5).

41. Aguilar G., J. P., Gómez A., R., & Ortega C., G. (n.d.). *Síntesis, caracterización y comparación de Óxido de grafeno reducido mediante láser pulsado de CO2 Y CVD*.
42. Colom, X., Cañavate, J., Lis, M. J., Sanjuan, G., & Gil, I. (2020). *Análisis estructural de Óxidos de Grafeno (GO) y Óxidos de Grafeno reducidos (rGO)*.
43. Tovar M., E. (2017). *Síntesis y Caracterización de Óxido de Grafeno reducido y dopado con N mediante un Proceso Solvotérmico*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
44. Hernández G., C., & Quiroz C., D. M. (2015). *Grafeno: Estado del Arte*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.
45. Hernández L., R. P., Soto L., I., Palacios G., B., Jiménez H., A., Yee G., I., & Aguilar C., L. A. (n.d.). *Síntesis y caracterización del grafeno, a partir del método de hummers y reducción térmica con ácido ascórbico*. Retrieved November 13, 2023, from https://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion1/S1-BYQ03.pdf.
46. Soto L., I., Jiménez H., A., Meléndez B., L., Castro L., A., & López O., G. (2015, September 23). *Síntesis y caracterización de grafeno, por del método de Hummers y posterior reducción térmica con ácido ascórbico*. 989–992.

MATERIALES FOTOSENSIBLES CON VALOR AGREGADO AMBIENTAL PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN CELDAS SOLARES DE TERCERA GENERACIÓN

Luis Alejandro Ocegueda-Ventura[1], José R. Rangel-Méndez[2], Luis F. Cházaro-Ruiz[2], Arturo Díaz-Ponce[1] y Carlos A. Pineda-Arellano[1]

[1]Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., [2]Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

alejandrov@cio.mx

RESUMEN

El sol es una fuente importante de energía gratuita e inagotable para el planeta Tierra. Actualmente, se emplean nuevas tecnologías para generar electricidad a partir de la energía solar colectada (energía fotovoltaica). Estos enfoques ya han sido probados y se practican ampliamente en todo el mundo como alternativas renovables a las tecnologías no hidroeléctricas convencionales [1]. Este trabajo presenta el efecto del tiempo de síntesis de microesferas de dióxido de titanio en la morfología y dimensiones de las mismas, la influencia del material dopante cobre en esta estructura cristalina en la eficiencia de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) evaluado como factor de reducción de la brecha de energía de los materiales y la mejora de las características opto-eléctricas; y la influencia del grado de reducción de óxido de grafeno (GO) en DSSCs utilizando la técnica de electroforesis a distintos tiempos como mecanismo de reducción. Se caracterizaron los materiales a través de pruebas como espectrofotometría UV-Vis, SEM, XRD y técnicas fotoelectrocatalíticas; los parámetros eléctricos de las celdas fueron evaluados en un simulador solar AAA, obteniendo valores de eficiencia de los prototipos.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una de las problemáticas con mayor impacto entre la sociedad moderna, esto esta influenciado por los cada vez más evidentes sucesos ambientales que nos rodean. Estos cambios se atribuyen al aumento de concentración global de gases de efecto invernadero como resultado de la actividad humana, particularmente por el uso de combustibles fósiles. Es importante tratar esta problemática de manera eficaz y anticipando mayores consecuencias a su eminente llegada [2].

En la actualidad, las celdas solares de silicio son la tecnología más comercializada en el mercado fotovoltaico, pero su costoso procedimiento de fabricación es su principal inconveniente. Debido a esto, se ha cosechado una gran motivación para la exploración de celdas solares de tercera generación, como celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC), celdas solares de perovskita (PSC), celdas solares orgánicas/poliméricas (OSC) y celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos (QDSSC) [3].

TEORÍA

El dióxido de titanio (TiO_2) representa uno de los semiconductores más utilizados en la fabricación de celdas solares de tercera generación, esto debido a sus características ópticas, como lo son su área superficial, alta porosidad y gran capacidad de dispersión de la luz [4]. A pesar de estas características llamativas, su relativa amplia banda de energía y su fácil capacidad de recombinación de portadores de carga, siguen representando claras desventajas [5].

Debido a estas limitantes, el dopaje del TiO_2 ha constituido una ruta de investigación bastante amplia que abre un abanico de posibilidades y aplicaciones a la síntesis de materiales. La utilización de iones metálicos como el cobre (Cu) no solo mejoran el desempeño foto-catalítico del TiO_2, sino que también promueve la reducción de la banda de energía (E_{BG}), mejora la respuesta óptica, suprime la recombinación de portadores de carga, mejora la adsorción de colorante e incrementa las eficiencias de las celdas fabricadas [6], [7], [8].

Por otro lado, el uso de materiales basados en carbono ha despertado también el interés científico en la aplicación de celdas solares. El óxido de grafeno reducido (rGO) es uno de los materiales que destacan en los últimos años, debido a sus propiedades excepcionales: una excelente conductividad térmica y eléctrica, una gran área específica y una estructura del tipo membrana, por lo que es un gran candidato para su integración con TiO_2, esto debido a que dicha estructura puede facilitar la interacción entre enlaces intermoleculares para producir un material compuesto ideal [4], [9].

PARTE EXPERIMENTAL

La metodología se basa principalmente en tres procesos: síntesis de TiO_2 con distintos tiempos de tratamiento solvotermal, síntesis de TiO_2:Cu a distintas concentraciones para creación de celdas solares y reducción de GO para analizar su impacto en la eficiencia de celdas solares.

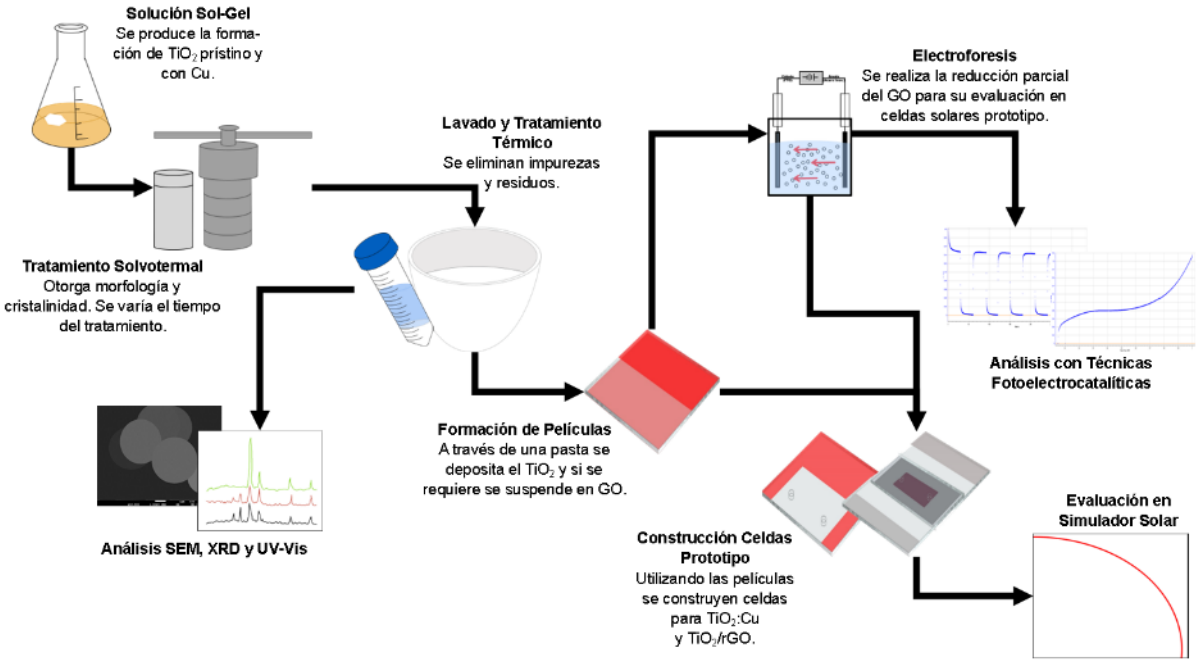


Fig. 1 Esquema General de Metodología Utilizada para la Síntesis de TiO_2, TiO_2:Cu y TiO_2/rGO; y su Integración en DSSCs

RESULTADOS

Los materiales de TiO_2:Cu, muestran mejores características al TiO_2 prístino, esto debido a que es sabido que la inclusión de iones metálicos en semiconductores mejoran sus propiedades ópticas y fisicoquímicas, aumentando el rango de absorbancia de estos provocando una reducción en la E_{BG}, una transferencia de cargas mejorada y una adsorción del colorante superior [10], [11]. Se puede observar cómo la muestra de 0.5 %wt presenta una mayor absorbancia del espectro visible con la consecuente disminución de la brecha de energía. (Figura 2, Figura 3, Tabla 1)

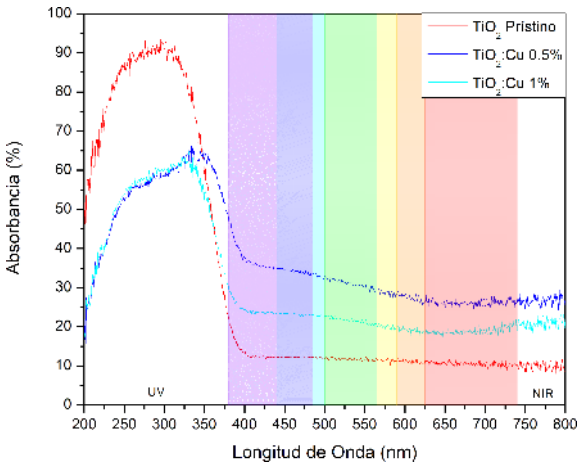


Fig. 2 Espectros de Absorbancia de TiO_2:Cu

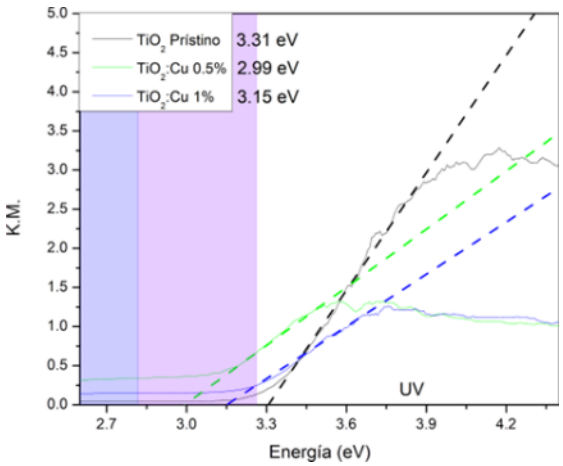


Fig. 3 Aproximaciones de Brecha de Energía de TiO_2:Cu

Tabla 1. Parámetros Obtenidos de DSSC Configuradas con TiO_2:Cu

PARÁMETROS ELÉCTRICOS OBTENIDOS DE LAS CELDAS SOLARES TiO_2:Cu				
Dopaje de Cu [%]	**V_{oc} [mV]**	**J_{sc} [mA/cm^2]**	**FF [%]**	**PCE [%]**
Prístino	538.30 ±14.00	0.26 ±0.03	55.21 ±0.66	0.15 ±0.02
0.5 %	587.30 ±0.10	0.85 ±0.06	61.28 ±3.21	0.61 ±0.01
1 %	564.50 ±5.90	0.33 ±0.05	64.01 ±2.10	0.24 ±0.03

Se puede observar, en las muestras de TiO_2 prístino, a diferentes tiempos de síntesis solvotermal, que se presentan los picos característicos de la fase cristalina anatasa, que es sabido tiene mayor actividad y es más estable en procesos fotosensibles [12]. Además, se obtuvieron los tamaños de cristal de las muestras para comparar su cristalinidad, pudiendo observar que en la muestra de 2 h se obtienen una mayor cristalinidad. La cristalinidad juega un papel importante en aplicaciones solares, ya que se encuentra relacionado con la fotosensibilidad influyendo en el comportamiento de transportadores de carga [13], [14]. (Figura 4, Figura 5, Tabla 2)

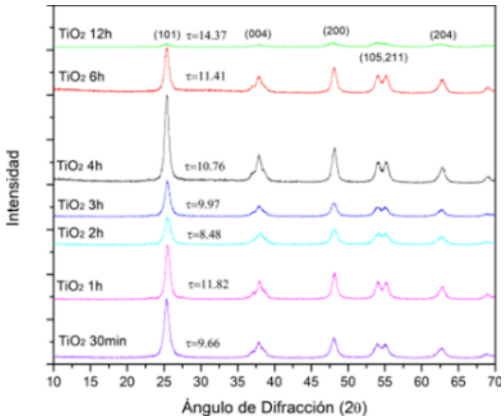


Fig. 4 Difractómetros de Muestras de TiO_2 Prístino

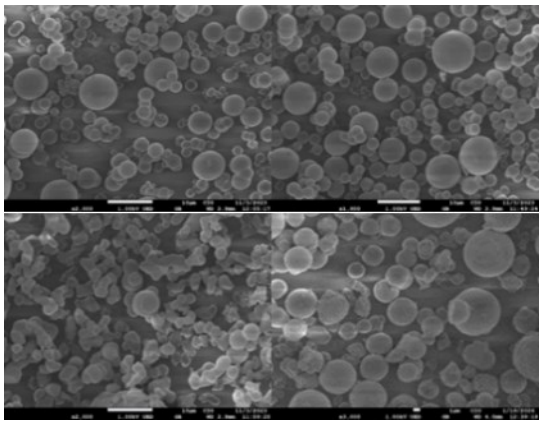


Fig. 5 Imágenes SEM de Muestras de TiO_2 Prístino

Tabla. 2 Diámetro Promedio de Esferas Sintetizadas

EFECTO DEL TIEMPO DE SÍNTESIS	
Tiempo de Síntesis [h]	**Diámetro Promedio [µm]**
0.5	3.5
1	3.9
2	4.2
3	4.5
4	3.5
6	5.2
12	8.0

Finalmente, se analizaron los materiales de TiO_2/rGO, obtenidos de la reducción parcial por electroforesis. A través de métodos fotoelectroquímicos, tales como Voltamperometría Lineal, se puede observar que se obtuvieron mejores resultados en las muestras donde la reducción se llevó a cabo en el cátodo, destacando principalmente la muestra donde se redujo durante 10 min. Por otro lado, estos materiales se evaluaron usando la técnica de Cronoamperometría con la finalidad de determinar su respuesta de fotocorriente en la presencia de periodos de oscuridad e iluminación y la muestra con el depósito de GO reducido durante 10 min en el cátodo muestra estabilidad y la mejor respuesta de generación de portadores de cargas. Esto nos permite comprender de manera anticipada el desempeño y optimizar su uso en aplicaciones específicas como celdas solares. Finalmente, cuando las muestras fueron depositadas como película activa en las DSSC se observa que dicho material permite obtener mejores parámetros de las celdas. (Figura 6, Figura 7, Tabla 3)

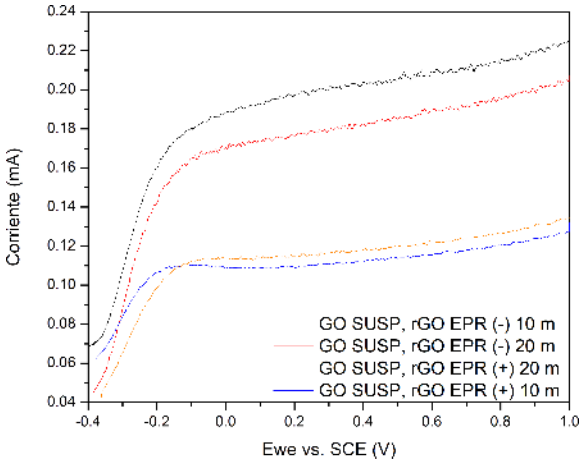


Fig. 6 Voltamperometría de Barrido Lineal de TiO_2/rGO

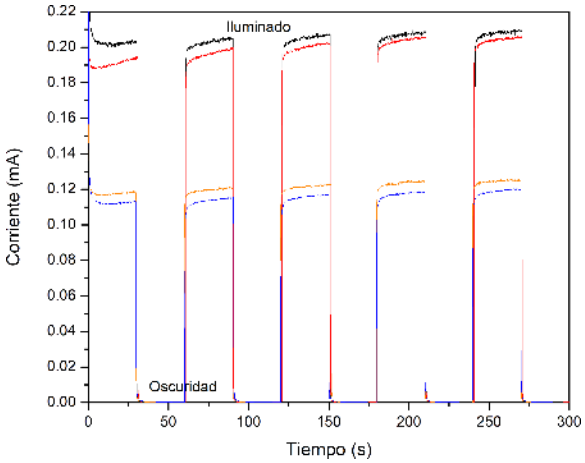


Fig. 7 Cronoamperometría de TiO_2/rGO

Tabla. 3 Parámetros Obtenidos de DSSC Configuradas de TiO_2/rGO

PARÁMETROS ELÉCTRICOS OBTENIDOS DE CELDAS SOLARES CON rGO				
Tiempo de Reducción	**V_{oc} [mV]**	**J_{sc} [mA/cm^2]**	**FF [%]**	**PCE [%]**
5 min	453.2949 ±0.2382	0.1759 ±0.0063	49.0796 ±1.5097	0.0391 ±<0.0001
10 min	522.7051 ±5.9221	0.4511 ±0.0182	33.5940 ±1.3767	0.0791 ±<0.0001
20 min	508.6381 ±5.3009	0.3294 ±0.0026	35.9542 ±0.4501	0.0602 ±<0.0001

De esta manera, a través de distintas técnicas de caracterización, se obtienen resultados importantes y no excluyentes, como la introducción de un decorado de GO parcialmente reducido que podría acoplarse a TiO_2:Cu para obtener una configuración más compleja y con características opto eléctricas mejoradas que se traduzcan en una mayor eficiencia en la celdas solares prototipo, además de obtener partículas más pequeñas, lo cual permitiría mejorar el desempeño fotosensible de las películas, convergiendo estos factores en una celda solar con una generación de potencia eléctrica y eficiencias superiores.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron datos concluyentes para ser aplicados a una celda solar que comprenda los distintos resultados, pudiendo obtener un aumento de eficiencia considerable a comparación de una DSSC con configuración tradicional. Se obtuvo un porcentaje de dopaje de Cu que sobresale en su eficiencia comparándola con otros porcentajes, comprobando el efecto del dopaje en semiconductores. Se encontró un tamaño de partícula considerablemente pequeño, con una cristalinidad adecuada que permitía incorporar estos materiales en las DSSC, logrando mejorar la metodología de obtención de TiO_2. Además, se observó el efecto que tienen el grado de reducción del GO en la eficiencia de celdas solares, encontrando una configuración que permite obtener mejores resultados. Finalmente, estos vectores ayudan a un futuro tener una configuración más compleja, eficiente y novedosa que resulta en una celda con características mejoradas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, y K. H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 894–900, feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.09.094.

[2] B. Gething y K. Puckett, *Design for climate change*. Consultado: el 20 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.routledge.com/Design-for-Climate-Change/Puckett-Gethering/p/book/9781859464489

[3] M. Ramya, T. K. Nideep, V. P. N. Nampoori, y M. Kailasnath, “The impact of ZnO nanoparticle size on the performance of photoanodes in DSSC and QDSSC: a comparative study”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, núm. 3, pp. 3167–3179, feb. 2021, doi: 10.1007/S10854-020-05065-0/METRICS.

[4] L. Van Cuong *et al.*, “Effect of reducing agents on co-precipitation synthesis of titanium dioxide/reduced graphene oxide composite materials for upgrading the performance of dye-sensitized solar cells”, *Chem Eng Sci*, vol. 264, p. 118145, dic. 2022, doi: 10.1016/J.CES.2022.118145.

[5] M. Dhonde, K. Sahu, y V. V. S. Murty, “Cu-doped TiO2 nanoparticles/graphene composites for efficient dye-sensitized solar cells”, *Solar Energy*, vol. 220, pp. 418–424, may 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.03.072.

[6] M. Dhonde, K. Sahu, V. V. S. Murty, S. S. Nemala, y P. Bhargava, “Surface plasmon resonance effect of Cu nanoparticles in a dye sensitized solar cell”, *Electrochim Acta*, vol. 249, pp. 89–95, sep. 2017, doi: 10.1016/J.ELECTACTA.2017.07.187.

[7] M. Dhonde, K. Sahu, V. V. S. Murty, S. S. Nemala, P. Bhargava, y S. Mallick, “Enhanced photovoltaic performance of a dye sensitized solar cell with Cu/N Co-doped TiO2 nanoparticles”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, núm. 8, pp. 6274–6282, abr. 2018, doi: 10.1007/S10854-018-8605-3/TABLES/1.

[8] A. Gupta, K. Sahu, M. Dhonde, y V. V. S. Murty, “Novel synergistic combination of Cu/S co-doped TiO2 nanoparticles incorporated as photoanode in dye sensitized solar cell”, *Solar Energy*, vol. 203, pp. 296–303, jun. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.04.043.

[9] E. Muchuweni, B. S. Martincigh, y V. O. Nyamori, “Recent advances in graphene-based materials for dye-sensitized solar cell fabrication”, *RSC Adv*, vol. 10, núm. 72, pp. 44453–44469, dic. 2020, doi: 10.1039/D0RA08851J.

[10] K. H. Ko, Y. C. Lee, y Y. J. Jung, “Enhanced efficiency of dye-sensitized TiO2 solar cells (DSSC) by doping of metal ions”, *J Colloid Interface Sci*, vol. 283, núm. 2, pp. 482–487, mar. 2005, doi: 10.1016/J.JCIS.2004.09.009.

[11] K. M. Reddy, B. Baruwati, M. Jayalakshmi, M. M. Rao, y S. V. Manorama, “S-, N- and C-doped titanium dioxide nanoparticles: Synthesis, characterization and redox charge transfer study”, *J Solid State Chem*, vol. 178, núm. 11, pp. 3352–3358, nov. 2005, doi: 10.1016/J.JSSC.2005.08.016.

[12] T. Luttrell, S. Halpegamage, J. Tao, A. Kramer, E. Sutter, y M. Batzill, “Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO2 films”, *Scientific Reports 2014 4:1*, vol. 4, núm. 1, pp. 1–8, feb. 2014, doi: 10.1038/srep04043.

[13] R. Gupta *et al.*, “Enhanced photosensitive properties of a single-crystal formamidinium lead bromide iodine (FAPbBr2I) based photodetector”, *Mater Adv*, vol. 3, núm. 4, pp. 2089–2095, feb. 2022, doi: 10.1039/D1MA01096D.

[14] X. Li, Y. Xiao, S. Wang, Y. Yang, Y. Ma, y X. Li, “Polymorph-induced photosensitivity change in titanylphthalocyanine revealed by the charge transfer integral”, *Nanophotonics*, vol. 8, núm. 5, pp. 787–797, may 2019, doi: 10.1515/NANOPH-2018-0223/ASSET/GRAPHIC/J_NANOPH-2018-0223_FIG_009.JPG.

ANALISIS ESTADISTICO DE UN DISPOSITIVO PARA LA VALIDACIÓN DE LA MEDICION DEL MOVIMIENTO BRANQUIAL EN ABULONES MEDIANTE AL TECNICA DE DETECCIÓN SINCRONA

Javier Yañez Mendiola

CIATEC
jyanez@ciatec.mx

RESUMEN

El cambio climático ha hecho que muchas especias marinas cambien sus hábitos, por ello, es importante conocer algunos parámetros biológicos. A través de un proyecto de investigación se desarrolló un dispositivo para medir el movimiento branquial en abulones. El dispositivo mide el movimiento branquial mediante la técnica de pletismografía y a través del método de detección síncrona[1] se determina la frecuencia del movimiento branquial.

Un punto importante es la validación del dispositivo, por ello, se presenta el trabajo realizado para la validación de los datos capturados mediante diferentes técnicas estadísticas. Los resultados obtenidos nos permitieron validar el dispositivo desarrollado.

INTRODUCCIÓN

La abulón es de gran importancia comercial y económica en México, en específico en la costa oeste de la península de Baja California [1] debido a que dichas costas son el único lugar de la república mexicana donde se lleva a cabo la captura y cultivo del mismo [2]. Durante los últimos años se ha registrado una disminución en las capturas de abulones, esto se le atribuye tanto a la sobre explotación de la pesca, como a las fluctuaciones de la temperatura debidas a las condiciones ambientales [3]. Hay estudios que han demostrado que la temperatura es un factor significativo debido a la vulnerabilidad de estos individuos ante los cambios térmicos y por la capacidad de este factor de penetrar barreras físicas y tener efectos potencialmente graves sobre la estructura de todas las macromoléculas

La fotopletismografía es una técnica de medición óptica que es empleada para medir los cambios de volumen en el tejido microvascular [4] que tiene una amplia aplicación clínica, por ejemplo, la oximetría de pulso y la señal del pulso cardiaco. El principio de funcionamiento es muy sencillo: requiere de una fuente de luz que incide sobre la piel y la luz que, una vez que ha interactuado con la piel ya sea por transmisión o por reflexión, se recolecta para ser procesada. La interacción de la luz con la piel es algo complejo [5] y hay muchos factores que afectan la cantidad de luz recibida por el sensor, por ejemplo, el efecto que tiene la presión que se ejerce sobre el sensor [6]. Si bien la técnica para procesar la señal a través del método de pletismografía es bien conocida, donde principalmente se emplea una sola fuente de luz para el caso general de obtener el pulso cardiaco, pero para el caso de la oximetría de pulso se requiere de dos fuentes de luz a diferentes longitudes de onda. Proponemos que a través de la configuración de la oximetría de pulso y, mediante un tren de pulso, medir el movimiento branquial de la abulón, mismo que es recuperado por la técnica de detección síncrona [7]. El objetivo del trabajo es medir los movimientos branquiales en la abulón.

DESARROLLO TEÓRICO

Para la lectura de datos en la abulón se desarrolló un sistema de medición como se muestra en la figura 1

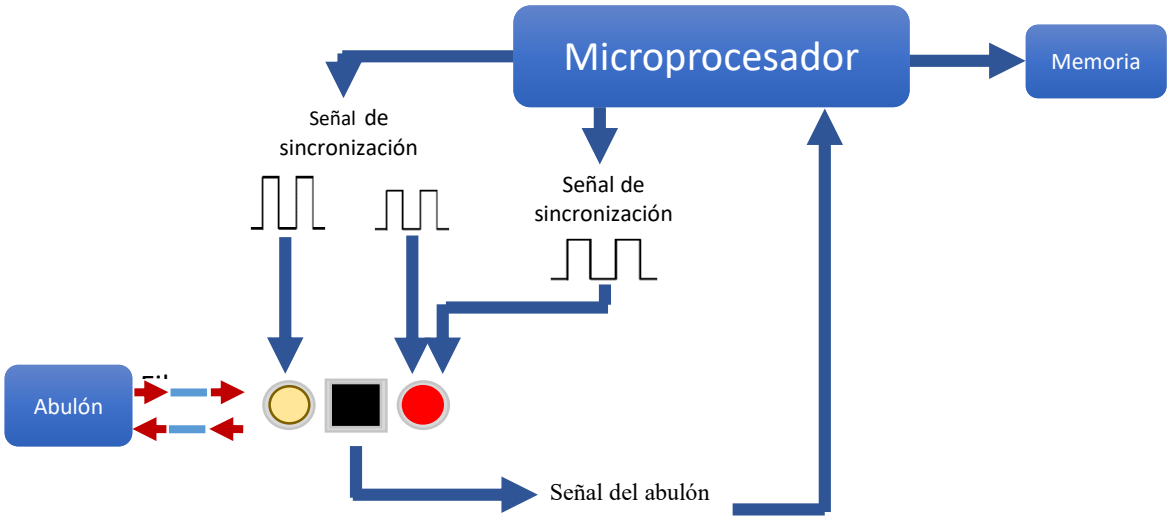


Figura 1. Configuración del circuito diseñado para la lectura de datos en la abulón

De la figura se puede mostrar las partes importantes del diseño del circuito. El microprocesador mediante la configuración de control de modulación por pulso (PWM, por sus siglas en inglés) genera un tren de pulso en los dos leds utilizados (el tren de pulsos tiene una frecuencia de 122Hz). Un led emite a una longitud de onda de 660nm y un segundo led a 950nm. Cada led se enciende por un periodo de 8 pulso, es decir, un led queda enciendo un periodo y durante ese periodo el otro led está apagado y viceversa. Entre cada periodo hay un tiempo que los dos leds están apagados para con ello evitar aliasing en la lectura de la señal en el sensor como se aprecia en la figura 2.

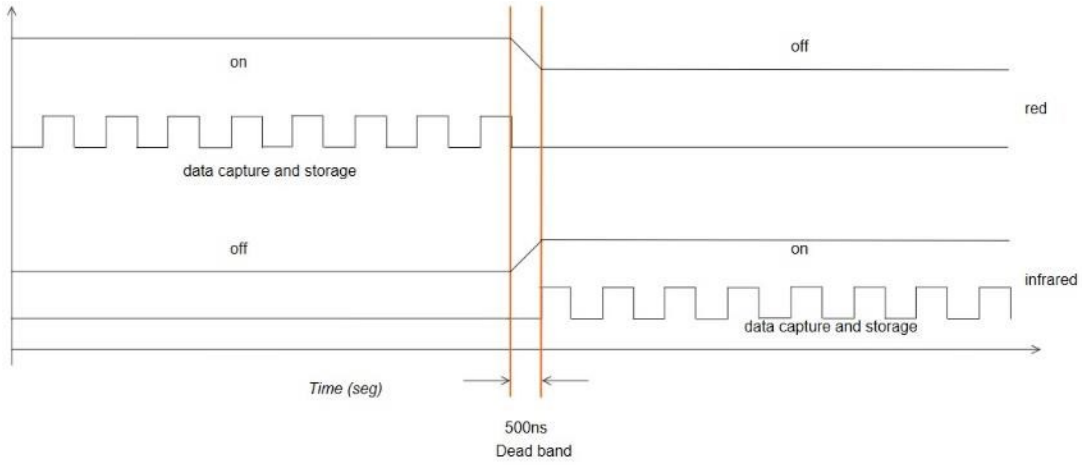


Figura 2. Tiempos de encendido de los leds para evitar aliasing en la lectura de datos en el sensor

La señal es recuperada mediante un circuito en la configuración de transimpedancia y que mediante un filtro paso bajas, la señal del tren de pulso, es transformada en una señal senoidal de la siguiente forma

$$X(t) = \left[t_p(t)\right] * F_{pb} = A + Bcos\left(\omega_p t\right) \quad (1)$$

Donde:

$t_p(t)$ es el tren de pulso generado por el circuito

F_{pb} es el filtro pasa bajas

$A\ y\ B$ son constantes, ω_p es la frecuencia angular del tren de pulso y t es el tiempo

La señal recuperada es transformada en una señal digital por el microprocesador y almacenada en la memoria del circuito diseñado para su posterior tratamiento.

A la señal recuperada se le aplica el método de detección síncrona, es decir, mediante este método se busca recuperar la amplitud de la señal recuperada a sabiendas de la siguiente suposición de que la amplitud del tren de pulso es modificada por el movimiento branquial. Donde suponemos lo siguiente:

$$y(t) = p(t)X(t) \quad (2)$$

Quedando la ecuación 2 expresada como sigue:

$$\mathrm{y(t)} = Ap(t) + Bp(t)\cos\left(\omega_p t\right) \quad (3)$$

Donde

$p(t)$ describe el movimiento branquial

RESULTADOS

La aplicación del método se realiza mediante el diagrama siguiente mostrado en la figura 3, pero se genera dos señales senoidales $\left(sen\left(\omega_p,t\right),\ \cos\left(\omega_p,t\right)\right)$ a una frecuencia similar a la del tren de pulsos $\left(\omega_p,\ \approx\ \omega_p\right)$ para la aplicación del método.

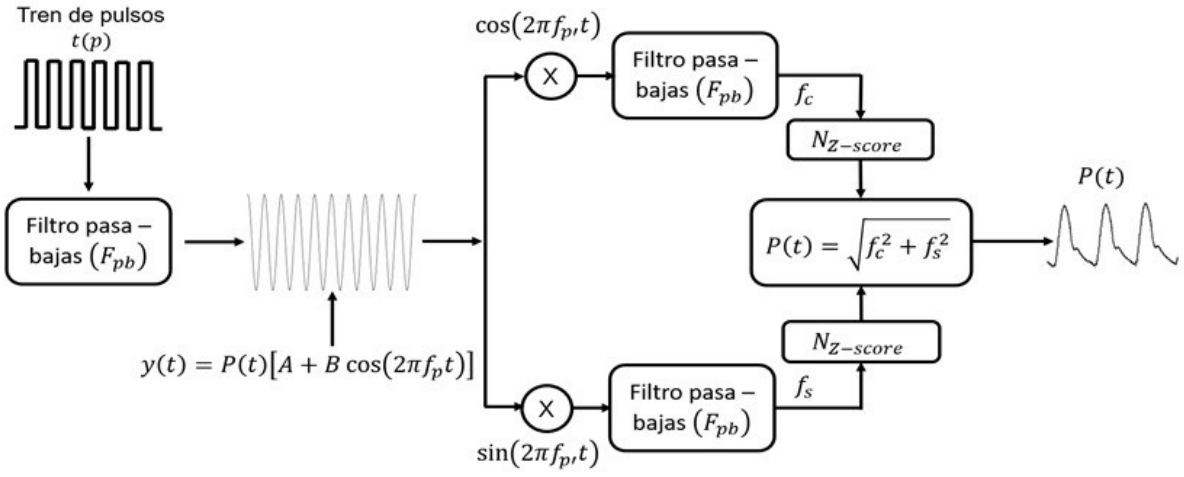


Figura 3. Método de detección síncrona

De la figura $N_{z-score}$ es el procedimiento estadístico conocido como normalización $N_{min-max}$ y definido como $N_{min-max} = (f - min)/(max - min)$

$|P(t)|$ es la magnitud de los componentes senoidales y representa el movimiento branquial.

La tabla 1 son parte de los datos recolectados de las abulones.

Tabla 1. Porción de datos obtenidos de la medición en abulones. La primera columna indica el número de datos y la secuencia de datos

1	72	73	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	72	71	72	72	73	74
21	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	72	71	72	72	73	74	75	76	77	78
41	78	77	76	75	74	73	72	71	72	72	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75
61	74	73	72	72	72	72	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	72	72
81	72	72	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	73	72	72	73	73	74
101	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	73	72	72	73	73	74	75	76	77	78
121	78	77	76	75	74	73	72	72	72	73	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75
141	74	73	72	72	72	72	73	74	75	76	77	77	78	77	76	75	74	73	73	72
161	72	73	73	74	75	76	77	78	78	77	76	75	74	73	73	72	72	73	73	74
181	75	76	77	77	78	77	76	75	74	74	73	72	72	73	73	74	75	76	77	78
201	78	77	76	75	74	74	73	72	72	73	73	74	75	76	77	77	78	77	76	75
221	74	74	73	72	72	73	73	74	75	76	77	77	78	77	76	75	74	74	73	72
241	72	73	73	74	75	76	77	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	73	74
261	75	76	76	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	73	74	75	76	77	77
281	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	73	74	75	76	77	77	78	77	76	75
301	74	74	73	72	72	73	74	74	75	76	77	77	77	77	76	75	74	74	73	72
321	72	73	74	74	75	76	76	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	74	74
341	75	76	76	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	74	74	75	76	76	77
361	77	77	76	75	74	73	73	72	72	73	74	74	75	76	76	77	77	77	76	75
381	74	73	73	72	72	73	74	74	75	76	77	77	77	77	76	75	74	74	73	72
401	72	73	74	74	75	76	77	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	74	74
421	75	76	77	77	77	77	76	75	74	74	73	72	72	73	74	75	75	76	77	77
441	77	76	76	75	74	74	73	72	72	73	74	75	75	76	76	77	77	76	76	75
461	74	74	73	72	72	73	74	75	75	76	77	77	77	76	76	75	74	73	73	72
481	72	73	74	74	75	76	77	77	77	76	76	75	74	73	73	72	72	73	74	75
501	75	76	77	77	77	76	76	75	74	73	73	72	72	73	74	75	75	76	77	77
521	77	76	75	75	74	73	73	72	72	73	74	75	75	76	77	77	77	76	75	75
541	74	73	73	72	72	73	74	75	75	76	77	77	77	76	75	75	74	73	72	72
561	72	73	74	75	75	76	77	77	77	76	75	75	74	73	72	72	72	73	74	75
581	75	76	76	77	77	76	75	75	74	73	72	72	72	73	74	75	75	76	77	77
601	77	76	75	74	74	73	72	72	72	73	74	74	75	76	77	77	77	76	75	74
621	74	73	72	72	72	73	74	74	75	76	77	77	77	76	75	74	74	73	72	71
641	72	73	73	74	75	76	77	77	77	76	75	74	73	73	72	71	72	73	73	74
661	75	76	76	77	77	76	75	74	73	73	72	71	71	72	73	74	75	76	76	77
681	77	76	75	74	73	73	72	71	71	72	73	74	75	76	76	77	77	76	75	74
701	73	72	72	71	71	72	73	74	75	76	76	77	77	76	75	74	73	72	72	71
721	71	72	73	74	75	76	76	77	77	76	75	74	73	72	72	71	71	72	73	74
741	75	76	76	77	77	76	75	74	73	72	72	71	71	72	73	74	75	75	76	77
761	77	76	75	74	73	72	71	71	71	72	73	74	75	75	76	77	77	76	75	74
781	73	72	71	71	71	72	73	74	74	75	76	77	77	76	75	74	73	72	71	70

Este conjunto de datos en forma gráfica se muestra en la figura 4, pero aplicando el procedimiento estadístico de normalización

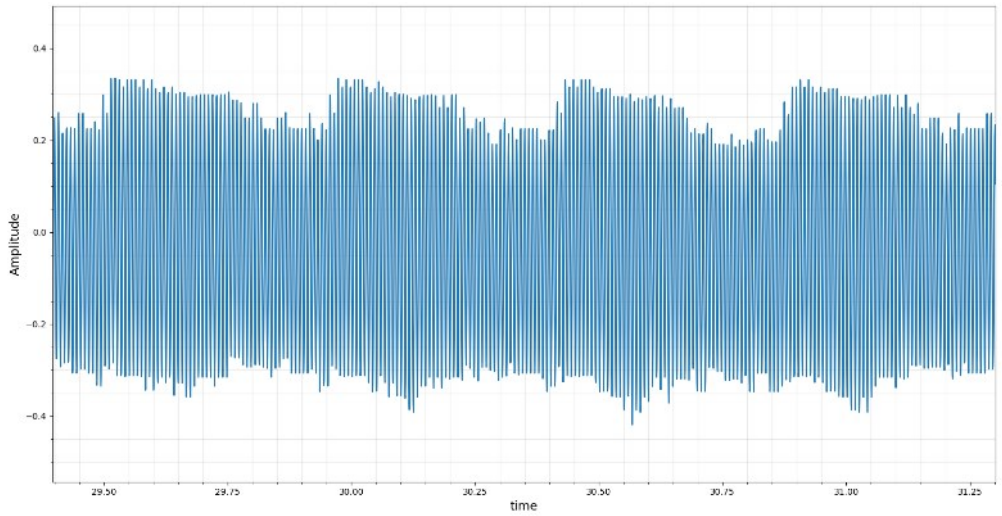


Figura 4. Datos de la abulón una vez aplicado el procedimiento estadístico de normalización

Aplicando el procedimiento de la figura 3, se tiene el comportamiento de movimiento branquial como se muestra en la figura 5

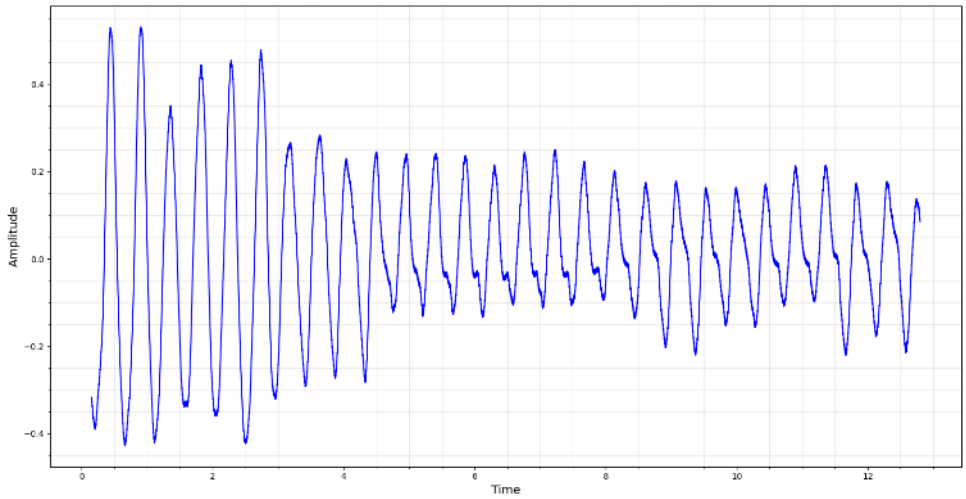


Figura 5. Resultado de aplicar el método de detección síncrona

TRATAMIENTO DE DATOS

Como primer punto se realizó un análisis en el campo de Fourier para revisar las señales que se pueden encontrar en los datos. La figura 6 muestra la gráfica de los datos del dispositivo.

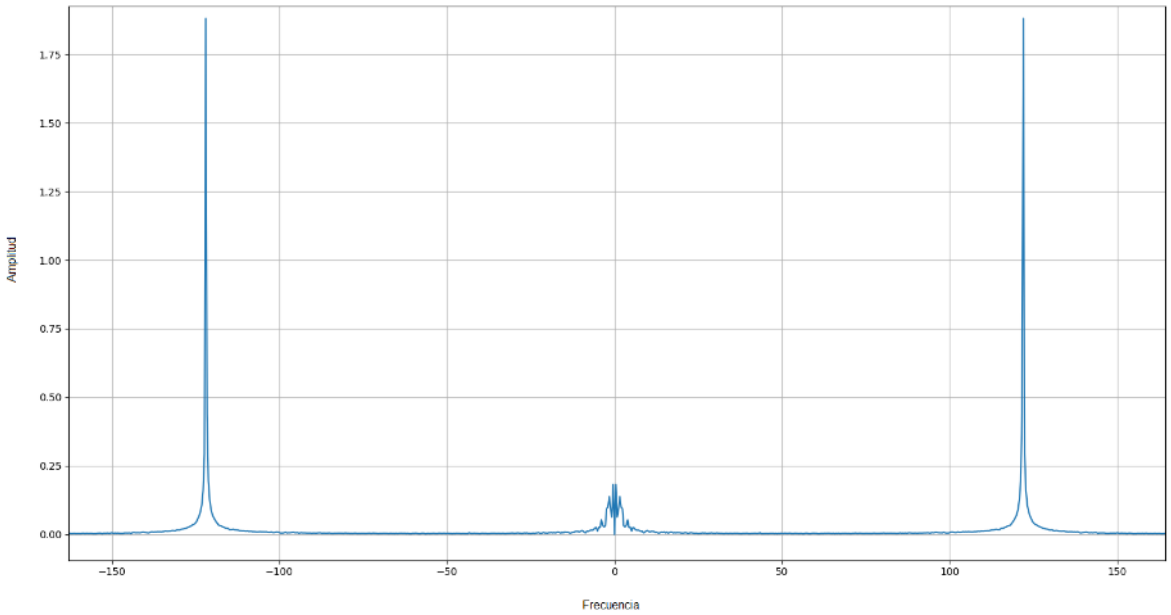


Figura 6. Frecuencias presentes en la señal recuperada del dispositivo

De la figura 6 se puede apreciar las señales principales presentes, donde destacan las señales de oscilación del par de leds utilizados, mismos que oscilan a una frecuencia de 120Hz. En la parte central se encuentra la información de la oscilación de las branquias de la abulón.

La figura 7 muestras la frecuencia de oscilación de las branquias de la abulón.

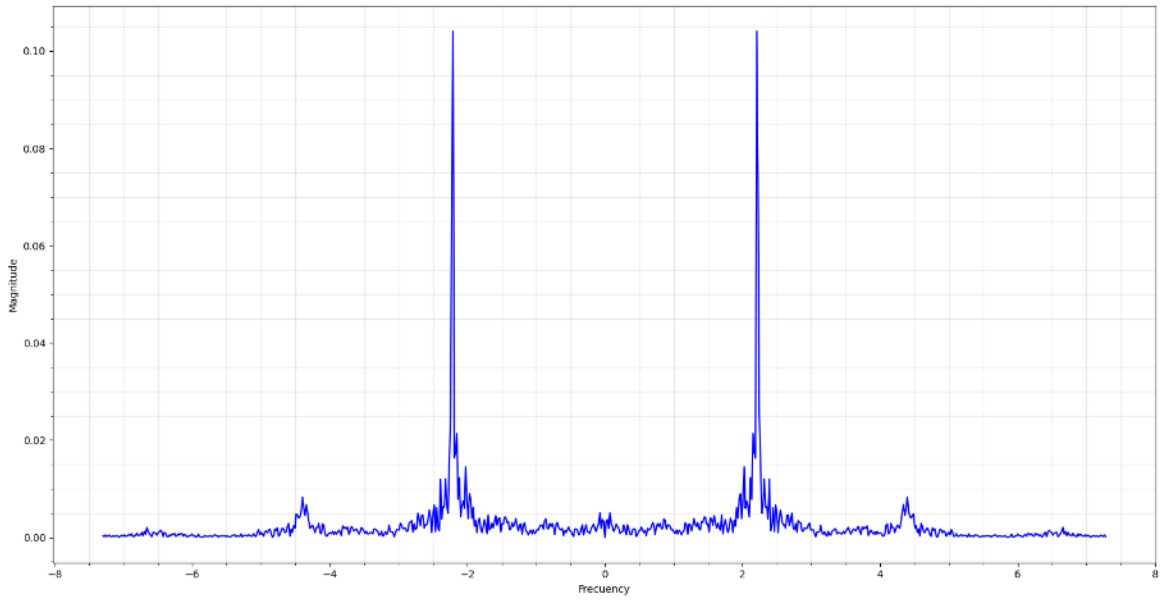


Figura 7. Frecuencia de oscilación de las branquias de la abulón

Otro aspecto importante en el tratamiento de los datos es mediante la estadística. Se realizó una prueba de ajuste de bondad con un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$ a una curva normal con la hipótesis nula siguiente: H_o: $Los\ datos\ tienen\ una\ distribución\ normal$ e hipótesis alternativa H_1: $los\ datos\ no\ tiene\ una\ distibución\ normal$. Por lo que, se realizó un análisis con los datos, para

calcular el valor de $X^2_{0.01}$. Para un conjunto de 10 intervalos y 7 grados de libertad se obtuvo una $X^2 = 16$ que resulto inferior a $X^2_{0.01} = 18.48$ a corde a la tabla de $Chi - cuadrada$ [8], con lo que acepta la hipótesis nula.

CONCLUSIONES

Se diseñó un dispositivo para la medición del movimiento branquial en abulones. El método de obtención de datos se realizó mediante la técnica de fotopletismografía, mediante un par de leds (rojo e infrarrojo). Para el tratamiento de los datos se empleó la técnica de detección síncrona. Una vez realizado el análisis de los datos se observó que el diseño del dispositivo fue bueno, pues en la graficas se puede observar una muy buena señal en comparación el ruido generado, tanto por el diseño, como también, el ruido ambiental. Además, los datos presentan un comportamiento estadístico normal. Que quizás lo más crítico en el diseño del dispositivo es el diseño de los filtros empleados, que con un orden mayor podría reducir el ruido, pero eso comprometería el tamaño del dispositivo, dado que aumentaría el peso y el tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

1. Challoner, A. V.; Ramsay, C. A. A Photoelectric Plethysmograph for the Measurement of Cutaneous Blood Flow. Phys Med Biol 1974, 19 (3), 317–328. https://doi.org/10.1088/0031-9155/19/3/003.
2. Anderson, R. R.; Parrish, J. A. The Optics of Human Skin. Journal of Investigative Dermatology 1981, 77 (1), 13–19. https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12479191.
3. Hertzman, A. B. The Blood Supply of Various Skin Areas as Estimated by the Photoelectric Plethysmograph. American Journal of Physiology-Legacy Content 1938, 124 (2), 328–340. https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1938.124.2.328.
4. Optical Shop Testing, 3rd ed.; Malacara, D., Ed.; Wiley series in pure and applied optics; Wiley-Interscience: Hoboken, N.J, 2007.
5. Bruning, J. H.; Herriott, D. R.; Gallagher, J. E.; Rosenfeld, D. P.; White, A. D.; Brangaccio, D. J. Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses. Appl. Opt., AO 1974, 13 (11), 2693–2703. https://doi.org/10.1364/AO.13.002693.
6. Bautista López, R.Z.; Yáñez Mendiola, J.; Sicard González, M.T. Branchial Motion Assessment in Abalone Using Photoplethysmography. Aquac. Res. 2023, 2023, 6672198
7. Pantoja-Pacheco, Y.V.;Yáñez-Mendiola, J. Method for the Statistical Analysis of the SignalsGenerated by an Acquisition Card for Pulse Measurement. Mathematics 2024, 12, 923. https://doi.org/10.3390/ math12060923
8. Francisco Garcia, Jorge Sierra y Virginia Guzmán; Simulación de sistemas para la administración e ingeniería; CECSA, primera edición 2005.

SISTEMA OPTOELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE MADURACIÓN EN NARANJAS USANDO REDES NEURONALES

Dania Paola Resendez-Herrera[1], José David Filoteo-Razo[1], José Ramon Martínez Angulo[1], Juan Carlos Elizondo-Leal[1], Alan Díaz-Manríquez[1], Vicente Paul Saldívar-Alonso[1] y Juan Carlos Hernández-García[2, 3]

[1]Facultad de ingeniería y Ciencias, Centro Universitario Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Matamoros SN, CP 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas, México.[2]Departamento de ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca 36787, México. [3]Investigadoras e Investigadores por México CONAHCYT, Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías, Benito Juárez 03940, México.

darazo@uat.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo, presentamos un sistema optoelectrónico no invasivo y de bajo costo para detectar cambios de color en naranjas y predecir de esta forma su estado de maduración. El sensor fue diseñado para poder detectar los cambios de color; la diferencia de color CIE Lab* entre los resultados del dispositivo optoelectrónico y los obtenidos por colorimetría fue de 2.6 a 4.5. Para poder predecir las condiciones ideales para el manejo de la fruta y determinar el nivel de madurez, se tuvo que entrenar una red neuronal artificial (ANN) de perceptrón multicapa, logrando una precisión del 96.4%. Además, se obtuvo una precisión general del 96.6% al clasificar la fruta en tres categorías de madurez (poco madura, madura y sobre madura), con un error del 3.4%. La combinación del dispositivo optoelectrónico y la ANN mejora considerablemente esta precisión en la clasificación del color de la fruta, puede facilitar la determinación del momento óptimo para el consumo y optimizar la eficiencia del proceso postcosecha. Este estudio muestra un avance significativo en la detección y predicción de la madurez de las naranjas mediante este sistema implementado.

INTRODUCCIÓN

El establecimiento de la fecha óptima de cosecha para alimentos perecederos es crucial en la industria agrícola. Para muchos frutos y verduras producidos comercialmente, un parámetro que indica la frescura y el sabor del producto es el color de la superficie, que puede ser monitoreado durante la cosecha y el transporte a medida que la fruta madura [1–3]. Este parámetro se ha utilizado para evaluar la madurez de muchos frutos, incluyendo tomates, plátanos, manzanas, peras y naranjas. En la familia de los cítricos, las naranjas son frutas no climatéricas; es decir, no continúan madurando después de la cosecha. Esta característica hace que la fecha de recolección sea inmensamente significativa. Aunque la alteración del color sirve como indicador de madurez, las frutas cítricas pueden necesitar ser cosechadas cuando están maduras, pero aún verdes debido a condiciones como temperaturas nocturnas elevadas y un exceso de nitrógeno.

La inspección del color de la superficie para determinar el estado de maduración de la fruta se realiza generalmente de manera manual, lo que puede ser subjetivo y no siempre predecible. Sin embargo, se han desarrollado técnicas automatizadas y no invasivas, como la espectrometría, para monitorear los cambios de color. Además, existen diversas técnicas de análisis no invasivas para medir la madurez de la fruta, incluyendo imágenes espectrales y análisis químicos. Además, se ha explora avances en el uso de tecnología computacional y técnicas de detección basadas en aprendizaje profundo, como las redes neuronales artificiales (ANNs), para clasificar el estado de maduración de la fruta a partir de imágenes [4–6]. Estas técnicas ofrecen una forma más eficiente y precisa de evaluar el estado de la fruta, lo que puede ser crucial para la planificación de la cosecha y la gestión de la calidad del producto.

En este trabajo se describe un método de detección de color utilizando un dispositivo optoelectrónico de bajo costo, que combina un sistema de emisión de luz de diodo de emisión de luz blanca, una

fibra óptica plástica como sensor externo y fotodiodos RGB para la interpretación en un sistema digital. Este método se presenta como una alternativa viable a los equipos comerciales más costosos, ofreciendo una forma rentable y no invasiva de estimar la calidad de la fruta, en particular los cambios de color en las naranjas cosechadas.

SENSOR DE REFLEXIÓN DE LUZ

Un sensor de reflexión de luz funciona emitiendo un haz de luz hacia un objeto y luego detectando la luz reflejada por ese objeto. Este tipo de sensor se basa en cambios en la cantidad de luz reflejada para detectar la presencia, distancia, color u otras características del objeto en cuestión. El funcionamiento básico de un sensor de reflexión de luz implica los siguientes pasos:

1. **Emisión de luz:** El sensor emite un haz de luz hacia el objeto que se va a detectar. La luz puede ser emitida en forma de láser, LED u otra fuente de luz, dependiendo de la aplicación específica del sensor.
2. **Reflexión de luz:** Cuando el haz de luz alcanza el objeto, parte de la luz es absorbida por el objeto y otra parte es reflejada de vuelta hacia el sensor.
3. **Detección de luz reflejada:** El sensor contiene un receptor que detecta la luz reflejada por el objeto. La cantidad de luz reflejada que llega al receptor puede variar según las propiedades del objeto, como su color, textura, forma o distancia.
4. **Procesamiento de la señal:** La señal de luz reflejada detectada por el sensor se procesa electrónicamente para determinar alguna característica del objeto. Esto puede implicar la medición de la intensidad de la luz reflejada, la comparación con un umbral predefinido o la interpretación de cambios en la señal para inferir información sobre el objeto.
5. **Salida de datos:** El sensor produce una salida de datos que puede ser utilizada para realizar alguna acción, como activar un sistema de alarma, controlar un proceso de producción o medir la distancia entre el sensor y el objeto.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El esquema del sistema optoelectrónico propuesto para la detección de cambios de color en naranjas, no invasivo y de bajo costo, se muestra en la Figura 1(a). El dispositivo consta de una fuente de luz blanca, un LED blanco de 1 W (Siled, modelo LED-P1W100-120/41) alimentado por una fuente de +5 V, una guía de onda de fibra óptica plástica (POF, Fiber Optics Industrial, modelo FB140-1-ND) como sensor externo, y un transductor con fotodiodos RGB (Renesas, modelo ISL29125) que contienen tres matrices de fotodiodos que convierten la luz en corriente eléctrica con picos de sensibilidad espectral aproximados a 620 (rojo), 565 (verde) y 485 (azul) nm, respectivamente. El detector ISL29125 está diseñado para rechazar longitudes de onda infrarrojas de fuentes de luz, lo que permite que el dispositivo funcione en entornos que van desde exteriores soleados hasta habitaciones oscuras. La Figura 1(b) muestra la respuesta espectral normalizada de los fotodiodos RGB en el sensor ISL29125, según la hoja de datos del sensor.

La POF está compuesta por resina de polimetilmetacrilato con un índice de refracción de 1.49 (apertura numérica = 0.5); el núcleo y los diámetros exteriores son de 980 y 1000 μm, respectivamente. Consiste en una fibra transmisora, que lleva la radiación emitida por la fuente de luz a la superficie de la naranja que se está probando, y una fibra receptora, que lleva la luz reflejada posteriormente por la muestra a los fotodiodos RGB. Después de que la luz transmitida a los diodos se convierte en corriente eléctrica durante el proceso de luz a señal, la salida de corriente se convierte en un conteo digital mediante un convertidor analógico-digital en chip, que tiene una resolución de conversión seleccionable entre 12 o 16 bits [7].

Los valores de color RGB se recopilaron en una base de datos para permitir la extracción posterior de información sobre cada canal de color. Se calcularon la media, la varianza y la desviación estándar. Así, se generó una matriz de modelo de color RGB en la base de datos. Dado que la rotación manual de la fruta por parte del usuario podría causar un desalineamiento al realizar las

mediciones de color en cada posición, el proceso de captura de datos se automatizó utilizando una plataforma giratoria para rotar la fruta a cada ángulo específico. La figura 1(b) proporciona una visión general del montaje experimental. Todos los dispositivos se montaron en una mesa óptica (30×30 cm, cuadrícula de 2.54 cm), que permitía ajustar las distancias entre los componentes ópticos. Las mediciones se adquirieron durante la rotación continua de la plataforma giratoria en pasos discretos.

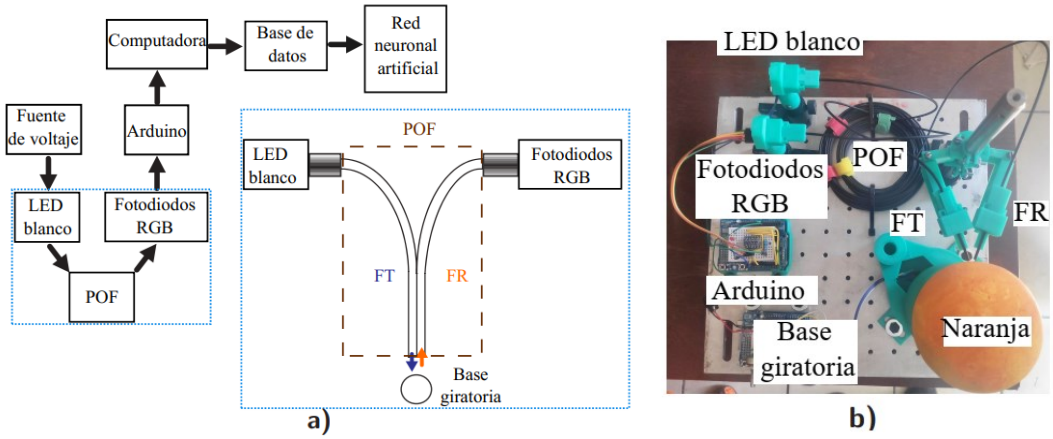


Figura 1. a) Diagrama de bloques del dispositivo. POF: fibra óptica de plástico. FT: fibra transmisora. FR: fibra receptora. b) Fotografía del dispositivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En nuestro estudio, durante el período de medición de 30 días, se recopilaron 12,046 elementos de datos, de los cuales 9,636 se utilizaron para entrenamiento y 2,410 para validación. A partir de los datos procesados para el entrenamiento de la red neuronal, se obtuvo la media de cada dato de entrada (RGB) como ū = [182.3 181.3 71.2] y la desviación estándar como s̄ = [69.3 83.2 33.8]. El algoritmo solucionador de entrenamiento es el algoritmo L-BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno de memoria limitada) [8]. Entre los parámetros a configurar en la red neuronal está la función de activación de las neuronas de la capa oculta, para la cual se eligió la función ReLu (unidad lineal rectificada) [9]. La función ReLu se define como Φh (y) = max (0, y), donde y es la entrada de la función de activación. Dado que hay tres neuronas de salida, se eligió la función de activación softmax en la capa de salida. De hecho, la función softmax realiza una normalización del vector de datos de entrada v̄ = [v1,…, vk] a una distribución de probabilidad, y la neurona que se activará será aquella que corresponda a la probabilidad más alta. La ecuación para obtener la función softmax para la i-ésima salida es

$$\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}(\bar{\boldsymbol{v}})_{\boldsymbol{i}} = \frac{e^{v_i}}{\sum_{j=1}^{k} e^{v_j}} \; \forall_i \in \{1, \ldots, k\} \qquad (1)$$

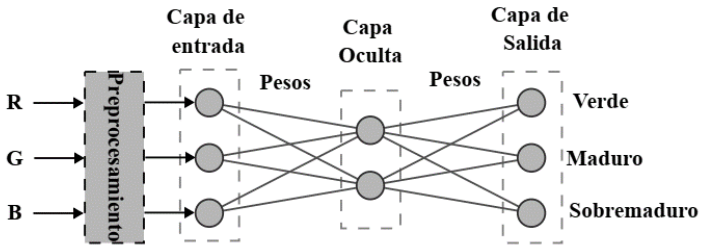


Figura 2. Arquitectura de la ANN de múltiples capas.

Una vez entrenado el MLP se obtuvo una red con los pesos de la capa de entrada $\boldsymbol{I}$ a la capa oculta $\boldsymbol{h}$ que se muestran en la Tabla.

Tabla 1. Pesos w de la capa de entrada a la capa oculta

	$\boldsymbol{h_1}$	$\boldsymbol{h_2}$
$\boldsymbol{I_1}$	6.78752814	-6.63501533
$\boldsymbol{I_2}$	-28.20923537	-23.3709355
$\boldsymbol{I_3}$	-3.90511764	9.07094876

Los pesos de cada neurona de la capa oculta $\boldsymbol{h}$ a cada una de la capa de salida $\boldsymbol{v}$ se muestran en la Tabla.

Tabla 2. Pesos w de la capa de oculta a la capa de salida

	$\boldsymbol{v_1}$	$\boldsymbol{v_2}$	$\boldsymbol{v_2}$
$\boldsymbol{h_1}$	-17.03948869	-2.75368732	19.47572613
$\boldsymbol{h_2}$	22.54540832	-13.14997107	-8.81005715

El bias en correspondiente a los nodos de la capa oculta $\boldsymbol{h_1}$ y $\boldsymbol{h_2}$ son $\boldsymbol{bh_1 = 12.03747209}$ y $\boldsymbol{bh_2 = 15.52589369}$ respectivamente, mientras que el bias de los nodos de la capa de salida $\boldsymbol{v_1}, \boldsymbol{v_2}$ y $\boldsymbol{v_3}$ son $\boldsymbol{bv_1 = -9.45113082}$, $\boldsymbol{bv_2 = 5.49171154}$ y $\boldsymbol{bv_3 = 3.11627688}$ respectivamente. Para evaluar el comportamiento de nuestra propuesta se utilizaron el Accuracy ($\boldsymbol{Ac}$), la precisión ($\boldsymbol{P}$), $\boldsymbol{rCall}$, $\boldsymbol{F1}$-score y la matriz de confusión [10]. Dados $\boldsymbol{TP}$ como valor verdadero positivo, $\boldsymbol{TN}$ verdadero negativo, $\boldsymbol{FP}$ falso positivo y $\boldsymbol{FN}$ falso negativo podemos obtener cada una de nuestras métricas a partir de las ecuaciones

$$\boldsymbol{Ac} = \frac{\boldsymbol{TP+TN}}{\boldsymbol{TP+TN+FP+FN}} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{P} = \frac{\boldsymbol{TP}}{\boldsymbol{TP+FP}} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{rCall} = \frac{\boldsymbol{TP}}{\boldsymbol{TP+FN}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{F1} = \boldsymbol{2}\frac{\boldsymbol{P \times rCall}}{\boldsymbol{P+rCall}} \quad (4)$$

De los experimentos realizados se obtuvo un accuracy $\mathbf{Ac = 0.964}$, además en la Tabla se muestran las métricas de Precisión, rCall, y F1, mismos que demuestran un rendimiento muy bueno para la clasificación de la madurez del fruto a partir del sensor óptico propuesto.

Tabla 3. Resultado de las métricas de Presicion rCall y F1 obtenidos con el sistema propuesto

Clase	Precisión	$\boldsymbol{rCall}$	F1-Score
Verde	1.000	0.997	0.999
Maduro	0.898	1.000	0.946
Sobremaduro	1.000	0.904	0.950
Macro avg	0.966	0.967	0.965

Peso avg	0.968	0.964	0.964

En la Figura 4 se muestra la matriz de confusión del sistema propuesto, aquí podemos ver los verdaderos positivos ($\boldsymbol{TP}$) y los verdaderos negativos ($\boldsymbol{TN}$) están muy por encima de los Falsos, además se puede apreciar que para la clase *under-ripe* se tienen 779 $\boldsymbol{TP}$ y solo dos $\boldsymbol{FN}$, por otro lado, en la clase *ripe* se tienen 754 verdaderos positivos $\boldsymbol{TP}$.

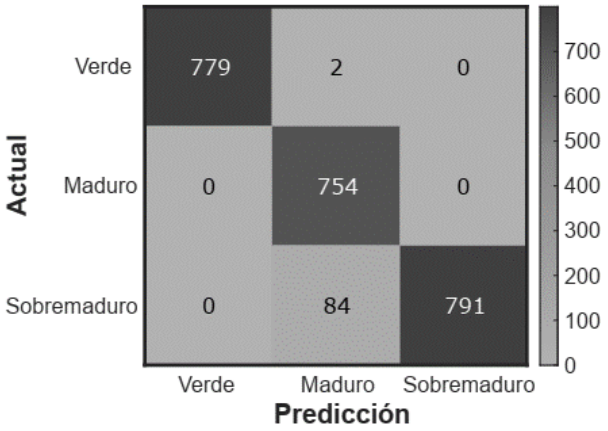


Figura 4. Matriz de confusión del sistema propuesto.

El histograma de la Figura 5 muestra los valores de color RGB medidos para las naranjas durante el período de monitoreo de 30 días. Las barras grises representan la función de distribución normal de los colores RGB durante los cambios de maduración, mientras que las líneas de colores superpuestas son distribuciones normales ajustadas para días específicos en el período de recolección de datos. Los datos en los histogramas de las tres coordenadas de color comienzan a desplazarse hacia la derecha, hacia colores más claros (verde-amarillo), y luego hacia la izquierda, hacia colores más oscuros (0, 0, 0) a medida que aumenta el período de medición. Por lo tanto, la maduración es uniforme en las muestras durante el período de monitoreo de 30 días. Este resultado muestra que la información del cambio de color también se puede obtener utilizando el espacio de color RGB para estudiar el grado de madurez en las frutas utilizando el transductor RGB, junto con la fibra óptica de plástico, y demuestra que esta información de medición de color obtenida es mejor. Además, un estudio previo mostró que otras escalas de color como la escala HSV permiten una mejor apreciación de la variación del color, basada en el tono, la saturación y el valor, para una determinación precisa del grado de madurez. En el presente estudio, se utilizó la conversión de RGB a color HSV para observar la variación del color; sin embargo, los resultados que obtuvimos demuestran que esto no es necesario, porque la variación del color durante el período de prueba es evidente en el gráfico.

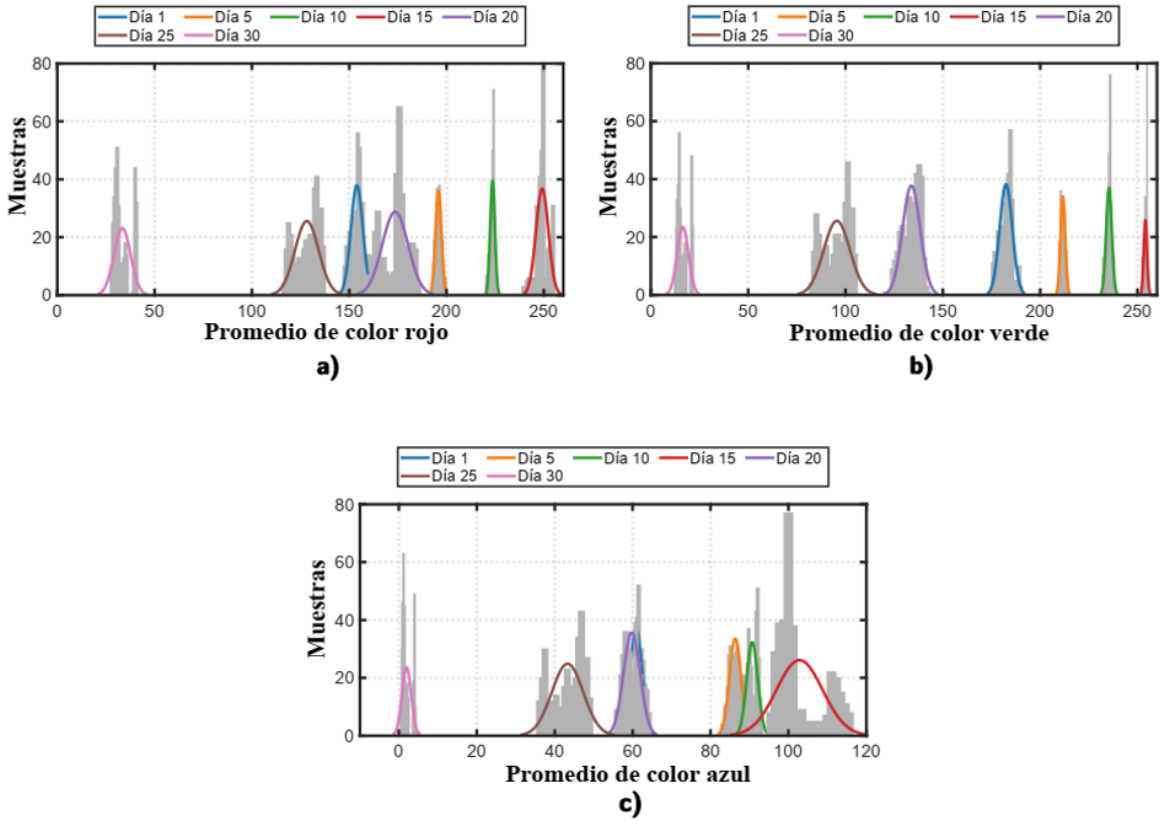


Figura 5. Histogramas (barras grises) con distribuciones normales (líneas de color) de los valores de color RGB medidos de las naranjas durante el período de monitoreo de 30 días: (a) histograma de rojo, (b) histograma de verde y (c) histograma de azul.

CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló un sistema optoelectrónico no invasivo y de bajo costo para detectar cambios de color en las naranjas y predecir su estado de maduración. En comparación con un sistema de colorimetría convencional, logró una diferencia total de color de 2.6-4.5. El sistema utiliza fibras ópticas de plástico (POF) para estabilizar las señales detectadas por el transductor RGB, garantizando estabilidad a pesar de la interferencia de la luz externa. Se empleó un perceptrón multicapa para predecir las condiciones de manejo de la fruta y los estados de maduración con una precisión del 96.4%, una precisión del 96.6% y un error del 3.4%, utilizando el solucionador L-BFGS para el entrenamiento. Es importante destacar que el sistema captura directamente datos de muestra utilizando coordenadas de color RGB, distintas de los datos de procesamiento de imagen utilizados para el entrenamiento, lo que facilita la implementación de sistemas de medición y control que integran redes neuronales artificiales (ANNs) para la inspección de la calidad de la fruta. El método de ANN, junto con el sistema optoelectrónico, mejora significativamente los tiempos de clasificación en comparación con los métodos fotográficos. Para mejorar las tasas de éxito de la ANN, es necesario adquirir más mediciones RGB de frutas para ampliar la base de datos. La investigación futura tiene como objetivo explorar diferentes arquitecturas y algoritmos de redes neuronales, potencialmente extendiendo la clasificación a otras frutas basadas en características como el color principal, enfermedades y calidad. Este dispositivo tiene promesa para diversas frutas, especialmente aquellas que experimentan degradación de clorofila para lograr colores preferidos por los consumidores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el CONAHCYT mediante el programa Estancias Posdoctorales por México 2022 con el proyecto No. 2840970, titulado “Diseño e implementación de sistemas de monitoreo inteligente usando dispositivos optoelectrónicos para aplicaciones a los sistemas agropecuarios en Tamaulipas”. Al CONAHCYT por el apoyo a través del proyecto de investigadoras e investigadores por México no. 3155, al proyecto de ciencia de frontera cf-2023-g-109. A la universidad de Guanajuato por la "convocatoria institucional de investigación científica 2024" proyecto CIIC 006/2024.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Lazaro, M. Boada, R. Villarino, and D. Girbau, "Color measurement and analysis of fruit with a battery-less NFC sensor," Sensors 19, 1741 (2019).
2. W. M. Syahrir, A. Suryanti, and C. Connsynn, "Color grading in tomato maturity estimator using image processing technique," in *2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology* (IEEE, 2009), pp. 276–280.
3. P. Das, J. K. P. S. Yadav, and L. Singh, "Deep Learning-Based Tomato’s Ripe and Unripe Classification System," International Journal of Software Innovation (IJSI) 10, 1–20 (2022).
4. J. Cheng, J. Qiu, and S. Ruan, "Switchable quadruple-wavelength erbium-doped photonic crystal fiber laser based on a polarization-maintaining photonic crystal fiber Sagnac loop filter," Opt Laser Technol 58, 110–113 (2014).
5. J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, J. C. Hernández-Garcia, M. Trejo-Durán, A. Muñoz-Lopez, D. Jauregui-Vázquez, and R. Rojas-Laguna, "RGB color sensor implemented with LEDs," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (2015), Vol. 9571.
6. J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, J. C. Hernández-García, D. Jáuregui-Vázquez, R. Rojas-Laguna, F. J. Valle-Atilano, and L. F. Sámano-Aguilar, "Sensor RGB para detectar cambios de color en piel de frutas," Acta Univ 26, 24–29 (2016).
7. ISL29125, "Digital Red, Green and Blue Color Light Sensor with IR Blocking Filter," renesas 1–17 (2017).
8. I. Kurniastuti, E. N. I. Yuliati, F. Yudianto, and T. D. Wulan, "Determination of Hue Saturation Value (HSV) color feature in kidney histology image," in *Journal of Physics: Conference Series* (IOP Publishing, 2022), Vol. 2157, p. 12020.
9. D. C. Liu and J. Nocedal, "On the limited memory BFGS method for large scale optimization," Math Program 45, 503–528 (1989).
10. N. W. S. Wardhani, M. Y. Rochayani, A. Iriany, A. D. Sulistyono, and P. Lestantyo, "Cross-validation metrics for evaluating classification performance on imbalanced data," in *2019 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)* (IEEE, 2019), pp. 14–18.

DISEÑO DE UN BIO-REACTOR DE FIBRAS HUECAS INMERSAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA, PARA CUMPLIMIENTO DE LA NOM-003-SEMARNAT-1997

Víctor Jesús Sagrero Mora, Maricela Durán Ríos, Rufino Osorio Márquez, Jesús Iván Mejía Navarro

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
vsagreromora@gmail.com

RESUMEN

Todos los contaminantes contenidos en las aguas residuales, causarían serios problemas ambientales si se incorporasen directamente a un curso de agua no contaminado. Por ello es necesario que sean tratadas antes de su vertido, con el fin de rebajar su carga contaminante, y que estén dentro de los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental.

Existe una gran diversidad en cuanto a sistemas de tratamiento de aguas residuales se refiere, algunos son muy comunes debido a su efectividad y sencillez de aplicación, sin embargo, cada efluente de aguas residuales presenta características distintas atribuibles al entorno en el que se encuentran. En este trabajo en particular, el interés fue proponer y estudiar un diseño de bio-reactor de fibras huecas inmersas, acompañado de un sistema de tratamiento para aguas residuales de alta carga orgánica. Para poder proponer de manera certera dicho tren de tratamiento, fue necesario primeramente realizar un muestreo diario para caracterizar adecuadamente el agua residual a tratar. Para esto, se procedió a hacer pruebas para obtener valores de Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Total, Fósforo Reactivo, Alcalinidad, pH y Sólidos Suspendidos Totales.

Una vez hecha la caracterización del agua residual, se propuso un sistema conformado de la siguiente manera: Un tanque anaerobio empacado de flujo ascendente; un espacio anóxico, un tanque de pre-aireamiento, finalizando con el biorreactor de fibras huecas inmersas. De este diseño obtenemos ciertas estimaciones de remoción final de contaminantes, de manera concreta, de carga orgánica.

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de enfrentar las nuevas problemáticas en cuanto a la disposición de aguas residuales en sitios alejados de los centros urbanos, cuyas actividades productivas generan aguas residuales de alta carga orgánica (mayor a 500 mg/L de DBO), y que no se encuentran dentro de la planeación de sistemas de drenaje, se exploran alternativas que permitan dar solución a estas situaciones. Generalmente, para resolver estos problemas se utilizas fosas sépticas seguidas de pozos de absorción, lo cual deriva en la contaminación de mantos acuíferos, además de que, al no ser un sistema de tratamiento convencional, suelen colapsar y requerir mantenimientos mayores, lo que los convierte en sistemas inviables.

Es por ello que, para atender a este tipo de situaciones, es conveniente colocar una planta para el tratamiento del agua residual generada en dichas locaciones. En la actualidad existen alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales que permiten su reutilización posterior al saneamiento, siendo una de ellas los Bio-Reactores de Membranas, también llamados MBR (por su nombre en inglés Membrane Bio-Reactor). Este tipo de reactores están compuestos de dos partes principales, las cuales son el Reactor Biológico, el cual es el responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual; y el Módulo de Membranas, el cual se encarga de la separación física de los lodos activados y el agua, por medio de la ultrafiltración.

Teoría

El primer sistema de suministro de agua potable a una ciudad completa fue construido en Paisley, Escocia, alrededor del año 1804 por John Gibb. En tres años se comenzó a transportar agua filtrada a la ciudad de Glasgow. En 1806 en París empieza a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua. El agua sedimentaba durante 12 horas antes de su filtración. Los filtros consistían en arena, carbón y su capacidad era de seis horas. En 1827 el inglés James Simplón construyó un filtro de arena para la purificación del agua potable. Hoy en día todavía se considera el primer sistema efectivo utilizado con fines de salud pública.

Sin embargo, hace algunas décadas, se innovó con un tipo de biorreactores cuya tecnología para la remoción de contaminantes en aguas residuales era muy eficiente, y ocupaba un menor espacio que los tanques utilizados en esos tiempos, éstos utilizaban membranas poliméricas; este tipo de biorreactores es conocido como Biorreactores con Membranas, o por sus siglas en inglés “MBR”.

Hoy en día, este tipo de tecnologías se siguen usando y mejorando, pues han demostrado ser muy eficientes por sí solos en lo que al tratamiento de aguas residuales para reúso se refiere.

Objetivos

- Caracterizar el agua residual producida en una industria que no cuenta con sistema de drenaje.
- Diseñar una planta de tratamiento para el agua residual producida en dicha locación.

PARTE EXPERIMENTAL

Caracterización del Agua Residual a Tratar.

Para poder caracterizar los parámetros relevantes para el tratamiento del agua residual, se emplearon viales con las sustancias adecuadas para la reacción de una porción de la muestra con dichos compuestos, lo cual mediante una lectura en un espectrofotómetro de la marca Hanna Instruments, puede obtenerse la concentración del contaminante seleccionado en la muestra de agua residual.

Para obtener los valores de Nitrógeno Total (Figura 1), y Fósforo Reactivo, se utilizaron Viales Hanna de Alto Rango, mientras que para la concentración de Demanda Química de Oxígeno fueron usados Viales Hach de Alto Rango.

En el caso de los Sólidos Suspendidos Totales (Figura 2), se utilizó un Colorímetro de la marca Hach, con el cual se hizo medición directa a 2 ml de las muestras recolectadas.

Figura 1. Procedimiento experimental para determinación de nitrógeno total.

Figura 2. Colorímetro Hach para determinación de sólidos suspendidos totales.

Finalmente, para obtener el valor de la Alcalinidad del Agua, se usó un método volumétrico (Figura 3), tomado del libro Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, siendo únicamente una valoración con ácido sulfúrico y Naranja de Metilo.

Figura 3. Matraz con muestra para determinación de alcalinidad mediante volumetría.

Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

Para poder comenzar a tomar decisiones con respecto al diseño del sistema completo, primeramente, se contrastaron los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual problema, con los valores indicados en la literatura especializada en el tema, que en este caso sería la de los autores Metcalf & Eddy.

En la Tabla 1, se muestran los valores de varios contaminantes del agua, y a partir de qué cantidad se considera carga alta o baja de dicha impureza:

Tabla 1. Composición Típica de Aguas Residuales Domésticas y sus Rangos.

Parámetro / Unidades	**Conc. Baja**	**Conc. Media**	**Conc. Alta**
SST mg/L	130	195	389
N_T mg/L	23	35	69
DQO mg/L	339	508	1016
Fósforo mg/L	2.1	3.2	6.3
DBO mg/L	133	200	400

Así pues, pudimos determinar que, con base en estos valores, nuestra agua residual es de Alta Carga Orgánica (Valor de la DQO), como podremos observar en el apartado de resultados, donde se indican los valores obtenidos de la caracterización.

Una vez hecho esto, se propuso el sistema de tratamiento conformado de la siguiente manera: Un tanque anaerobio empacado de flujo ascendente; un espacio anóxico, un tanque de pre-

aereamiento, finalizando con el biorreactor de fibras huecas inmersas. De esta manera, se procedió a realizar el diseño de cada uno de estos equipos, ajustado a los valores de la muestra problema. Para el diseño del tanque anaerobio, se consultó el Libro 29 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la CONAGUA, mientras que, para el diseño del resto del sistema de tratamiento, se empleó la metodología de los autores Metcalf & Eddy.

RESULTADOS

Los resultados de la caracterización de aguas residuales, monitoreada por 12 días, es presentada en la tabla 2:

Tabla 2. Resultados de Caracterización del Afluente.

Día	Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo Reactivo (mg/L)	DQO (mg/L)	Alcalinidad (mL Ácido de Sulfúrico)	SST (mg/L)	Alcalinidad (mgCaCO/L)
1	66	27.9	570	8	230	400
2	180	33.6	2688	11.5		575
3	114	55.5	2760	14		700
4	96	51	543	13.4		670
5	114	60.6	2670	15.8	210	790
6	123	28.8	2832	15.8		790
7	132	32.4	2793	15.2		760
8	120	34.2	2652	14.1		705
9	141	44.4	2919	15.3		765
10	123	51	2724	14.4		720
11	135	34.5	2550	15.5		775
12	138	48.6	2781	15.2		760
Promedio	**123.5**	**41.875**	**2373.5**	**14.01666667**	**220**	**700.8333333**

Aunado a esto, se obtuvo una estimación de un valor de DBO promedio a partir de los datos de DQO, dicho valor se presenta enseguida:

$$DBO = \boxed{1068.075\ g/m3}$$

Y, basados en estos resultados, se muestran a continuación los valores de volúmenes requeridos para cada uno de los equipos propuestos para el tratamiento del agua residual con las características previamente presentada en la anterior tabla, así como los valores esperados de remoción de contaminantes en estas etapas de proceso:

Tanque Anaerobio:

$$V_{An} = \boxed{2.25\ m^3}$$

La eficiencia de Remoción en este punto:

$$E = 82.24\%$$

Etapa Aerobia (Tanque de Pre-aireación y Biorreactor de Membranas):

El volumen del Biorreactor de Membranas es el siguiente:

$$V_{MBR} = \boxed{0.24\ m^3}$$

Mientras que el volumen del Tanque de Pre-aireación es:

$$V_{preair} = \boxed{0.5281\ m^3}$$

Así mismo, se obtiene la remoción de DBO en esta etapa:

$$\boldsymbol{DBO_{OUT} = \boxed{28.4535\ g/m3}}$$

Con estos valores, se calcula la remoción total del sistema (dado que en la zona anóxica la remoción de DQO/DBO es despreciable, pues su función es la remoción de Nitrógeno):

$$E = \boxed{\mathbf{97.34}\%}$$

Etapa Anóxica:

El volumen del Tanque Anóxico sería:

$$V_{Anox} = \boxed{0.1536\ m^3}$$

Y la remoción de Nitrógeno en esta etapa es:

$$Remoción\ NOx = \boxed{74.8871\ g/d}$$

CONCLUSIONES

En conclusión, podemos afirmar que la implementación de un sistema de tratamiento, con una combinación de etapas anaerobia – anóxica – aerobia, es efectiva en cuanto a la remoción de carga orgánica en grandes cantidades, pues complementan las deficiencias que pueda presentar alguna etapa por separado.

El uso de un Reactor de Fibras Huecas Inmersas proporciona mayor rentabilidad al proceso, pues logra eliminar carga orgánica, teniendo un tiempo de retención menor en comparación a los sistemas de lodos activados convencionales.

La remoción estimada a lograrse con este sistema de tratamiento cumple con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas, dejando margen a acortar los tiempos de retención hidráulica en determinadas partes del proceso, pues esto puede optimizar el proceso manteniendo el propósito principal de seguir bajo el cumplimiento de las normas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw Hill, Fifth Edition (2014).
2. Baird R.B., Eaton A.D., Rice E.W. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Water Works Association, 23rd Edition. (2017)
3. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 29: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. SEMARNAT – CONAGUA. (2015)
4. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996
5. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

EXTRACCIÓN DE COLÁGENO DE CARNAZA BOVINA GENERADA APARTIR DEL PROCESO DE CURTIDO PARA IDENTIFICAR COLÁGENO TIPO I Y TIPO III

Victoria Gwineth Cruz Rico, Flora Itzel Beltrán Ramírez, Jesus Salvador Jaime Ferrer

Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC).
vcruz.estudiantepicyt@hotmail.com

RESUMEN

Buscando soluciones innovadoras en la ciencia de los materiales, se exploran fuentes sostenibles como el colágeno. Este se aplica en la fabricación de materiales biodegradables con diversas aplicaciones, desde envases de alimentos hasta ingeniería de tejidos. El colágeno es un biopolímero que contiene tres cadenas alfa de aminoácidos formando una estructura de triple hélice, las cuales ayudan a distinguir el tipo de colágeno presente de acuerdo con su composición y peso molecular en cada una de las tres cadenas peptídicas. La carnaza bovina, contiene colágeno aproximadamente en un 29 %. Sin embargo, al pasar por el proceso de curtido, el haz de fibras de colágeno almacena trazas de reactivos residuales y químicos, así como el tejido adiposo proveniente del animal, por lo cual se llevó a cabo una purificación. El aislamiento y separación de una proteína especifica como lo es el colágeno puede implicar un reto, ya que se puede afectar de manera negativa su estructura de triple hélice, y por ende sus propiedades. Por ello, en el presente trabajo se desarrolló un método de extracción e identificación de los colágenos presentes en la carnaza bovina con el propósito de aislar la base proteica deseada. Se llevó a cabo un estudio de Calorimetría Diferencial de Barrido donde se identificó la temperatura a la cual se desnaturaliza el colágeno (70.8°C), la cual es importante para conservar su estructura. Posteriormente, se realizó el proceso de extracción térmica donde se logró aislar un 25.772% de peso solido del biopolímero de interés. Además, se analizó la huella molecular de colágeno a través de espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para corroborar que la estructura no haya sido afectada por los procesos a los que se somete la carnaza durante la extracción de colágeno. Para la identificación de los tipos de colágeno se realizó una cuantificación de proteínas a través del método Bradford y así identificar el peso molecular de las cadenas peptídicas de colágeno tipo I y tipo III y con el uso de la técnica de separación de moléculas cargadas por migración de campo eléctrico (Electroforesis SDS-PAGE, utilizando el método Laemmli), en donde se observaron las bandas características de las cadenas de colágeno tipo I ([α1(I)]2, α2(I)) y tipo III ([α1(III)]3). Con ello, se concluye que el colágeno bovino extraído posee una mezcla de colágeno tipo I y tipo III, además el método utilizado no es destructivo y a su vez es eficiente para determinar la composición de la carnaza y da la pauta para definir aplicaciones específicas e innovadoras de cada uno de los tipos de colágeno identificados.

INTRODUCCIÓN

El colágeno es una proteína fibrosa estructural presente en tejidos conectivos. La cual está constituida por tres cadenas de aminoácidos, llamadas cadenas alfa, unidas de manera helicoidal[1]. Si bien, de acuerdo con la composición y tamaño que posean esta cadena peptídica es que se han identificado hasta 28 tipos de colágeno. Donde el colágeno tipo I además de ser el colágeno más abundante en tejidos conectivos como lo es la piel, posee dos cadenas iguales (I) y una cadena alfa diferente (I)[2]. Mientras que el colágeno tipo III está presente en vasos sanguíneos y posee tres cadenas alfa idénticas (III)[3].

Durante el proceso de curtido se obtiene un subproducto llamado carnaza durante la etapa de descarne. El cual consiste en un tejido hecho de 29 % de proteínas estructuradas como lo es el colágeno y unido a un tejido subcutáneo adiposo[1]. El colágeno es considerado un polímero natural debido a que posee una triple hélice formada de 3 cadenas de unidades repetitivas llamados aminoácidos y de acuerdo con el tamaño y tipo de cadena es que se distinguen los diferentes tipos de colágeno[4]. El colágeno derivado de la piel de bovino está compuesto de colágenos tipo I ([α1(I)]2,

α2(I)) y tipo III ([α1(III)]3), lo que hace que la extracción de esta proteína sea de gran interés debido a su biocompatibilidad con el colágeno humano[5,6].

Es por lo que durante este proyecto se desarrolló un enfoque no destructivo para extraer los colágenos presentes dentro de este subproducto bovino, además de que se realizó una prueba preliminar para identificar las diferentes cadenas presentes en esta mezcla de colágeno.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental para identificación de la proteína de interés se dividió en tres partes, de acuerdo con la **figura 1**. Extracción, desnaturalización y caracterización.

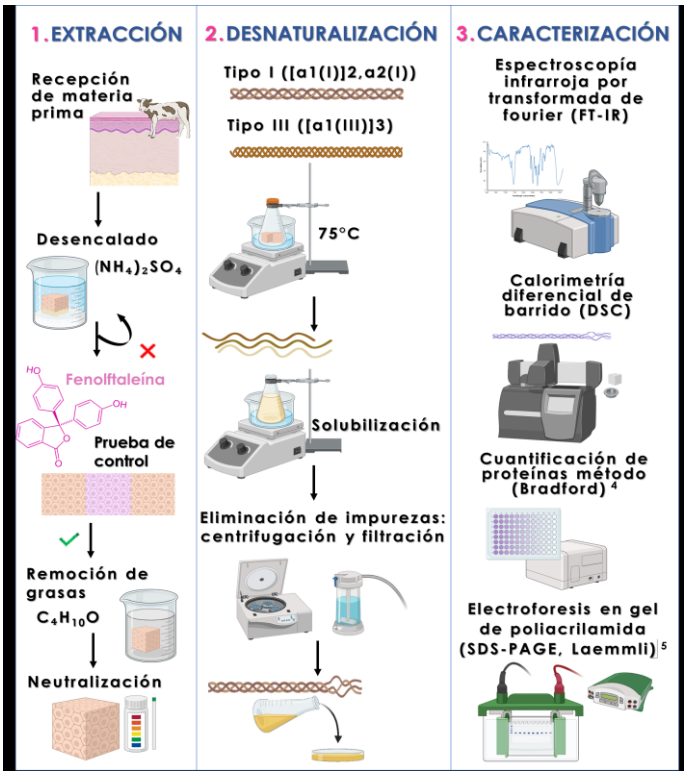


Figura 1. Metodología

Durante el proceso de extracción de colágeno se trabajó con carnaza de origen bovino, la cual se dividió en trozos de 2 cm por 2 cm los cuales debido al pH alto que poseía este subproducto proveniente del proceso de curtido. Para ello se desencaló con sulfato de amonio al 2% de acuerdo con el peso de la carnaza utilizada. Para corroborar que el desencalado había sido realizado de manera uniforme durante toda la muestra se llevó a cabo una prueba de control a partir de la división de un segmento de carnaza y la adición fenolftaleína el cual es un de un indicador de pH. En donde, si este presentaba la forma incolora indicaba que poseía un pH inferior a 8 y en caso de que virara a el color rosa característico de la fenolftaleína se repetía el proceso de desencalado. Una vez desencalada la muestra se llevó a cabo con alcohol butílico al 10% (v/v) durante 24 horas para eliminar las grasas unidas a la piel, la cual está unido a la capa interior y finalmente se hicieron lavados con agua destilada hasta su neutralización. En cuanto al proceso de desnaturalización se aisló la muestra previamente tratada en un sistema cerrado a calentamiento indirecto de 70.8ºC hasta su total solubilización. La muestra se centrifugo a 4000 r.p.m. durante 15 minutos y se filtró para eliminar cualquier residuo que pudiera haber quedado dentro de la carnaza. Finalmente se obtuvo un gel de color tan-ámbar.

Para la caracterización, se utilizó Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada De Fourier (FT-IR) para el monitoreo de la huella molecular de colágeno durante cada una de las etapas de extracción y desnaturalización. Se utilizó Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para determinar la temperatura de desnaturalización de una muestra de la carnaza en crisoles de aluminio y un rango de temperatura de 25ºC a 90ºC. En cuando a la cuantificación de proteínas se utilizó el método Bradford[7] para estimar la concentración de proteína que hay en la muestra, la cual es una técnica que sirve para una optimización de la electroforesis de proteínas en gel de poliacrilamida (SDS-PAGE), donde se utilizó el método Laemmli[8] para la preparación del gel y buffers correspondientes. línea en blanco.

RESULTADOS

El proceso de extracción de colágeno permitió aislar y purificar la proteína de interés presente en la carnaza previamente obtenida de un proceso de curtido. De acuerdo con **figura 2**, a través de un seguimiento con espectros de FT-IR se determinó si durante cada una de las etapas del método de extracción no se eliminaban grupos característicos de la huella molecular de colágeno. Que podemos corroborar con la **tabla 1** donde se identificaron cada uno de los picos de absorción.

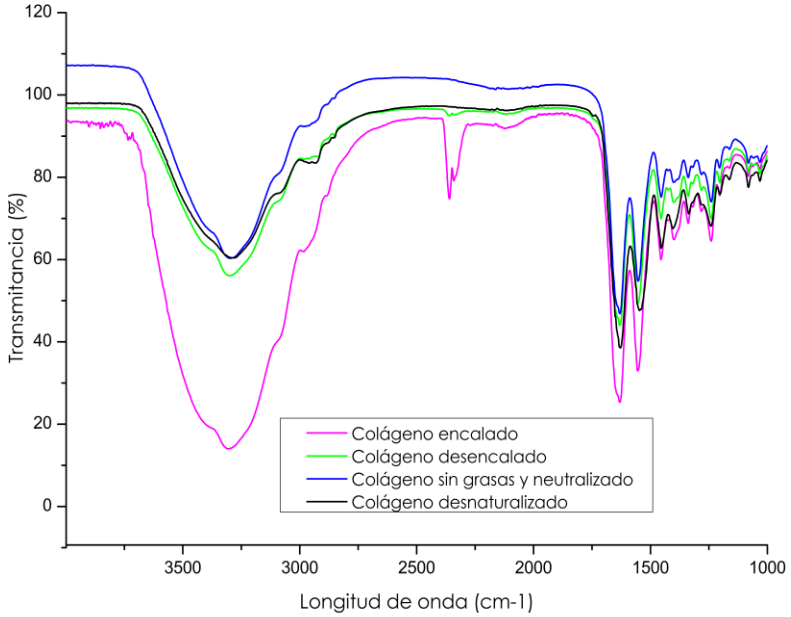


Figura 2. Espectros FT-IR del colágeno durante el proceso de extracción y desnaturalización

Tabla 1. Asignaciones de picos de los espectros de FT-IR característicos de la huella molecular colágeno aislado de piel de bovino**.**

Grupo funcional	Longitud de onda (cm^{-1})
Estiramiento N-H de amida III	3350 - 3330
Estiramiento asimétrico CH_2 de amida	25925 - 2950
Estiramiento simétrico CH_3 (proteínas)	2850 - 2885
Estiramiento C=O / enlace de hidrógeno acoplado con COO^-	1655
NH acoplada con un estiramiento C-N (Amida II)	1550
Curvatura CH_2	1450

CH_2 (prolina)	1338
NH acoplada con estiramiento C-N (Amida III)	1235 - 1240
Estiramiento CO-O-C (proteínas)	1130 - 1165
Estiramiento C–O	1079

En la **figura 3**, se puede observar la temperatura de desnaturalización del colágeno a temperatura de 70.8ºC, la cual fue la temperatura que se utilizó para el calentamiento indirecto de la carnaza hasta llegar a su completa solubilización. Una vez centrifugada y filtrada la muestra permitió obtener un 25.772% de colágeno desnaturalizado, obteniendo un 88.87% de rendimiento total a partir de la carnaza purificada que se presentan en la **tabla 2**.

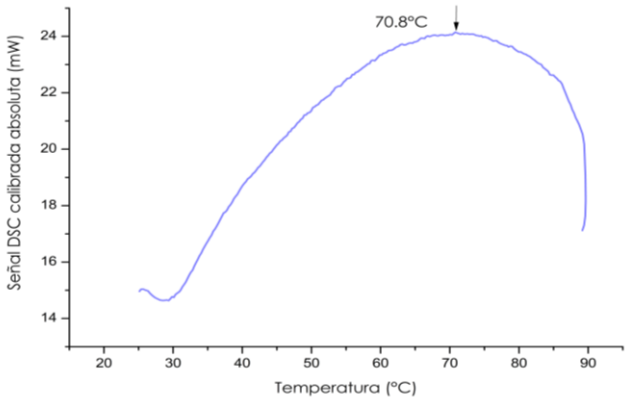


Figura 3. Termograma resultante de carnaza liofilizada

Tabla 2. Porcentajes de obtención de colágeno y de rendimiento

Peso de la carnaza purificada (g)	Peso del colágeno desnaturalizado obtenido (g)	Colágeno obtenido (%) (Porcentaje esperado 29%)	Rendimiento (%)
35.315	*9.275*	*26.263*	*90.562*
32.814	*8.861*	*27.004*	*93.117*
33.272	*8.002*	*24.050*	*82.931*
Promedio		*25.772*	*88.87*

Una vez obtenido la muestra de colágeno se realizo una curva de calibración para medir el contenido de proteína total con una proteína estándar como lo es la albumina sérica bovina (BSA) con el método Bradford el cual se une con los grupos amino de la proteína que incide un cambio de color en la solución. Al ser un método colorimétrico permitió la lectura de absorbancia en los estándares conocidos y poder construir la curva de la **figura 4.** El cual nos dio una ecuación de recta de y=0.00109x+0.8191, donde x sería la absorbancia de las muestras del colágeno extraído. La cuantificación de colágeno se realizó sustituyendo la absorbancia dada en tres extracciones y no se vio un cambio muy drastico en la concentración (**tabla 3)**.

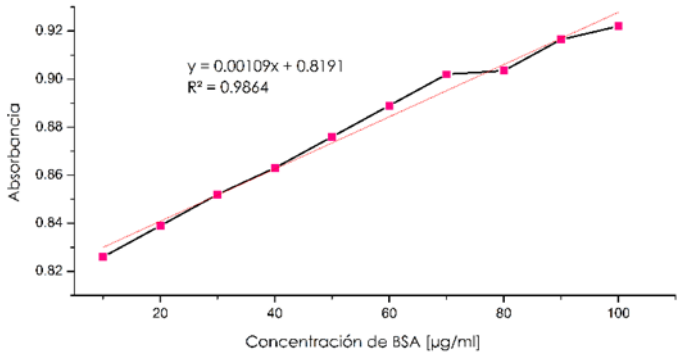


Figura 4. Curva estándar de BSA

Tabla 3. Absorbancia promedio y concentración de las repeticiones del proceso de extracción.

Muestra	*Absorbancia*	*Proteína total (µg/mL)*
1	***0.38125***	***401.697***
2	***0.38901***	***394.578***
3	***0.38925***	***394.358***

Si bien esta cuantificación es importante para la prueba preliminar de electroforesis realizada. Donde se requiere que la cantidad de proteína dentro de cada pocillo sea igual y no mayor a 30 µg. De acuerdo con la banda de la izquierda, se observó que el colágeno desnaturalizado deshace sus estructuras tridimensionales debido a la ruptura de los enlaces débiles, como los puentes de hidrógeno, que mantienen la estructura intacta. Como resultado, las cadenas de colágeno desnaturalizado se desenrollan y se vuelven lineales. Entonces, el colágeno desnaturalizado puede comportarse más como una cadena polipeptídica lineal en lugar de una estructura fibrosa compacta. Esto puede provocar que la migración en el gel de SDS-PAGE no refleje adecuadamente el tamaño molecular real del colágeno desnaturalizado, lo que resulta en una banda corrida y difusa en lugar de bandas distintas y separadas.

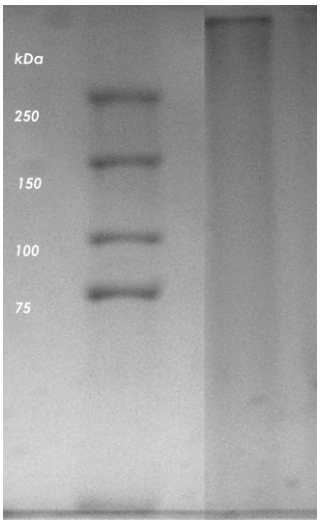


Figura 5. Prueba preliminar de electroforesis (SDS-PAGE) de colágeno desnaturalizado

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una técnica para extraer colágeno de la carnaza bovina proveniente del proceso de curtido, la cual es menos agresiva con la estructura característica del colágeno, al igual, permite obtener colágeno de mayor calidad con una temperatura de desnaturalización inferior a 70,8 °C y un rendimiento de 88.87%. Lo que la hace una metodología escalable y con un menor impacto ambiental puesto a que los reactivos químicos utilizados no son agresivos, ni se generan residuos peligrosos. Debido al potencial tan grande del colágeno este podría revolucionar el proceso de extracción de manera más accesible. En cuanto a la cuantificación de las proteínas totales fue fundamental para realizar una electroforesis adecuada, la cual reveló una desnaturalización completa del colágeno en la muestra. Para identificar con mayor precisión las cadenas alfa y el peso molecular del colágeno tipo I y tipo III, será necesaria una hidrólisis posterior para que los fragmentos de colágeno hidrolizado puedan migrar más eficientemente en el gel y separarse en bandas distintas según su tamaño molecular y conducir a nuevos métodos de aprovechamiento de colágenos específicos, los cuales pueden tener múltiples aplicaciones, incluyendo en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y biomédica, gracias a sus propiedades funcionales como biopolímero.

BIBLIOGRAFÍA

1. Noorzai, S., Verbeek, C. J. R., Lay, M. C., & Swan, J. (2020). Collagen extraction from various waste bovine hide sources. Waste and Biomass Valorization, 11(11), 5687–5698. https://doi.org/10.1007/s12649-019-00843-2
2. Henriksen, K., & Karsdal, M. A. (2019). Type I collagen. In Biochemistry of Collagens, Laminins and Elastin (pp. 1–12). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817068-7.00001-X
3. Wang, Y., Zheng, M., Liu, X., Yue, O., Wang, X., & Jiang, H. (2021). Advanced collagen nanofibers-based functional bio-composites for high-value utilization of leather: A review. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 6(2), 153–166. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.02.001
4. Henriksen, K., & Karsdal, M. A. (2016). Biochemistry of collagens, laminins and elastin. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2015-0-05547-2
5. Law, J. X., Liau, L. L., Saim, A., Yang, Y., & Idrus, R. (2017). Electrospun collagen nanofibers and their applications in skin tissue engineering. Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 14(6), 699. https://doi.org/10.1007/s13770-017-0075-9
6. Sauer, M. (2022). Membrane transport as a target for metabolic engineering. In Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Designer Microbial Cell Factories: Metabolic Engineering and Applications (pp. 27–43). https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88504-1.00003-0
7. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 72(1–2), 248–254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3
8. Laemmli, U. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. Nature, 227, 680–685. https://doi.org/10.1038/227680a0

REQUIERIMIENTOS DE INFRAESTRUCTURA PARA UN GOBIERNO INTELIGENTE EN AMÉRICA LATINA

Elsa Julieta Cedillo-Elias

ITESO Universidad Jesuita de Guadalajara.
julietacedillo@iteso.mx

RESUMEN

Las instancias de gobierno en América Latina enfrentan el reto de brindar servicios en línea fiables y seguros. Brindar los servicios que la población requiere se vuelve complejo, por un lado, la concentración de personas en oficinas de gobierno en las zonas urbanas suele sobrepasar la capacidad de atención, mientras que en las zonas rurales incluso deja de ser viable mantener oficinas en servicio. Además, a partir de la pandemia generada por el COVID-19, se generó una mayor demanda de sistemas de gobierno que permitan realizar trámites y pagos en línea, sin necesidad de asistir de forma física a las oficinas. Una propuesta de solución para atender estos desafíos es poner a disposición de la ciudadanía sistemas inteligentes, con plataformas digitales elásticas y flexibles, y con diversos sistemas integrados. Sus principales retos son: seguridad y privacidad, entrega y facturación de servicios, portabilidad e interoperabilidad, fiabilidad y disponibilidad, rendimiento y ancho de banda. Para el desarrollo de la propuesta, se inició con la instalación de dispositivos IoT en 14 oficinas recaudadoras del Gobierno del estado de Jalisco que permitieran hacer recolección de datos, se desarrollaron e implementaron aplicaciones que permitieron identificar debilidades en la infraestructura, así como áreas de oportunidad y desarrollo. Después de hacer los análisis pertinentes con los datos recolectados de la etapa inicial, se analizaron diferentes plataformas en la nube, tal como Redes Definidas por Software (SDN), Funciones de Red Virtualizadas (NFV), plataformas para uso de recursos virtuales que permitan diseñar y gestionar nubes públicas y privadas (OpenStack) entre otras, para elegir la mejor opción y hacer viable el desarrollo de aplicaciones que trabajen en entornos de arquitecturas híbridas con compatibilidad con las redes 5G. Finalmente, se diseñó una propuesta de arquitectura de red en la nube, en un escenario controlado, que integra diferentes elementos físicos y lógicos de comunicación que, sin eliminar las redes heredadas, incorpora nuevas tecnologías basadas en la nube. La fuerte demanda de servicios digitales postpandemia ha reforzado la necesidad del incremento de capacidades tecnológicas en los gobiernos. Se siguen vislumbrando mejoras de la infraestructura, especialmente en nube y enfocados en ciberseguridad; el gobierno y las empresas deben seguir invirtiendo en infraestructuras de red para satisfacer la creciente demanda de datos. En 2023 se consolidaron estrategias digitales; sin embargo, en 2024 la conectividad sigue siendo un factor fundamental en el desarrollo de la Sociedad y de los Gobiernos Inteligentes.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades están en crecimiento y de forma paralela se tiene un incremento en la cantidad de dispositivos conectados a Internet, a raíz de esto se desarrolló el concepto Ciudades Inteligentes, las cuales son: ciudades que incorporan servicios digitales y tecnológicos para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Es por ello por lo que, los gobiernos de las ciudades tienen la necesidad de incorporar opciones de acceso remoto a diversos servicios que tradicionalmente se realizaban de forma personal en oficinas especializadas. Para ello requieren una infraestructura tecnológica capaz de soportar las nuevas demandas a solventar.

En junio del 2018 un comunicado de prensa del Banco Interamericano de Desarrollo presenta los beneficios y retos de digitalizar los trámites en áreas gubernamentales, los principales son: Reducción de corrupción y costos de la burocracias, entre otros [1]. Sin embargo, en ese mismo estudio de identifican retos siendo el más grande que en ese año que sólo un 40% de usuarios potenciales tienen acceso a tarjetas de crédito para hacer pagos en línea.

A cinco años de dicho comunicado la interacción de la ciudadanía con el Gobierno a través de Internet se ha incrementado, pero sigue siendo mínima y poco representativa en ciertos aspectos, como lo presenta la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) en la Figura 1, puede observarse una interacción a través de Internet menor al 50 %, para pagos y servicios se encuentra alrededor del 23 %.

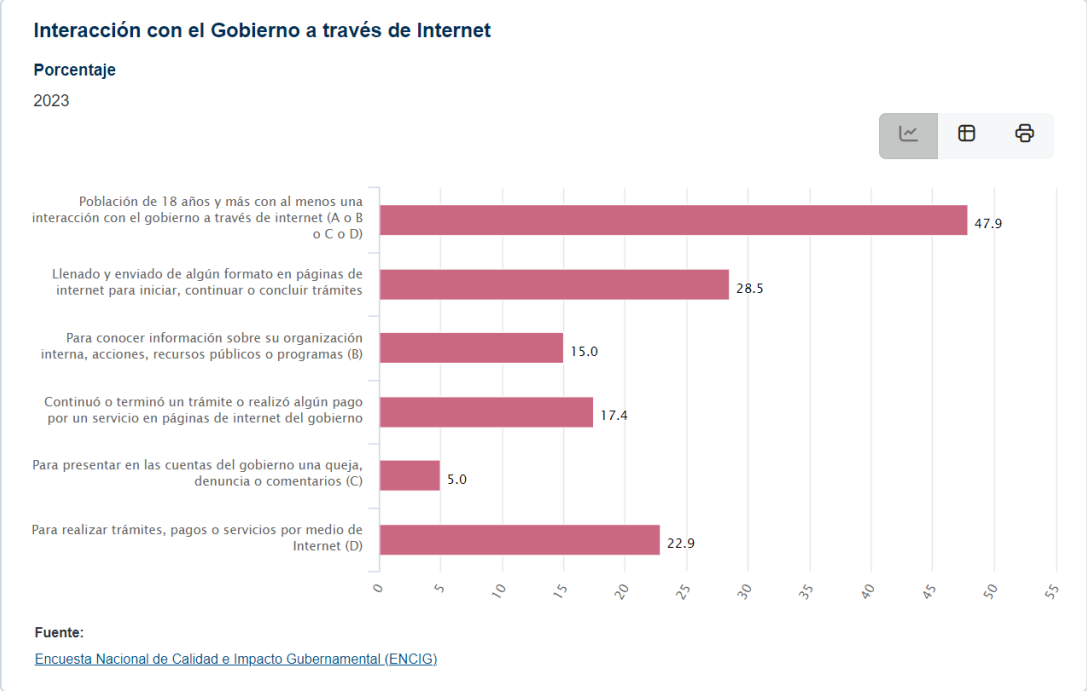


Figura 1, Resultado 2023 de la interacción con el gobierno a través de Internet de la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) [2]

Para mejorar la experiencia de la ciudadanía al interactuar a través de internet con los servicios de Gobierno es necesario que cuenten con una Infraestructura de Comunicaciones que sea flexible, competitiva, innovativa, sólida y dinámica.

TEORÍA

Metodología Cuantitativa

En el diseño de la arquitectura es posible tomar mediciones de elementos como la cantidad de pérdida de paquetes, Throughput, RTT y el Jitter. Estos parámetros se midieron en las redes convencionales, así como en las distintas versiones de la arquitectura implementadas.

Metodología Cualitativa

La experiencia del usuario en los sistemas de un Gobierno Inteligente es el parámetro identificable para los usuarios. Se desarrolla una interpretación basada en observación considerando parámetros tomados se bibliografía consultada.

Redes Definidas por Software (SDN)

Se distinguen por separar el plano de control del reenvío del tráfico en las redes de datos, facilitando el aprovisionamiento y la gestión de los recursos en la re de tal forma que permiten controlar el poder de cómputo de la red, trabajo de forma transparente para distintas aplicaciones en la nube y para el Internet de las Cosas (IoT) [3].

Funciones de Red Virtualizadas (NFV)

Al facilitar la activación y desactivación de las instancias virtuales, en base a su necesidad se obtiene mayor portabilidad, escalabilidad y rentabilidad de los servicios de red, tradicionalmente dependientes del hardware. Desacopla las funciones de la red del hardware implementándolas a través del software sin importar la ubicación del hardware existente [4].

OpenStack

Es un Sistema Operativo de código abierto con gran implementación, que brinda servicios para las infraestructuras de nube ya sean máquinas virtuales, bare metal o contenedores, capaz de controlar un gran número de recursos informáticos, de almacenamiento y de redes; brindando orquestación, gestión de fallas y gestión de servicios a los usuarios [5].

Redes 5G

Esta nueva generación de redes móviles tiene una implementación de comunicación en masa de dispositivos para el control de comunicaciones críticas, ofrece una Banda Ancha móvil mejorada, entre otras características. Resalta por permitir velocidades de hasta 10 Gbps con latencias considerablemente bajas.

Elementos que considerar en la infraestructura

Dispositivos*,* aquellos equipos electrónicos que intervienen en los procesos gubernamentales desde equipos finales (computadoras, terminales, etc.), intermedios (switches, routers, puntos de acceso, etc.).

De distribución**,** medios de transmisión alámbricos e inalámbricos que intervienen en el transporte de datos y las características que conllevan (ancho de banda, Jitter, Throughput, etc.).

Lógicos**,** conformados por el conjunto de protocolos a implementar que definen el comportamiento de os datos en su interacción dentro de la infraestructura.

PARTE EXPERIMENTAL

Primer etapa

Se llevó a cabo la instalación de dispositivos IoT, para recolección de información respecto a volumen de usuarios en once oficinas recaudadoras del estado de Jalisco sobre una estructura de red SDN. La interacción de estos dispositivos con la controladora puede observarse en la Figura 2.

Para esta interacción fue necesario realizar el reconocimiento de dispositivos IoT para llevar a cabo la programación de reglas desde los dispositivos IoT y poder garantizar la recopilación, almacenamiento, visualización y análisis de datos. Se diseñó un algoritmo que permita identificar a las controladoras (que trabajan con el protocolo MQTT) y poder implementar reglas en la controladora SDN.

La infraestructura debe ser capaz de brindar escalabilidad y flexibilidad que garanticen el uso óptimo de los recursos de red con los que se cuenta.

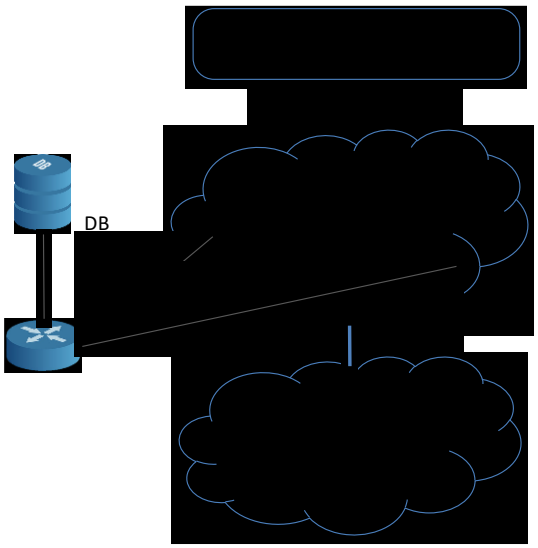


Figura 2, Interacción de la red de sensores con la controladora SDN [6]

En esta primer etapa se identifica como la implementación de redes SDN permite a los dispositivos IoT tener un adecuado comportamiento dentro de los Gobiernos Inteligentes. La seguridad se acota y se buscar tener certeza de disponibilidad e integridad en el transporte de datos, durante toda la trayectoria que siguen desde su origen hasta su destino con una mínima pérdida de información en el menor tiempo posible.

Segunda etapa

Al poder llevar a cabo una recolección de información de manera favorable se procedió con la incorporación a la arquitectura de los servicios en la nube a través de la implementación de la plataforma OpenStack, la arquitectura resultante se puede observar en la Figura 3.

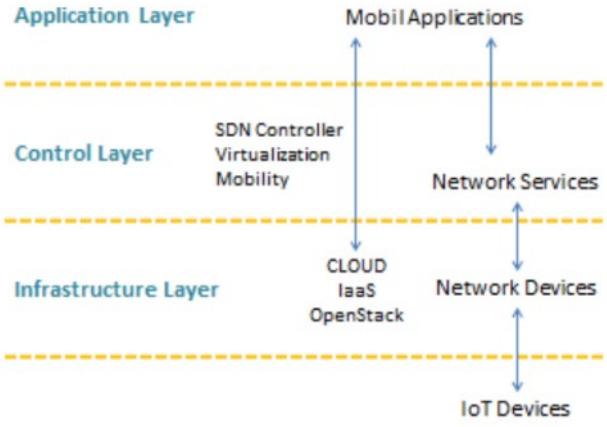


Figura 3, Arquitectura SDN con incorporación de servicios en la nube a través de OpenStack [7]

Para 2018 a la infraestructura de recolección de datos a través de dispositivos IoT en las instalaciones de las oficinas recaudadoras del Gobierno del Estado de Jalisco se le incrementó el servicio de pagos en línea con el objetivo de mejorar la experiencia de los ciudadanos al hacer el pago correspondiente.

Se trabajó en conjunto con el Gobierno del Estado de Jalisco para la implementación de su plataforma InfraJal para poder tener un punto referente de implementación para cualquier gobierno en Latinoamérica que pretenda incorporar servicios para sus ciudadanos en la Nube. Se desarrolló el análisis cualitativo y cuantitativo en las oficinas tributarias del Gobierno del Estado de Jalisco.

Esta infraestructura requiere la virtualización de servicios proporcionada por NFV, con la transferencia de datos definida en OpenStack, con el servicio Neutron, que permite el ensamblaje del conjunto de aplicaciones que darán servicio a los ciudadanos, recopilando datos de los dispositivos IoT instalados en las agencias recaudadoras, nutriendo así, las funcionalidades de las aplicaciones implementadas [9].

Las Bases de datos del sistema de información financiera del Estado de Jalisco donde se registra el recaudo de infracciones fotográficas y otras, se encuentran instaladas en máquinas virtuales, interactúan con los sensores Middleware-IoT instalados en las oficinas recaudadoras para ser alimentadas.

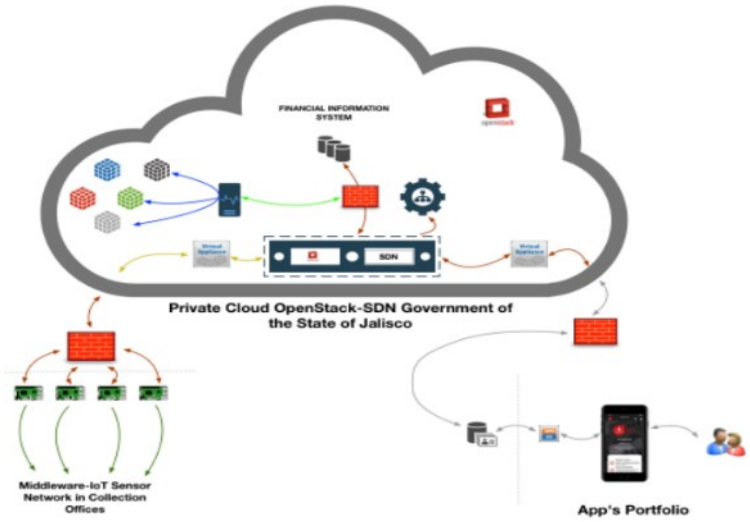


Figura 4, Plataforma de nube para servicios de gobierno con OpenStack y SDN en oficinas de gobierno del estado de Jalisco [8]

La plataforma utiliza la infraestructura para guardar las notificaciones recolectadas de los fotosensores en las calles que indican que el vehículo ha cometido alguna infracción, también registra los datos de los dispositivos IoT que indican la cantidad de personas que se encuentran dentro de las oficinas recaudadoras. Con esta información alimentan a la App InfraJal para indicar al ciudadano si cuenta con algún adeudo en infracciones y si es viable acudir a las oficinas recaudadoras y llevar a cabo el pago de forma rápida y eficiente. Con el uso de SDN se prioriza el tráfico de los datos de interés que permiten la eficiencia de la atención de solicitudes concurrentes, permitiendo hacer una clasificación de los paquetes de información transportados.

Con esta arquitectura se posibilita la oferta de servicios portables, que permanezcan disponibles para ciudadanos y autoridades. Se implementan máquinas virtuales que manejan las bases de datos con la información financiera permitiendo que la nube interactúe como el Middleware-IoT con las controladoras en las oficinas de cobro que alimentan a la base de datos. Es posible mostrar en tiempo real información respecto al estado administrativo de la unidad vehicular, brinda al ciudadano una opción para poder hacer su pago en línea o en las oficinas de cobranza ya que la App es capaz de proporcionar el estado de la Oficina de Recaudación respecto a su ubicación, si se encuentra cerrada o abierta e incluso la cantidad del volumen de ciudadanos que se encuentran en ella para calcular que tanto sea posible ser atendido de forma ágil.

Es en esta etapa donde se identifica un beneficio directo a los ciudadanos, ya que dejan de necesitar la movilización hacia las oficinas de gobierno, teniendo una disminución de costos económicos y de tiempo de traslado hacia oficinas recaudadoras con la integración de servicios de pagos en línea.

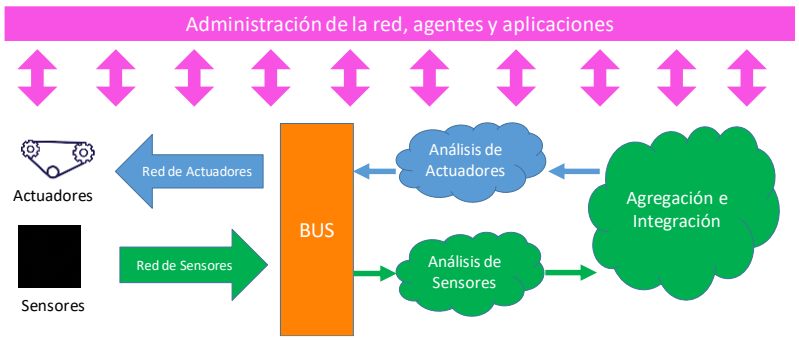


Figura 5, Componente de infraestructura en la arquitectura del IoT (Cedillo-Elias, 2020)

Infraestructura

Como parte de la infraestructura propuesta se requiere considerar dispositivos físicos, este componente abarca los dispositivos físicos, elementos de la red como lo son los agentes, aplicaciones y el elemento administrativo de la misma, en la cual interactúan sensores y actuadores IoT, esta interacción se representa en la Figura 5.

Se busca que garantizar comunicación, control y captura de información a través de sensores y actuadores que pertenezcan a un grupo de redes y plataformas. Elementos para considerar: las plataformas pueden conformarse de redes alámbricas e inalámbricas, los datos requieres ser almacenados y analizados, para ello se deben transportar dentro de la misma red, en el borde o en la nube.

Se requiere de una capa de administración completa, con aplicaciones y agentes con el objetivo de lograr el control y la administración de la infraestructura IoT.

Integración

La infraestructura debe ser capaz de integrar de forma efectiva a las aplicaciones, las herramientas, la seguridad, garantizando siempre la disponibilidad e integridad de los datos e información que se transporta en ella.

Seguridad

Es necesario identificar los elementos que brindan los proveedores de plataformas de nube con las que interactuara la infraestructura además de los componentes físicos, considerando la actualización adecuada y continua de firmwares o elementos que ofrezcan los dispositivos involucrados.

La tabla 1 presenta el comparativo de las variables consideradas entre las redes tradicionales y las redes SDN incorporadas a la infraestructura propuesta.

Al utilizar la herramienta en la nube OpenStack el incremento en el ancho de banda es factible debido a la disponibilidad bajo demanda que nos brinda en base a los criterios que se definieron en el entorno.

Tabla 1, Comparación de Variables entre redes tradicionales y redes SDN [6]

VARIABLE	Redes Tradicionales	Redes SDN
Ancho de Banda	Definido y distribuido deforma equivalente a los dispositivos	Puede variar y dar preferencia a flujos previamente definidos
Saturación de la red, Jitter	Tienden a saturarse ciertos enlaces. Varía de acuerdo con el medio y la cantidad de dispositivos	Al tener una visión Global es capaz de cambiar los enlaces para la transmisión de datos. Pueden garantizarse sobre ciertos flujos de datos.
Throughput	Bueno con pocos dispositivos Es susceptible a los cuellos de botella	Se mantiene a pesar del incremento de dispositivos, debido a que depende de un dispositivos generalmente virtualizado
Costos	Cuánto cuesta el despliegue de la infraestructura	Dependientes
Cantidad de dispositivos conectados	Estático	Masivo y variable
Recursos Humanos	Requiere alta movilización de personal para controlar los dispositivos	Al ser de administración remota se reduce el personal para mantenimiento

Sin la necesidad de hacer grandes inversiones económicas el Jitter y el Throughput presentan mejoras, incrementando la capacidad de procesamiento, así como la memoria de los dispositivos de forma rápida y transparente.

La virtualización de distintos elementos genera una reducción de costos tanto en la adquisición de dispositivos como en su mantenimiento, en caso de requerir mayor almacenamiento, procesamiento o memoria, se vuelve transparente, rápido y sencillo, además facilita el trabajo de SDN. Es posible el incremento de dispositivos de forma masiva , con SDN los Open vSwitches se crean o modifican en función a la cantidad de dispositivos requeridos, al contrario de lo que limita a las redes tradicionales que incrementan los requerimientos de acceso a electricidad, enlaces físicos, instalaciones físicas, etc. Se disminuyen los problemas de saturación de enlaces ya que SDN permiten disminuir la dependencia de protocolos de capa 3 tradicionales que no garantizan la selección del mejor camino en la entrega de datos, a través de la Controladora central de SDN es capaz de visualizar el entorno de red de una forma completa y permite analizar en tiempo real cuál camino en a red es la mejor opción para la entrega de datos para modificar de forma inmediata y transparente para el usuario el comportamiento de la red.

Se disminuyen los recursos humanos que deben interactuar en el mantenimiento de la red, así como al tener de forma centralizada el control disminuye la necesidad de traslado para mantenimientos y supervisión; sin embargo, las habilidades técnicas que se requieren se incrementan debido al dominio de las tecnologías involucradas, redes tradicionales, virtualización, redes SDN, etc.

Tabla 2, Comparación de Variables entre redes tradicionales y redes SDN [6]

VARIABLE	Arquitectura convencional	Arquitectura propuesta	Descripción
Ancho de Banda	-Transmite todos los paquetes de datos generados en los dispositivos $BW_n \neq BW_e$	-Se optimiza con la discriminación de paquetes no requeridos $BW_n \approx BW_e$	Las redes SDN tienen la capacidad de seleccionar los paquetes de datos que deberán transportarse en la red, en este caso paquetes con encabezado MQTT El ancho de banda debe ser optimizado desde el ISP, lo cual puede alcanzarse de forma inherente con la implementación de las redes 5G
Jitter	Mediana 0.046	Mediana 0.004	De estos valores podemos definir que en la red propuesta se reduce más de diez veces el retraso en la entrega de paquetes
Throughput	0.97494 Mbits	1.99261 Mbits	La arquitectura propuesta presenta un mejor desempeño que la arquitectura convencional de redes
RTT	6.019 ms	4.486 ms	El tiempo en recibir el acuse de recibo de los datos es menor en la propuesta presentada, implementando redes SDN virtualizadas.
Costos	Dependiente del tamaño de la red	Menor	Virtualización de dispositivos de red y equipos de control y almacenamiento
Cantidad de dispositivos conectados	Fijos	Variables	Virtualización de servicios y dispositivos sobre la nube
Recursos Humanos	Muchos	- Menos - Más especializados	En redes grandes se requieren muchos debido a que la administración, mantenimiento y actualizaciones se hacen en sitio. Las redes SDN permiten la administración y actualizaciones de forma remota.

RESULTADOS

La arquitectura

La infraestructura es una red jerárquica que trabaja sobre una estrella extendida que reutiliza los recursos y cableado existente, incorporando protocolos MQTT y OpenFlow, Probada en plataforma de nube para servicios de gobierno en el Estado de Jalisco.

El ancho de banda se optimiza debido a la selección de paquetes realizado por la red SDN, dando permeabilidad hacia la migración a redes 5G. El jitter y el RTT presentan una reducción. El Throughput mejora. Los costos y la cantidad de dispositivos requeridos disminuyen gracias a la virtualización, así como la cantidad de personas que se requieren para su administración, aunque las personas requieren capacitación más especializada.

Fue necesaria la utilización de los protocolos descritos en las secciones anteriores, como lo son MQTT y OpenFlow.

Tabla 3, Elementos de la arquitectura de comunicaciones basada en SDN para el desarrollo de las Ciudades inteligentes [6]

Característica	Como la alcanzamos	Objetivo	Para…
Híbrida	Red heredada	Reutilización de infraestructura	Reducción de costos
	Red SDN (OpenFlow protocol)	Soporte y administración de la red de sensores	Trabajar con IoT
Virtualización	De dispositivos intermedios	Open vSwitch	Escalabilidad Multiplataforma
Ambiente de Nube	Plataforma IaaS	Multi-tenant	Soporte de muchos usuarios
Protocolos	TCP/IP	Compatibilidad con las redes heredadas	Interoperabilidad
	MQTT	Soporte de la red de sensores	IoT
QoS	SDN	Garantizar la entrega de paquetes MQTT	Almacenamiento o análisis
Portabilidad y disponibilidad de servicios	Servicios en la nube	Los servicios ofertados estén disponibles	Beneficio de los ciudadanos
Seguridad	A nivel de capas	Garantizar: • entrega de paquetes • integridad de los datos • disponibilidad de los servicios	

Los elementos requeridos en la arquitectura se describen en la Tabla 2. Se requiere una infraestructura híbrida permitiendo el trabajo en conjunto de las redes heredadas con las redes emergentes que son en plataformas de nube, como lo son las redes SDN. Algunos de los dispositivos involucrados deben estar virtualizados que le permitirá su escalabilidad multiplataforma. Incorporar Ambientes de nube que permita el soporte de muchos usuarios. Mezcla de protocolos TCP/IP, con los emergentes que soporten dispositivos IoT, un ejemplo es MQTT e incorporando Calidad en el Servicio (QoS) con servicios en la Nube que abonen a garantizar la entrega de paquetes, la integridad de los datos y la disponibilidad de los servicios en las redes.

CONCLUSIONES

De la implementación de la arquitectura propuesta en oficinas recaudadoras del Gobierno del Estado de Jalisco nos permite asegurar que las plataformas de Nube son viables para montar servicios para los ciudadanos.

La virtualización permite la disminución de costos de instalación, incremento y mantenimiento, factor que beneficia su implementación en países en vía de desarrollo.

La infraestructura de comunicaciones se debe diseñar en módulos que interactúen entre ellos brindando servicios en base a los requerimientos de cada módulo.

AGRADECIMIENTOS

Dr. José Antonio Orizaga Trejo, Mtro. Carlos Lomas Moreno, Dr. Víctor Manuel Larios Rosillo

BIBLIOGRAFÍA

B. Roseth, A. Reyes, C. Santiso; “El fin del trámite eterno, ciudadanos, burocracia y gobierno digital”, *Banco Interamericano de Desarrollo, BID*, Junio 2018
Documento en:https://publications.iadb.org/en/publications/spanish/viewer/El-fin-del-tr%C3%A1mite-eterno-Ciudadanos-burocracia-y-gobierno-digital.pdf, (ultimo accesso 05 de mayo, 2024); http://dx.doi.org/10.18235/0001150
De Estadística y Geografía, I. N. (s. f.). *Gobierno electrónico*. https://www.inegi.org.mx/temas/gobierno/#herramientas , (ultimo accesso 05 de mayo, 2024)
Tayyaba, S. K., & Ahmed, A. W. (2017). *Software Defined Network (SDN) Based Internet of Things (IoT): A Road Ahead*. https://doi.org/10.1145/3102304.3102319
Rios-Paredes, Ramiro. (2016). Conceptualización de SDN y NFV. MASKAY. 6. 29. 10.24133/maskay.v6i1.163.
Open source cloud computing platform software - OpenStack. (s. f.). OpenStack. https://www.openstack.org/software/
Cedillo-Elias, Elsa Julieta (2020). Desarrollo de una arquitectura de comunicaciones basada en SDN para el desarrollo de las ciudades inteligentes en convergencia a las redes 5G. Tesis de doctorado, Universidad de Guadalajara
E. J. Cedillo-Elias, J. A. Orizaga-Trejo, V. M. Larios and L. A. Maciel Arellano, "Smart Government infrastructure based in SDN Networks: the case of Guadalajara Metropolitan Area," *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISC2.2018.8656801.
E. J. Cedillo-Elias, V. M. Larios, J. A. Orizaga-Trejo, C. E. Lomas-Moreno, J. R. B. Ramirez and R. Maciel, "A Cloud Platform for Smart Government Services, using SDN networks: the case of study at Jalisco State in Mexico," *2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Casablanca, Morocco, 2019, pp. 372-377, doi: 10.1109/ISC246665.2019.9071680.
Chapter 1. OpenStack Networking and SDN Red Hat OpenStack Platform 10 | Red Hat Customer Portal. (s. f.). Red Hat Customer Portal. https://access.redhat.com/documentation/es-es/red_hat_openstack_platform/10/html/networking_guide/openstack_networking_and_sdn
Servicios en Línea. (s. f.). https://gobiernoenlinea1.jalisco.gob.mx/spelweb/
Jalisco. (s. f.). Jalisco | Gobierno del Estado de Jalisco. https://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/159833

CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EXTREMO PARA DETERMINAR LA INUNDACIÓN COSTERA POR REBASE DE OLEAJE EN EL PUERTO DE VERACRUZ, VERACRUZ

Felícitas Calderón Vega, Adrián David García Soto, Guadalupe Vázquez Rodríguez, Eladio Delgadillo Ruiz, David Tirado Torres, Luz Adriana Arias Hernández, Saúl Villalobos Pérez, Natividad Ramírez Ramírez

Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Sede Belén. Av. Juárez 77 Zona Centro. C.P. 36050.

f.calderon@ugto.mx

RESUMEN

El estudio del clima marítimo extremo ha cobrado especial importancia en zonas costeras por las afectaciones que puede ocasionar en el corto, mediano y largo plazo en los puertos, los cuales representan un eje fundamental de la economía de los países. La incertidumbre generada por el cambio climático hace necesario un enfoque distinto en la gestión de los riesgos asociados al mar (Olcina, 2008; [IPCC], 2013). En este trabajo se determinan las situaciones de temporales extremos mediante el análisis de datos de oleaje en dos boyas localizadas en el golfo de México comparándolas con las notas de prensa que ubican los eventos en el tiempo y comentan los daños causados directamente en las zonas afectadas. Los objetivos principales del presente trabajo de investigación es la caracterización de eventos máximos de clima marítimo mediante análisis estadístico y periodístico de datos de oleaje, viento y temperatura, así como el análisis de inundaciones costeras y rebase de oleaje en obras del puerto de Veracruz, Ver.
Para este trabajo se utilizarán datos de oleaje significante, viento y temperatura tomados de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), el cual tiene un servicio meteorológico designado al diseño, desarrollo, operación y mantenimiento de una red de boyas para la recolección de datos y estaciones costeras, la NDBC (National Data Buoy Center). La información periodística se trabaja mediante una base de datos específica, partiendo de la importancia que se atribuye a la prensa como medio que documenta, relata y analiza fenómenos naturales adversos, en función de sus secuelas ambientales, sociales y económicas.

El análisis de datos de las boyas se realiza con ayuda de un programa de caracterización de regímenes climáticos, el cual se ocupa de la determinación de variables oceanográficas definidas a partir de una serie temporal. En el análisis de los valores extremos, se puede observar que en los últimos años los eventos ciclónicos y frentes fríos han aumentado en intensidad y se esperan valores de altura de ola mayores. Las obras de protección del puerto están diseñadas para un rebase de oleaje de 7 metros, una vez alcanzado este nivel, se presenta un rebase de ola y el puerto debe cerrar operaciones, ya que se pierde el propósito de albergue con el cual son diseñados los puertos. Los 13 huracanes analizados en el presente estudio más los frentes fríos en la temporada invernal muestran que al menos 2 veces al año el puerto permanece cerrado a la navegación por peligro de rebase de oleaje.

INTRODUCCIÓN

Veracruz tiene el principal puerto comercial del país, que cuenta con terminales especializadas para el manejo de contenedores, automóviles, granos y minerales, por lo que la Aduana de este puerto se ha convertido en la segunda captadora de impuestos a nivel nacional. Cuenta con una amplia vocación turística e infraestructura que permite el arribo de cruceros y yates; es además un sitio propicio para la práctica de los deportes náuticos y la construcción de marinas ya que se ubica frente al sistema arrecifal veracruzano, uno de los más importantes y extensos de la República. La zona costera está sujeta a una influencia marina directa, a través de las acciones de vientos y corrientes de deriva litoral que transportan sedimentos, y que son depositados o removidos del litoral. Las playas cercanas del puerto de Veracruz tienen una amplitud promedio de 28 m, con una pendiente

del 3.19% y una altura promedio de 1.3 m. El puerto se encuentra ubicado en la zona centro del estado, en la región Sotavento en las coordenadas 19° 12´ 02" N, longitud 96° 08´ 15" W, a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de La Antigua y el Golfo de México; al sur con los municipios de Medellín y Boca del Río; al este con el Golfo de México y al oeste con los municipios de Manlio Fabio Altamirano y Paso de Ovejas.

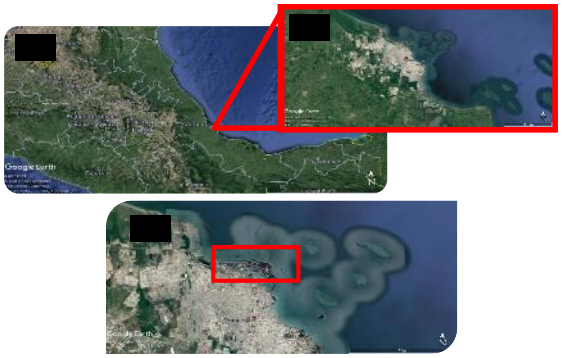
Objetivos

1. Caracterización de eventos máximos de clima marítimo mediante análisis estadístico y periodístico de datos de oleaje, viento y temperatura en el puerto de Veracruz, Veracruz.
2. Análisis de inundaciones costeras y rebase de oleaje en obras del puerto de Veracruz.

Área de Estudio

El área de estudio de este proyecto se localiza en el estado de Veracruz, que está ubicado en la parte central de la vertiente del Golfo de México, cuenta con una superficie aproximada de 73 mil kilómetros cuadrados (3.7 por ciento del territorio nacional) y está compuesto por 212 municipios dentro de los cuales destaca el municipio de Veracruz. Dentro del municipio de Veracruz se encuentra el puerto marítimo comercial más antiguo e importante del país, el cual es el objetivo principal de este trabajo. (Figura 1)

Figura 1. Área de estudio. A) Estado de Veracruz, B) Localización del municipio de Veracruz, C) Ubicación del Puerto de Veracruz



Obras de protección

Existen cuatro obras de protección al puerto principales que cuentan con rompeolas:

- Rompeolas NW: Marca el extremo S de la bahía de Vergara, con una longitud de 1,085 m una corona de 6.5 m de ancho y 4.3 m de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- Rompeolas NE: Se extiende hacia el SE desde el Arrecife la Gallega, tiene 7,389 m. de longitud, con una corona de 7.3 m de ancho y 3.8 m de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- Rompeolas SE: En la entrada de la bocana, se extiende al NNE, desde el Arrecife Hornos, hasta el arrecife de la Lavandera; en el lado S de la entrada al puerto, con una longitud de 800 m una corona de 4 m de ancho y 2.6 m de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- Rompeolas Muro de Pescadores: Al SE de la bahía, separa ésta del antepuerto, con 1,130 m de longitud, una corona de 10 m de ancho y 2.5 m de altura, construido de piedra y bloques de concreto.

METODOLOGÍA

Las fuentes consultadas para la obtención de información oceanográfica de la zona fueron dos boyas del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), la prensa regional y nacional así como el Servicio Meteorológico (Mediport). La metodología empleada es de carácter cuantitativo y cualitativo, el análisis estadístico se efectúa sobre parámetros del oleaje aportados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), tales parámetros son altura de ola significante (Hs, metros), la velocidad del viento (Vw, m/s) y temperatura de la superficie del mar (T, °C). Además del análisis cualitativo en la prensa donde se informa de los percances ocurridos en el puerto debido a los eventos extremos presentados en la región.

Análisis de datos

El análisis de datos de las boyas se realiza con ayuda del programa de caracterización de regímenes climáticos (CAREC), el cual se ocupa de la determinación de variables oceanográficas definidas a partir de una serie temporal.
La estructura básica del programa consta de tres módulos:

1. Información preliminar. Estadística descriptiva de los datos.
2. Caracterización del régimen Medio de una determinada variable.
3. Caracterización del régimen Extremal de una variable.

Cada módulo contiene varias herramientas. La estructura de cada módulo se describe en el siguiente esquema:

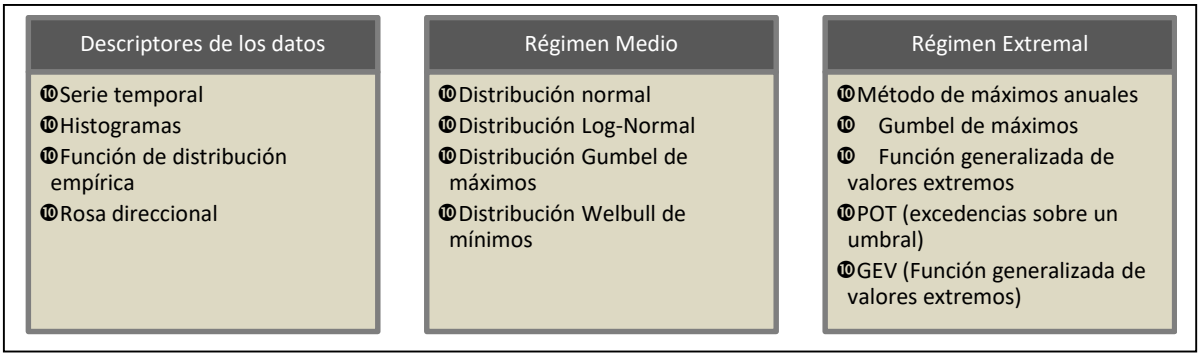


Figura 2. Estructura básica del programa CAREC

Datos de estudio

Para este trabajo se utilizarán datos de oleaje significante, viento y temperatura tomados de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), el cual tiene un servicio meteorológico designado al diseño, desarrollo, operación y mantenimiento de una red de boyas para la recolección de datos y estaciones costeras, la NDBC (National Data Buoy Center).
Las boyas en el océano profundo son generalmente boyas de disco de 10 o 12 m; las boyas amarradas en las áreas cercanas a la costa son generalmente de 6 m y son de tipo bote.
El conjunto de datos a usar en este trabajo está formado por parámetros de oleaje, viento y temperatura, que vienen descritos y determinados de la siguiente manera:
Viento. Para la dirección del viento, contemplando que es la dirección de la que proviene el viento en grados en sentido horario desde el N verdadero, durante el mismo período utilizado para la velocidad del viento. Se mide en metros sobre segundos (m / s) y para cada dato se considera un promedio durante un período de ocho minutos para las boyas y un período de dos minutos para las estaciones terrestres, el cual es reportado por hora.
Oleaje. En el caso del oleaje, el dato que se registra es la altura de ola significativa, la cual tiene una metrología en metros (m) y se calcula como el promedio del tercio más alto de todas las alturas de ola durante el período de muestreo de 20 minutos.

Temperatura. Se considera que la temperatura sea de la superficie del mar, tomando como medida los grados Celsius (°C). Teniendo de referencia, que el tipo de equipo es una boya, aclarando que la profundidad se refiere a la línea de flotación del casco.

Boyas

Estación 42055, con coordenadas 22.124 N 93.941 W (22 ° 7'25 "N 93 ° 56'26" W). Se encuentra a 214 millas náuticas al noreste del municipio de Veracruz. Contiene datos desde el año 2005 hasta el año 2019, teniendo 14 años de datos efectivos sobre la altura de ola. En la figura 3.2.2 se muestra la ubicación de la boya. (Figura 3)

Figura 3. Estación 42055

Estación VERV4, se localiza en las coordenadas 19.204 N 96.113 W (19°12'16" N 96°6'47" W Es una estación operada por el Departamento US EPA y Gobierno mexicano mediante un programa de cooperación conjunta. Se encuentra al nivel del mar, la altura de toma de datos es a los 9.1 metros de la elevación, el anemómetro toma las medidas también a los 9.1 metros de altura. El barómetro mide al nivel del mar.

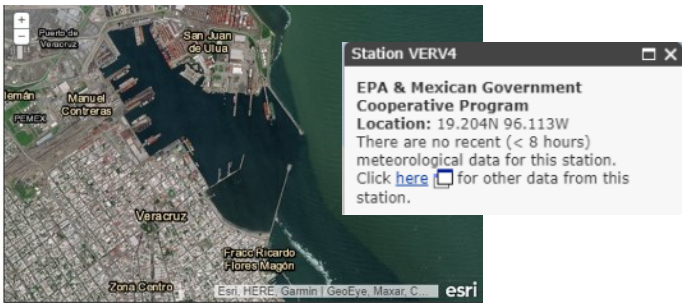


Figura 3. Estación VERV4

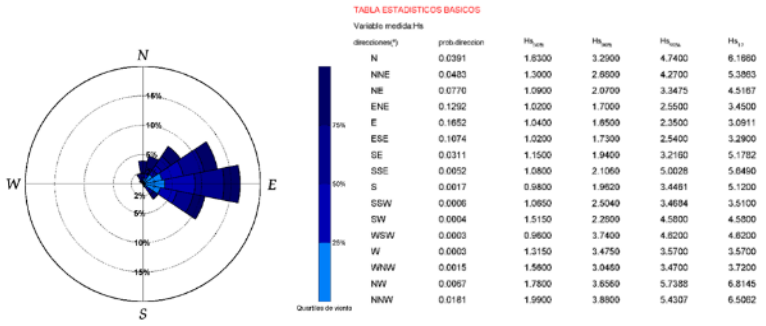
La información periodística se trabaja mediante una base de datos específica, partiendo de la importancia que se atribuye a la prensa como medio que documenta, relata y analiza fenómenos naturales adversos, en función de sus secuelas ambientales, sociales y económicas (Diaz, 1995) (Máyer, 1999) (Yanes & Marzol, 2009).

DESARROLLO

Altura de ola significante

Boya 42055

La Figura 4 representa la rosa de oleaje de los datos de la boya 42055, dentro del periodo 2005-2019, así como la información correspondiente a los estadísticos básicos de la variable altura de ola significante de este registro de datos, con la probabilidad de ocurrencia asociada a cada una de las direcciones de procedencia del oleaje.



direcciones(°)	prob.direccion	$Hs_{50\%}$	$Hs_{95\%}$	$Hs_{99\%}$	Hs_{Max}
N	0.0391	1.6300	3.2900	4.7400	6.1660
NNE	0.0483	1.3000	2.6600	4.2700	5.3863
NE	0.0770	1.0900	2.0700	3.3475	4.5167
ENE	0.1292	1.0200	1.7000	2.5500	3.4500
E	0.1652	1.0400	1.6500	2.3500	3.0911
ESE	0.1074	1.0200	1.7300	2.5400	3.2900
SE	0.0311	1.1500	1.9400	3.2160	5.1782
SSE	0.0052	1.0800	2.1060	5.0028	5.6490
S	0.0017	0.9800	1.9620	3.4481	5.1200
SSW	0.0006	1.0650	2.5040	3.4684	3.5100
SW	0.0004	1.5150	2.2500	4.5800	4.5800
WSW	0.0003	0.9600	3.7400	4.8200	4.8200
W	0.0003	1.3150	3.4750	3.5700	3.5700
WNW	0.0015	1.5600	3.0450	3.4700	3.7200
NW	0.0067	1.7800	3.6560	5.7388	6.8145
NNW	0.0181	1.9900	3.8800	5.4307	6.5062

Figura 4. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019).

Los oleajes provienen del primer y segundo cuadrante, es decir que el oleaje principal resulta del este. Para la variable de altura de ola significante, Hs, se han obtenido además otros descriptores básicos, como el histograma y la función de distribución empírica, extrayéndose de esta última que la mitad del tiempo los oleajes en aguas profundas del golfo de México presentan alturas de ola en torno a 1.07 m. El oleaje significativo con mayor frecuencia oscila entre 0.8 y 1.2 metros. (figura 5)

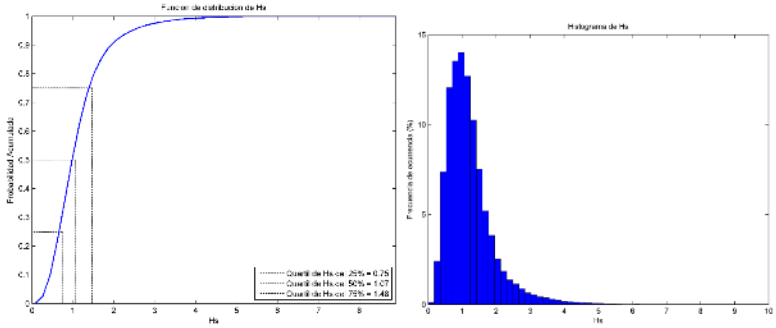


Figura 5. Histograma y función de distribución de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019).

Puede observarse el registro de una altura máxima de oleaje significante de 8.89 metros provocada por el paso del huracán de grado 2 “DEAN” el 22 de agosto de 2007.

Estación VERV4
En esta estación se analizan los datos de viento y se utiliza el modelo de relación entre la Hs y Viento que recomiendan NATO - STANAG 4194 (1983) propuesta para aguas costeras:

$$\boldsymbol{U_W = 3.2 H_S}$$

El cual corresponde a la relación para el espectro JONSWAP para un fetch de X= 360 km (Elzbieta M. Bitner-Gregersen):

$$\boldsymbol{H_S = 0.0163 X U_W}$$

Donde Hs es altura de ola significante en metros y Uw es el viento en m/s. Los resultados para la Hs calculada mediante este método se muestran en las siguientes figuras:

En la figura 6 se representa la rosa de oleaje de los datos de la estación VERV4, en el periodo 2010-2016, así como la información correspondiente a los estadísticos básicos de la variable altura de ola significante de este registro de datos, con la probabilidad de ocurrencia asociada a cada una de las direcciones de procedencia del oleaje. Los oleajes provienen principalmente del Norte (Son los oleajes que inciden en el puerto de Veracruz)

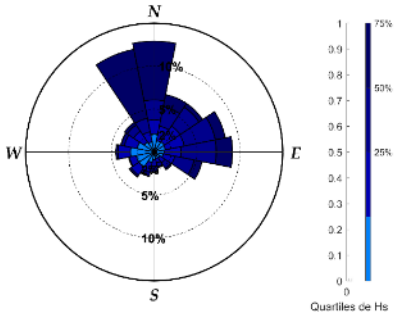


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida:Hs

direcciones(°)	prob.direccion	$Hs_{25\%}$	$Hs_{50\%}$	$Hs_{75\%}$	Hs_{12}
N	0.1289	2.0313	3.9688	5.6875	6.6892
NNE	0.0680	1.3125	2.3750	3.5187	4.5353
NE	0.0679	1.1875	1.6438	2.8250	3.8021
ENE	0.0845	1.3125	2.0313	2.5938	3.9457
E	0.0914	1.4688	2.2188	2.8438	3.3750
ESE	0.0658	1.3438	2.0644	2.7188	4.0960
SE	0.0249	1.0625	1.8438	2.5872	3.0215
SSE	0.0186	0.9063	1.7625	2.5741	4.0284
S	0.0239	0.9375	1.6563	2.4775	3.4630
SSW	0.0290	0.8438	1.3750	2.1563	3.2074
SW	0.0351	0.6875	1.1563	2.0638	4.3426
WSW	0.0305	0.6250	1.0000	1.7872	3.2093
W	0.0448	0.6875	1.0625	1.6394	2.7629
WNW	0.0398	0.7500	1.2500	1.9831	3.8198
NW	0.0416	0.9375	1.8750	3.7175	4.5462
NNW	0.1218	2.6875	4.7813	6.3438	7.4063

Figura 6. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Hs de la boya VERV4 (2010-2016).

En el histograma y la función de distribución empírica (figura 7), se muestra que la mitad de los oleajes es de 1.2 metros. El oleaje significativo con mayor frecuencia oscila entre 1.2 y 1.5 metros.

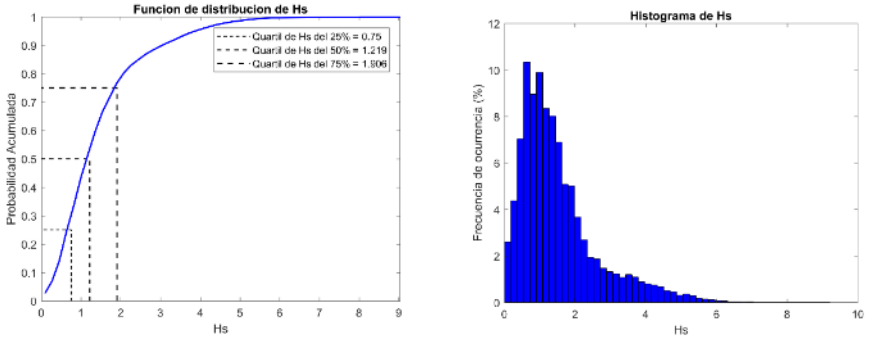


Figura 7. Histograma y función de distribución de la variable Hs de la estación VERV4 (2010-2016).

En la figura 8 se presentan las alturas de ola significante y puede observarse que en este periodo de tiempo hubo varias alturas de ola debidas a eventos extremos como nortes y huracanes. La mayor altura de ola significante calculada fue de 9 metros ocasionada por el huracán Karl el 17 de septiembre de 2010

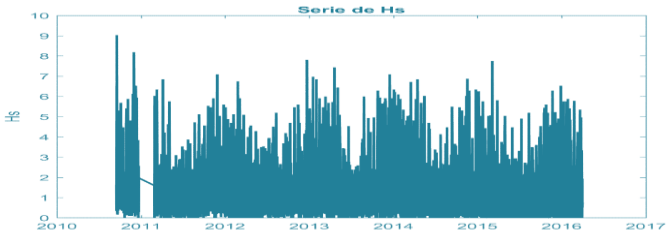


Figura 9. Serie de la variable Hs de la estación VERV4

En la figura 10. se observa el comportamiento general del oleaje en la zona de estudio. Puede observarse que el oleaje entra por el este en el golfo de México y cambia de dirección en el proceso de refracción del oleaje y al llegar al puerto de Veracruz desde el norte.

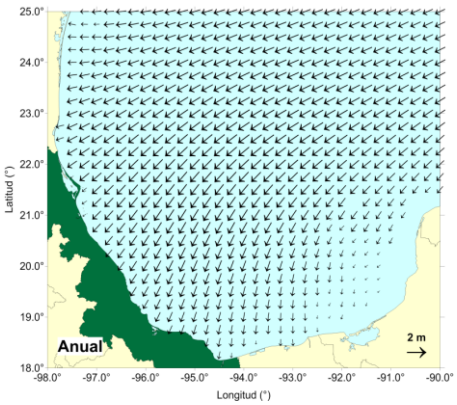


Figura 10. Dirección e intensidad de altura de ola media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas.

Temperatura

Boya 42055

Para la temperatura se presenta la figura 4.1.8, donde se encuentra la función de distribución de temperatura y se puede observar que el cuartil de 50% es igual a 27.9 °C,

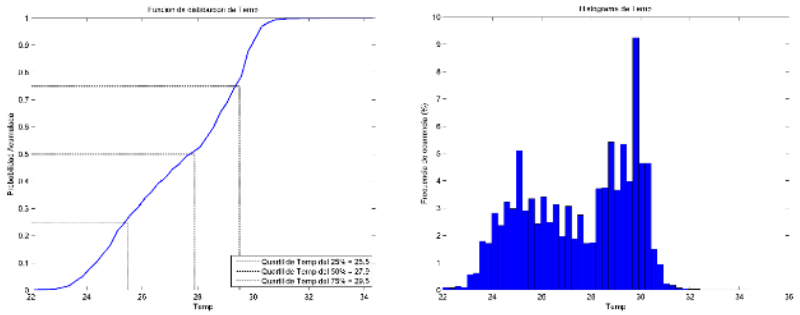


Figura 11. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la boya 42055 (2005-2019).

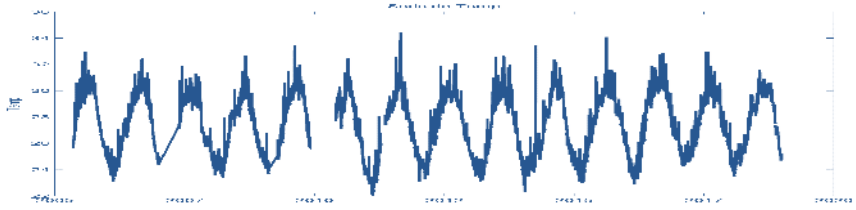


Figura 12. Serie de la variable de temperatura de la boya 42055 (2005-2019).

Para la temperatura de la boya 42055 (figura 12) se presenta una temperatura del agua máxima de 34.40 °C el 28 de agosto del 2011 y una temperatura de agua mínima de 22.00 °C el 13 de febrero del 2011. La temperatura con frecuencia esta alrededor de los 30 °C

Estación VERV4

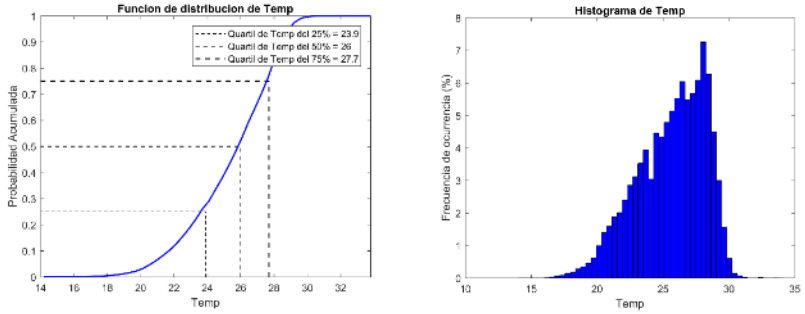


Figura 13. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la estación VERV4 (2010-2016).

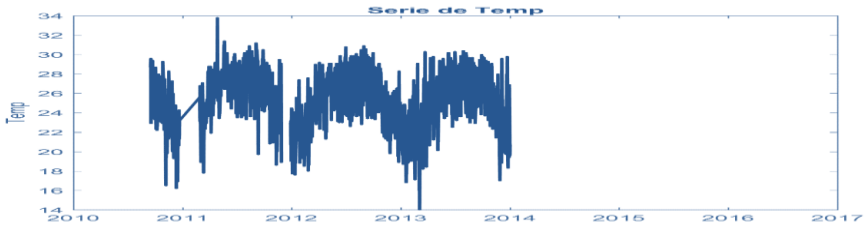


Figura 14. Serie de la variable de temperatura de la estación VERV4 (2010-2014)

Viento

Boya 42055
Análogamente se representa la distribución sectorial del viento, así como sus estadísticos básicos. Los vientos provienen principalemnte del este y la frecuencia del viento oscila entre 5 m/s y 7 m/s.

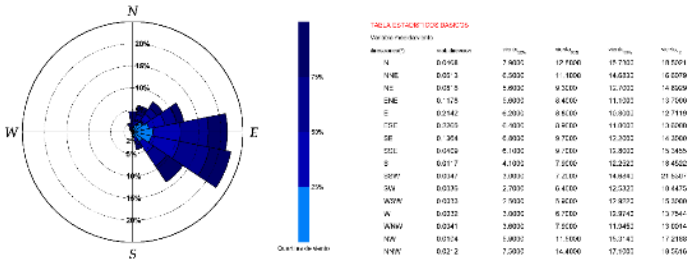


Figura 15. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Viento de la boya 42055 (2005-2019).

Asimismo se representa el histograma del viento y su función de distribución empírica, de la que se extrae que el 50% del tiempo el viento es de 6.2 m/s (Figura 16).

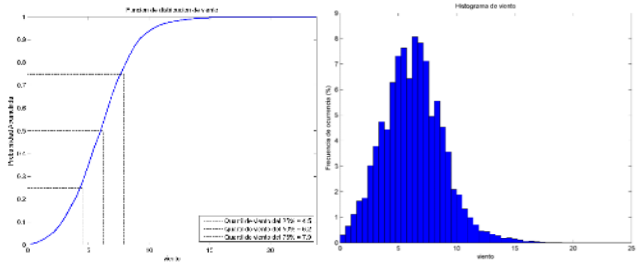


Figura 16. Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la boya 42055 (2005-2019).

En la siguiente figura (figura 17) se muestra que la velocidad del viento maxima fue de 23.8 m/s el 22 de agosto del 2007 provocado tambien por el huracan DEAN.

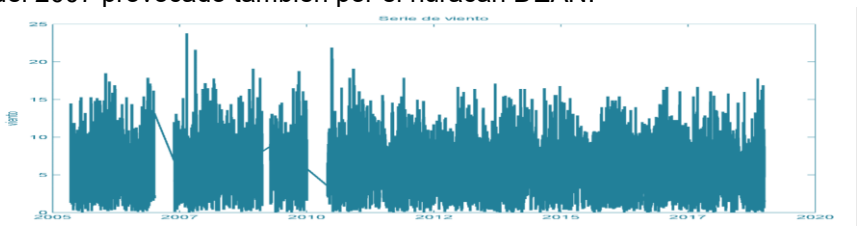


Figura 17. Serie de la variable de viento de la boya 42055 (2005-2019).

Estación VERV4
En la figura siguiente se muesta que en la estación VERV4 el viento proviene principlamente de la dirección Norte.

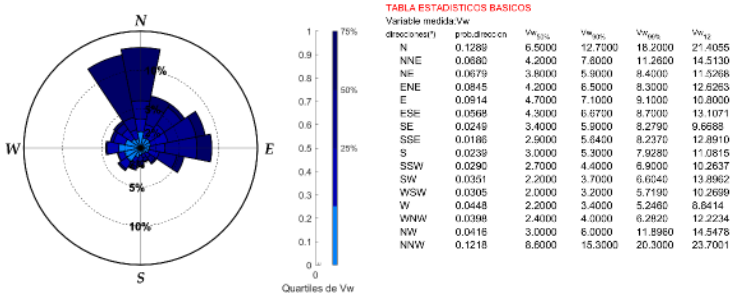


TABLA ESTADISTICOS BASICOS
Variable medida:Vw

direccion(est°)	prob.direccion	$Vw_{50\%}$	$Vw_{90\%}$	$Vw_{95\%}$	Vw_{99}
N	0.1289	6.5000	12.7000	18.2000	21.4055
NNE	0.0682	4.2000	7.8000	11.2600	14.5130
NE	0.0679	3.8000	5.9000	8.4000	11.5268
ENE	0.0845	4.2000	6.5000	8.3000	12.6253
E	0.0914	4.7000	7.1000	9.1000	10.8000
ESE	0.0568	4.3000	6.6700	8.7000	13.1071
SE	0.0249	3.4000	5.9000	8.2790	9.6688
SSE	0.0186	2.9000	5.6400	8.2370	12.8910
S	0.0239	3.0000	5.3000	7.9280	11.0815
SSW	0.0290	2.7000	4.4000	6.9000	10.2637
SW	0.0351	2.2000	3.7000	6.6040	13.8962
WSW	0.0305	2.0000	3.2000	5.7190	10.2699
W	0.0448	2.2000	3.4000	5.2460	8.8414
WNW	0.0398	2.4000	4.0000	6.2820	12.2234
NW	0.0416	3.0000	6.0000	11.8980	14.5478
NNW	0.1218	8.6000	15.3000	20.3000	23.7001

Figura 18. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos del Viento de la estación VERV4

En la función de distribución puede observarse que el 50% de los datos corresponden a una velocidad del viento de 3.9 m/s. El histograma de frecuencias (figura 19) muestra que los vientos mas frecuentes son de 4.5 m/s

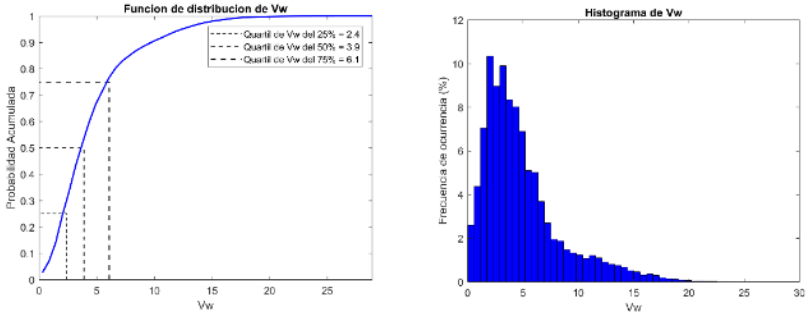


Figura 19 Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la estación VERV4

En la figura 20 se puede observar que la dirección del viento se presenta desde el este en el centro del Golfo de México y cambia de dirección de tal manera que el viento se presenta desde el norte en la zona de estudio, lo cual confirma el análisis presentado.

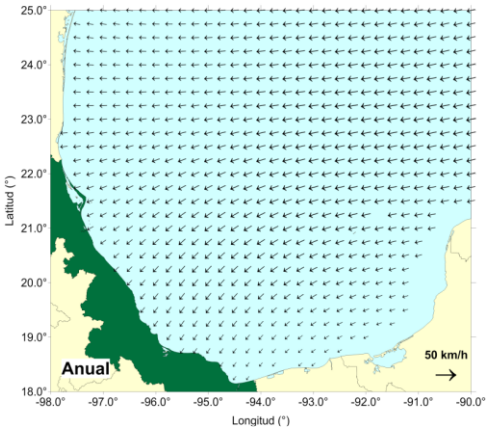


Figura 20. Dirección e intensidad de la velocidad del viento media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas.

RESULTADOS

Análisis de eventos máximos

Los ciclones tropicales que han impactado el entorno de Veracruz durante el periodo de 1930 al 2019 fueron 55 en total; de los cuales el 10.9 por ciento se desarrollaron como depresiones tropicales el 36.36 por ciento correspondieron a tormentas tropicales y el 52.77 por ciento a huracanes. Los eventos que alcanzaron la categoría 1 fueron el 46.87 por ciento, los que la intensidad de sus vientos fueron del orden 2, cubrieron el 25 por ciento los de nivel 3 tuvieron el 15.62 por ciento y los que alcanzaron las categorías 4 fueron 6.25 y categoría 5 igual, 6.25 por ciento.

Los ciclones tropicales que se formaron en aguas del Atlántico Norte fueron el 20.93%, en el Mar Caribe el 23.25 por ciento y en la cuenca del Golfo de México el 55.81 por ciento. Con relación al lugar de impacto se destaca que el 65.11 por ciento entró a tierra por la parte norte del litoral veracruzano, el 11.62 por ciento por la parte central, el 16.27 por ciento arribaron por el centro-sur y el 6.97 por ciento únicamente ingresaron por el sur.

El estado de Veracruz durante el mes de septiembre tuvo el mayor ingreso de ciclones tropicales con el 39.53 por ciento en agosto el 34.88 por ciento en julio arriban el 11.62 por ciento, pero en junio y octubre solamente el 6.97 por ciento tocan tierra respectivamente. En 48 años los ciclones tropicales no ingresaron al estado de Veracruz. Las depresiones tropicales se acentuaron en la década de 1990, aunque en 1961 se presentaron 2 en forma consecutiva en los meses de junio y julio. Asimismo, los años que tuvieron mayores impactos sobre la entidad fueron 1931, 1933, 1955 y 2005, 2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016 y 2017. (En los últimos años han entrado más huracanes al Golfo de México y alcanzado el puerto de Veracruz).

En el análisis de los años consecuentes al 2005, puede observarse que en el año 2007 impactó el Huracán Dean, que causó graves daños al puerto. “Bajo una fuerte lluvia e intensas ráfagas, la ciudad de Veracruz, la mayor en la zona de influencia del huracán y uno de los principales puertos comerciales del país, tenía la mayoría de sus comercios cerrados. Las tiendas tapizaron sus ventanas con maderas, mientras hoteles ponían cintas en vidrios que daban al agitado mar y trasladaban huéspedes a habitaciones que no miran a la playa. De acuerdo con Protección Civil, unas 15,000 personas fueran evacuadas en refugios en el estado de Veracruz” (Periódico Expansión) Lo cual indica que el puerto fue cerrado durante los días que estuvo el Huracán activo. Por otro lado, la boya 42055 registró el día 22 de agosto de 2007 una ola máxima de 8.89 metros provocada por el paso del huracán. No se cuenta con registro en la estación VERV4 para constatar

la velocidad de los vientos en el puerto, ya que esta estación aún no estaba en operación cuando ocurrió el huracán.

Los eventos que afectaron el puerto de Veracruz, en el cual se requirió el cierre al paso de los barcos y que tuvieron rebase de oleaje en el puerto, fueron: El Huracán Karl con una altura de ola de 9 metros, la tormenta Tropical Harvey el 22 de agosto con altura de ola significante de 5 metros, tormenta tropical Barry el día 20 de junio de 2013, con una altura de 4.5 metros, la tormenta tropical Fernand el día 26 de agosto de 2013 con un altura de ola de 6 metros. Del huracán Earl no se tienen datos de oleaje ni de viento, sin embargo, tomando en cuenta los datos proporcionados por la prensa que enuncian que el huracán tocó tierra en el puerto de Veracruz a una velocidad de 26.38 m/s, el oleaje calculado sería de 8.2 metros. Bajo este mismo supuesto, la tormenta tropical Danielle habría llegado a la costa con una velocidad de 20 m/s, lo que provocaría una altura de ola cerca de los 6.25 metros. El huracán Franklin llegó por el norte y no se tienen datos precisos, sin embargo, en el diario El Financiero, se puede leer lo siguiente: " El huracán 'Franklin' tocó tierra firme en Veracruz alrededor de la media noche en la zona de Lechuguillas, municipio de Vega de Alatorre, en Veracruz, según el el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Esto podría provocar inundaciones y deslizamientos en las cuencas de Pánuco, Tuxpan, Nautla, Misantla, Cazones, Tecolutla, La Antigua, Jamapa y Cotaxtla. Aunque en menor cantidad, la zona sur de Veracruz también presentará lluvias y posibles inundaciones. Además de que los puertos presentarán un fuerte oleaje de entre seis y ocho metros" (El Financiero).

Por otro lado, los nortes o frentes fríos que impactan en el estado de Veracruz en los meses de noviembre a mayo también provocan intensos vientos que suben las alturas de oleaje y contribuyen al rebase en las obras del puerto.

En el análisis de la estación VERV4 se midieron los siguientes frentes fríos que rebasaron los 6 metros de altura de ola significante:

FRENTES FRÍOS		
No.	Hs (m)	Fecha
1	8.0	30/11/2010
2	6.8	25/04/2011
3	6.9	27/11/2011
4	7.8	21/12/2012
5	6.9	16/01/2013
6	6.7	30/01/2013
7	7.4	19/04/2013
8	6.6	03/05/2013
9	6.2	15/12/2013
10	6.3	03/01/2014
11	6.7	17/03/2014
12	6.8	15/04/2014
13	6.6	17/11/2014
14	6.3	04/01/2015
15	7.7	05/03/2015
16	6.3	22/11/2015
17	6.53	28/12/2015

Tabla 1. Frentes fríos que impactaron en el puerto de Veracruz medidos en la estación VERV4 (2010-2015).

HURACANES		
Evento	Hs (m)	Fecha
Karl	9.0	14/09/2010
Dean	8.9	22/08/2007
Earl	8.2	06/08/2016
Franklin	8.0	10/08/2017
Danielle	6.2	20/06/2016
Fernand	6.0	26/08/2013
Barry	6.0	20/06/2013
Harvey	6.0	22/08/2011

Tabla 2. Huracanes que impactaron en el puerto de Veracruz medidos en la estación VERV4 (2007-2016).

Periodos de retorno

De acuerdo al análisis realizado con dos métodos distintos, se puede observar que por el método de Excedencias sobre un umbral, siendo el umbral de 5.7 metros, el oleaje significante de temporal esperado en 25 años ronda los 9.5 metros y en 50 años se esperaría que el oleaje rebase los 10 metros, esto se puede observar en la figura 21.

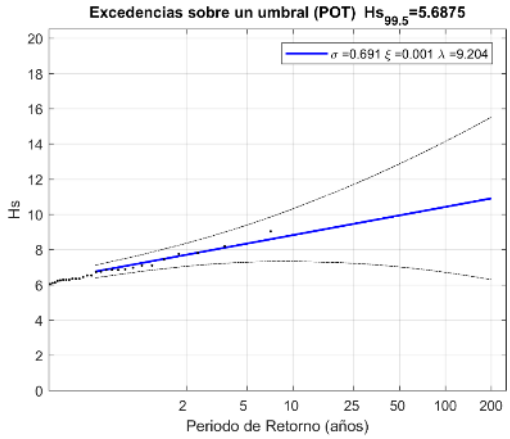


Figura 21. Ajuste de los datos al método de Excedencias sobre un Umbral.

Para el ajuste de extremos por Máximos anuales (GEV tiende a Gumbel), el oleaje de temporal esperado en 25 años sería de 9.6 metros y en 50 años se esperaría un oleaje de 10. 2 metros. (figura 22)

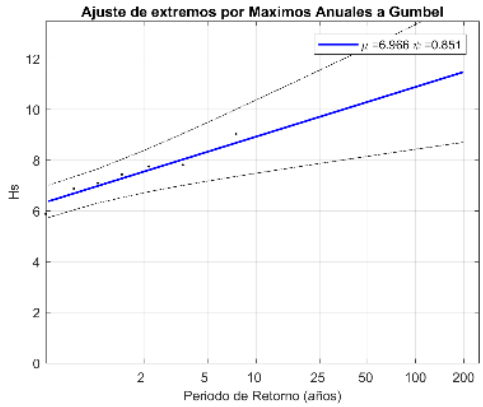


Figura 22. Ajuste de los datos al método de Máximos Anuales Gumbel.

Rebase de oleaje

La sobreelevación del nivel del mar debido a la marea meteorológica, los ciclones y frentes fríos constituye un fenómeno adverso en el puerto, ya que, una vez alcanzado el nivel máximo de diseño, se presenta el fenómeno de rebase sobre la obra de protección. De los episodios estudiados en el presente trabajo, se determina que los oleajes que rebasan los 7 metros de altura de ola significante causarán rebase en las obras, lo que obligará al puerto a cerrar actividades. De acuerdo con diversos estudios, se prevé que debido al cambio climático se presente un aumento del nivel del mar en algunos años. Los 13 huracanes analizados en el presente estudio más los frentes fríos en la temporada invernal muestran que al menos 2 veces al año el puerto permanece cerrado a la navegación por peligro de rebase de oleaje.

En el análisis de los valores extremos, se puede observar que en los últimos años los eventos ciclónicos y frentes fríos han aumentado en intensidad y se esperan valores de altura de ola mayores. Las obras de protección del puerto están diseñadas para un rebase de oleaje de 7 metros, una vez alcanzado este nivel, se presenta un rebase de ola y el puerto debe cerrar operaciones, ya que se pierde el propósito de albergue con el cual son diseñados los puertos**.**

CONCLUSIONES

Las obras de protección del puerto están diseñadas para un rebase de oleaje de 7 metros, una vez alcanzado este nivel, se presenta un rebase de ola y el puerto debe cerrar operaciones. (Por cuestiones de seguridad, el puerto se cierra a partir de un oleaje de 6 metros)

Los huracanes analizados en el presente estudio más los frentes fríos en la temporada invernal muestran que al menos 2 veces al año el puerto permanece cerrado a la navegación por peligro de rebase de oleaje.
Los análisis estadísticos realizados con el modelo CAREC a los datos de las boyas estudiadas, así como su comparación y cotejo con los datos presentados en la prensa hicieron posible que el presente trabajo se realizara de una manera pertinente y lo más completa posible. El Puerto de Veracruz es un lugar de intercambio económico y de servicios muy importante para el país y el paro o cierre del puerto en sí debido a rebases de oleaje en las obras de protección marítima significan grandes pérdidas económicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. C. Aguirre Hernández, “Huracán Franklin del Océnano Atlántico”, Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional 2017 https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2017-Franklin.pdf.
2. C. Aguirre Hernández, “Huracán Earl del océano Atlántico”, Obtenido de CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional : 2016 https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2016-Earl.pdf
3. C. Bravo Lujano, “Reseña de la tormenta tropical Barry del Océano Atlántico”, Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional 2013 https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2013-Barry.pdf
4. C. Bravo Lujano, “Reseña de la tormenta tropical Fernand del Océano Atlántico”. Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional 2013 : https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2013-Fernand.pdf
5. C. Bravo Lujano & A.Hernández Unzón, “Reseña de la tormenta tropical Harvey del Océano Atlántico”. Obtenido de SEMARNAT- Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional 2011 https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2011-Harvey.pdf

6. E. Castillo, A. Hadi, N. Balakrishnan & J. M. Sarabia “Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science”. Wiley-Interscience. 2005
7. A. Cedrero Uceda, “Impactos sobre las zonas costeras En Impactos del cambio climatico en España”. 2005 España.
8. S. Coles, “An introduction to statistical modeling of extreme values”. London: Springer. 2001
9. E. Diaz, “Riesgos climáticos y la prensa: los efectos de los fenómenos meteorológicos sobre la agricultura en España, en el diario de La Vanguardia, entre 1985 y 1990. En Situaciones de riesgo climático en España”: trabajos presentados a la II Reunión del Grupo de Climatología de la Asociación de Geográfos Españoles, celebrada en Jaca (Huesca), 15 a 17 de septiembre de 1995 (págs. 223-232). Instituto Pirenaico de Ecología.
10. Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. (s.f.). Obtenido de https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf
11. M.G. Elzbieta, “Comparison of wind and wave climate in open sea and coastal waters. Ocean Engineering” 2018, 170 (pp. 199-208).
12. M. Havbro Faber, “Statistic and Probability Theory: In Pursuit of Engineering Decision Support”. Lyngby: Springer. 2012
13. A. Hernández Unzón, C. Bravo & J. Díaz, “Reseña del Huracán Karl del Océano Atlántico”. Obtenido de Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional: 2010 https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2010-Karl.pdf
14. A. Hernández Unzón, “Reseña del Huracán Dean del Océano Atlántico” 2007. México: CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional.
15. A. Hernández Unzón & C. Bravo. “Resumen del huracán Stan” Obtenido de CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional: https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2005-Stan.pdf
16. Huracan Karl 2010 . (s.f.). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2010#/media/Archivo:Karl_2010_track.png
17. Huracán Stan. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Stan
18. Máyer, P. (1999). Un siglo de temporales en la prensa de Gran Canaria. Vegueta 4, 267-282. Obtenido de http://revistavegueta.ulpgc.es/ojs/index.php/revistavegueta/article/view/178
19. NATO - STANAG 4194. (1983). Standard: NATO - STANAG 4194: Standardized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions. Publ. 1983-04-06.
20. Nieves, A., & Domínguez, F. C. (2010). Probabilidad y estadística para ingeniería. Un enfoque moderno. Mexico: McGraw-Hill.
21. J. Olcina Cantos, “Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales”. 2008, Scripta Nova. Revista Electronica de Geografía y Ciencias Sociales, XII (270 (24)), s.p.
22. L. Ortiz Lozano, P. Arceo Briseño, A. Granados Barba, D. Salas Monreal, & Jiménez Badillo, “Zona Costera. Zona Costera. Gobierno del Estado de Veracruz”. 2010
23. Periodico El Financiero. (agosto de 2017). Huracán 'Franklin' toca tierra en Veracruz. Obtenido de https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/huracan-franklin-a-punto-de-impactar-en-veracruz
24. Periodico Expansion. (Agosto de 2007). “Dean azota al puerto de Veracruz”. Expansión. Obtenido de https://expansion.mx/actualidad/2007/8/22/dean-toca-tierra-en-las-costas-del-golfo
25. Redacción Animal Político. (18 de agosto de 2012). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Animal Politico: https://www.animalpolitico.com/2012/08/tormenta-tropical-helene-amenaza-la-costa-mexicana-del-golfo/
26. D. Reeve, A. Chadwick, C. & Fleming, C. “Coastal Engineering: Processes, theory and desing practice”. USA: Spon Pres. 2004.

27. V. Shigunov, V & Bertram, “Prediction of added power in seaway by numerical simulation”. Proceeding of the 9th International Conference on High-Performance Marine Vehicle HIPER2014, 2014, pp. 102-113. Athens, Greece: National Technical University of Atthens.
28. Temporada de huracanes en el Atlántico de 1950. (s.f.). Recuperado el 16 de Mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_1950
29. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2005. Tormenta Tropical José. (s.f.). Recuperado el 16 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atl%C3%A1ntico_de_2005#Tormenta_tropical_Jos%C3%A9
30. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2007. (s.f.). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2007
31. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2012. (s.f.). Recuperado el 18 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2012
32. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2013. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2013
33. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2013. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2013
34. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2016. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2016
35. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2016. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2016
36. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2017. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2017
37. Tormenta tropical Harvey (2011). (s.f.). Recuperado el 18 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Tormenta_tropical_Harvey_(2011)
38. Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). Probability and statistics for engineers and scientistc. Pearson.
39. Wikipedia. (s.f.). Recuperado el 16 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/1955
40. A. Yanes M & Marzol, “Los temporales marinos como episodios de riesgo en Tenerife a través de la prensa (1985-2003)”. Revista de la Sociedad Geológica de España, 22(1-2), 95-104. Obtenido de http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/22(1-2

COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE DOBLE FASE DP980 BAJO CONDICIONES DE CARGA CÍCLICA CONTROLADA POR DEFORMACIÓN

Juliana Rosado-Carrasco[1], Walter González-Zapatero[1], Ricardo Ambriz Rojas[2], David Jaramillo Vigueras[2]

[1]Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), IPN, [2]Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC), IPN.

jrosadoc@ipn.mx

RESUMEN

Se analizó el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a la fatiga bajo condiciones de carga cíclica controlada por deformación (bajo número de ciclos) en láminas de 1.6 mm de espesor de acero de doble fase DP980. Los datos experimentales obtenidos de las pruebas de fatiga de bajo número de ciclos se ajustaron en la ecuación de Basquin, de dicho ajuste se graficaron las curvas S-N y del ajuste en el modelo de Manson-Coffin, se obtuvieron las curvas ε-N. A partir de estas curvas se determinaron el coeficiente de resistencia a la fatiga σ_f', el exponente de resistencia a la fatiga $\boldsymbol{b}$, el coeficiente de ductilidad a la fatiga ε_f', y el exponente de ductilidad a la fatiga $\boldsymbol{c}$. Por cada ciclo de deformación se graficó el lazo de histéresis de esfuerzo-deformación cíclica a la mitad de la vida ($N_f/2$) para los diferentes niveles de amplitud de deformación. De los lazos de histéresis se obtuvo el módulo de elasticidad cíclico E_c siguiendo las recomendaciones de la norma ISO12106. Del diagrama esfuerzo-deformación cíclico se obtuvo el esfuerzo de cedencia cíclico σ_y' (al 0.2%). Se realizó el ajuste de la ecuación de Ramberg-Osgood para obtener el coeficiente de endurecimiento cíclico H' y el exponente de endurecimiento cíclico n'.

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz siempre ha estado en continua mejora para producir aleaciones cada vez más ligeras, con una excelente ductilidad para el conformado de piezas y la obtención de láminas delgadas, pero a la vez, con alta resistencia mecánica para resistir impactos en situaciones de impacto [1,2]. El acero DP980 pertenece a la familia de los aceros avanzados de alta resistencia AHSS. Su microestructura consta de una matriz ferrítica e islas de martensita, que le proporcionan ductilidad y alta resistencia, respectivamente [3].

La vida en servicio de los componentes se puede estimar llevando a cabo pruebas de fatiga controlada por deformación, con este método es posible también caracterizar el comportamiento cíclico [4-6]. Determinar las constantes y las propiedades en fatiga de manera experimental es importante para el diseño de componentes, los cuales pueden modelarse con la ayuda de las herramientas computacionales [7], las cuales son muy utilizadas en la industria. En este trabajo de investigación se realizó la caracterización cíclica del acero DP980 en condición de llegada.

TEORÍA

La industria del acero ha desarrollado una familia de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés Advanced High Strength Steel), que comprende los aceros de doble fase (DP), de fase compleja (CP por sus siglas en inglés Complex Phase), ferrítico-bainítico (FB por sus siglas en inglés Ferritic-Bainitic), martensíticos (MS por sus siglas en inglés Martensitic Steel), de plasticidad inducida por transformación (TRIP por sus siglas en inglés Transformation Induced Plasticity), formado en caliente (HF por sus siglas en inglés Hot Formed), y de plasticidad inducida por maclado (TWIP por sus siglas en inglés Twinning Induced Plasticity) [8]. Todos estos aceros tienen composiciones químicas muy específicas, además de tratamientos termomecánicos y térmicos controlados que les permiten obtener microestructuras con más de una fase, alcanzando así buena resistencia mecánica, ductilidad, soldabilidad y tenacidad a la fractura.

La composición química típica de los aceros DP contiene un porcentaje de C entre 0.6-0.15 % [9] y otros elementos aleantes. Para obtener una microestructura ferrítica-martensítica, el procesamiento de los aceros DP inicia con un recocido continuo, partiendo de temperaturas propias de la región intercrítica (donde coexisten α+γ), seguido de un enfriamiento por debajo de la temperatura de inicio de formación de martensita (Ms) [9]. La mayor parte de los componentes fabricados con aceros DP están sometidos a cargas cíclicas y, por consiguiente, deformaciones cíclicas. La resistencia a la fatiga define el tiempo de utilidad de un componente y está relacionada con la tenacidad de fractura [10]. Las cargas cíclicas conllevan a la degradación progresiva y permanente de las propiedades mecánicas del material, que pueden culminar a la falla por agrietamiento y fractura [11,12]. Existen bastantes factores que afectan a la vida de fatiga, tales como las propiedades del material, estado y/o magnitud de esfuerzos. El régimen de fatiga controlada por deformación (conocido como "Strain-life approach") se considera cuando la deformación cíclica aplicada está en el nivel plástico. También se le conoce como régimen de bajo número de ciclos (LCF por sus siglas en inglés, Low Cycle Fatigue). Las pruebas de fatiga controlada por deformación (LCF) se realizan de forma totalmente revertida [13], es decir, la relación de deformaciones *R*=-1, donde R es el cociente de la deformación mínima $\boldsymbol{\varepsilon_{min}}$ y la deformación máxima $\boldsymbol{\varepsilon_{max}}$ aplicados en la prueba. A partir del lazo de histéresis se pueden obtener datos tales como la amplitud total de deformación $\frac{\Delta\varepsilon_a}{2}$ aplicada, que tiene una componente de deformación elástica $\frac{\Delta\varepsilon_{ea}}{2}$ y una componente de deformación plástica $\frac{\Delta\varepsilon_{pa}}{2}$. También se pueden determinar el esfuerzo máximo $\boldsymbol{\sigma_{max}}$ y el esfuerzo mínimo $\boldsymbol{\sigma_{mín}}$, así como el módulo de elasticidad compresivo $\boldsymbol{E_c}$ y el módulo de elasticidad en tensión $\boldsymbol{E_T}$ [14]. En la Figura 1 se presenta de manera esquemática el lazo de histéresis de esfuerzo-deformación cíclico de un acero DP780:

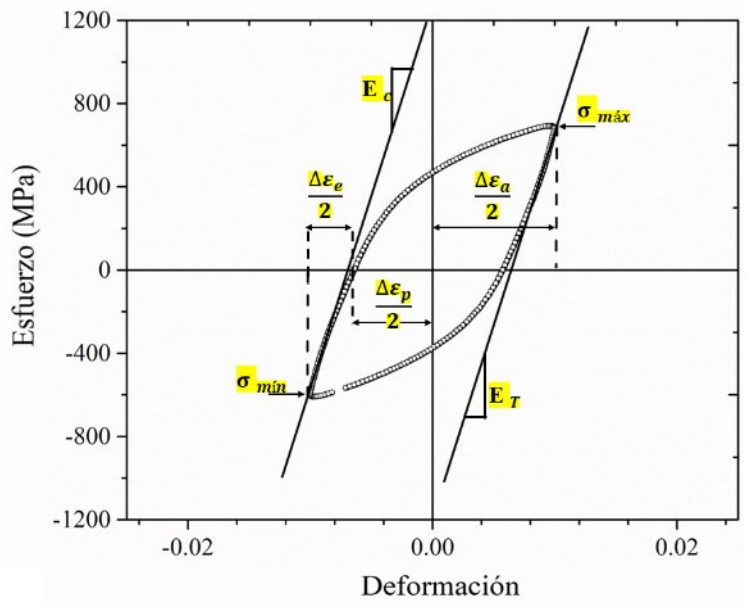


Figura 1. Lazo de histéresis de deformación y los parámetros que se obtienen de ellos.

El tiempo de vida en fatiga se representa en las curvas S-N o de Whöler, donde se grafican el esfuerzo aplicado contra el número de ciclos a la falla $\boldsymbol{N_f}$. Sin embargo, bajo condiciones donde existe deformación plástica, la respuesta del material a la deformación cíclica es diferente, para estos casos conviene separar las componentes elástica y plástica utilizando las ecuaciones de Basquin (ecuación 1) y la de Manson-Coffin (ecuación 2) respectivamente [11]. Estas relaciones sirven para graficar la curva de vida total en fatiga.

$$\boldsymbol{\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b} \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \quad (2)$$

donde:
σ_a es la amplitud de esfuerzo
σ'_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga
N_f es el número de ciclos a la falla
b es el exponente de resistencia a la fatiga
ε_a es la amplitud total de deformación
ε_{ea} es la amplitud de deformación elástica
ε_{pa} es la amplitud de deformación plástica
ε'_f es el coeficiente de ductilidad
c es el exponente de ductilidad

La resistencia a la fatiga de los aceros DP depende de los mecanismos de daño que involucran la microplasticidad de las fases individuales de la aleación. Algunos estudios reportan que la distribución de la martensita tiene efectos en la resistencia a la fatiga, incrementándose cuando la morfología de las islas está finamente dispersada (algunos autores la describen como “fibrosa” [15,16] en comparación de aquella que se encuentra rodeando porciones de la matriz ferrítica (tipo red [15-17]. También se ha observado que las fases muestran tres diferentes mecanismos de daño durante las cargas cíclicas: 1. Decohesión de la ferrita y la martensita en microestructuras finas, 2. fracturas dúctiles y 3. fracturas frágiles en microestructuras gruesas [9,15]. Fonstein [18] menciona que las heterogeneidades microestructurales de los aceros DP también pueden aumentar la resistencia a la propagación de grietas.
Por otro lado, debido a la geometría de los componentes fabricados con aceros DP, existen zonas de alta concentración de esfuerzos que presentan microdeformaciones plásticas [19]. La presencia de estas zonas de microplasticidad y su tendencia a fallar por agrietamiento debido a la fatiga pone en evidencia la importancia de los estudios de fatiga en el régimen del bajo número de ciclos, la cual se evalúa por medio de las pruebas de fatiga controlada por deformación.

PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizaron láminas de acero DP980 con un espesor de 1.6 mm. La microestructura se evaluó de acuerdo con la norma ASTM E3 [20]. Las probetas fueron encapsuladas y desbastadas, después se llevó a cabo el pulido y ataque químico usando una solución de HNO_3 al 3% y 97% de C_2H_5OH. Finalmente se observaron las fases por medio de un microscopio óptico.

Basándose en la norma ASTM E8 [21], se realizó la caracterización mecánica monotónica, de donde se determinó el esfuerzo de cedencia, resistencia a la tensión, alargamiento a la fractura y módulo de elasticidad estático. Las propiedades mecánicas especializadas se obtuvieron con base| en la norma ISO12106 [14].

Las dimensiones y geometría probetas de fatiga se obtuvieron siguiendo los lineamientos de la norma ISO 12106, tal y como se muestra en la figura 2.

Antes realizar las pruebas de fatiga, las superficies laterales probetas fueron desbastadas a mano utilizando papel carburo de silicio a diferentes granulometrías, esto con el fin de remover cualquier marca de maquinado y obtener una superficie lisa. Las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con la norma ISO 12106, con una rapidez de deformación constante 0.01 s^{-1}, a seis diferentes amplitudes de deformación, forma de onda triangular y razón de esfuerzos R=-1. Se realizaron tres réplicas por cada nivel de deformación y se tomó como criterio de falla la separación de la probeta por fractura o una caída de 20% de la carga estable. Las condiciones están presentadas en la tabla 1.

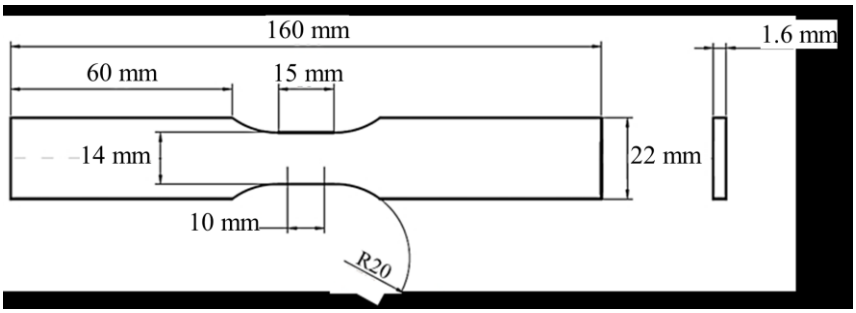


Figura 2. Geometría de las probetas para fatiga de bajos ciclos.

Tabla 1. Condiciones aplicadas para las pruebas de fatiga controlada por deformación

Amplitud de deformación (mm/mm)	Frecuencia (Hz)
0.01	0.4
0.008	0.5
0.006	0.67
0.004	1
0.003	1.33
0.002	2

Las pruebas de tensión y las de fatiga se efectuaron en una máquina servo-hidráulica MTS Landmark 370.10, con una celda de carga de 100 kN, extensómetro dinámico y sistema de adquisición de datos.
Los valores que se consideraron para el análisis fueron tomados en la vida media de fatiga.

RESULTADOS

La Figura 3 muestra la microestructura del acero DP980. Se aprecia la matriz ferrítica con islas de martensita finamente dispersada, este tipo de microestructura es resultado de un temple intermedio como tratamiento térmico, reportada por Mediratta et al [17]. El tamaño de grano aproximado es de 5-6 µm. Estos valores de tamaño de grano se encuentran dentro del intervalo de valores reportados en la literatura para este tipo de aceros [17]. Por medio de las mediciones la sonda Fischer FERITSCOPE® FMP30 se estimó un contenido del 38% de martensita. Las propiedades mecánicas obtenidas por medio de las pruebas de tensión arrojaron los resultados que se muestran en la tabla 2.

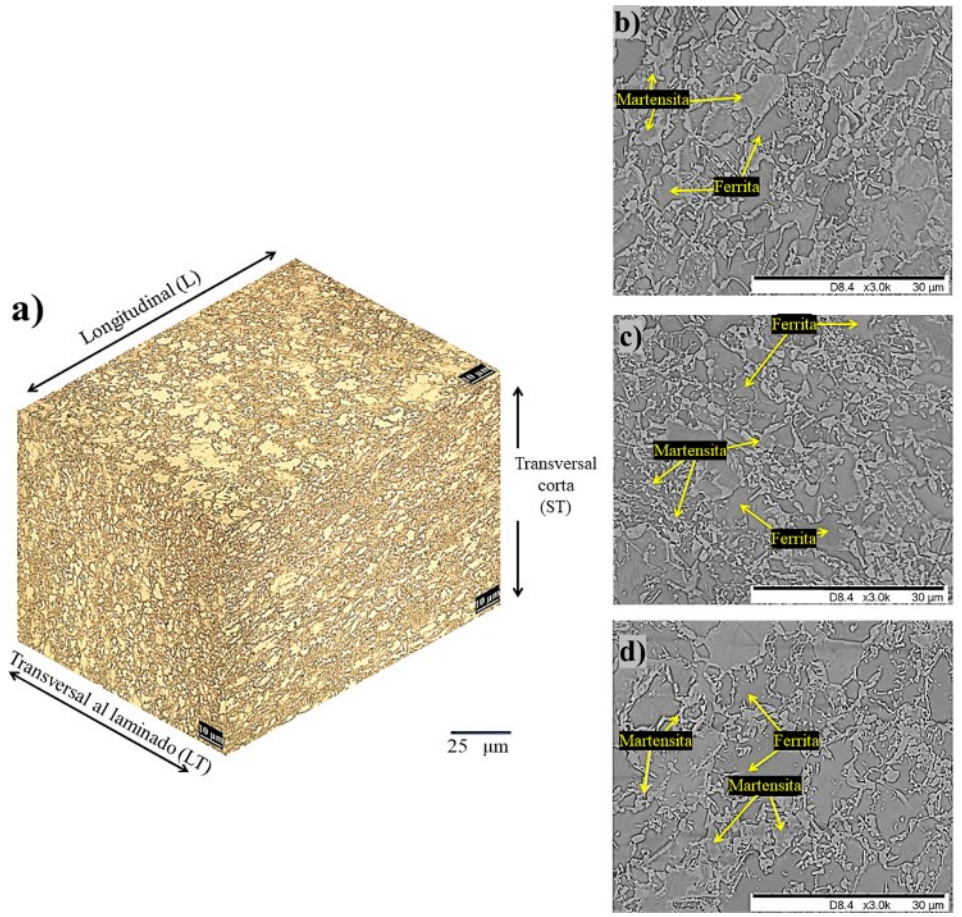


Figura 3. Micrografías del acero DP-980 (a) corresponde a la vista 3D, (b) es el plano longitudinal al laminado, (c) es la vista transversal al laminado y (d) es la transversal corta

Tabla 2. Propiedades mecánicas evaluadas en la lámina de acero DP-980

Módulo de elasticidad (*E*) [GPa]	Esfuerzo de cedencia al ($\sigma_{y0.2}$) [MPa]	Resistencia a la tensión (σ_{uts}) [MPa]	Alargamiento a la fractura (ε) [%]	Coeficiente de endurecimiento (*K*) [MPa]	Exponente de endurecimiento por deformación (*n*)	Tenacidad (MJ/m^3)
205	699	1012	15	1529	0.124	143

Este comportamiento y los valores obtenidos de módulo de elasticidad, esfuerzo de cedencia, resistencia a la tensión y deformación máxima a la fractura son típicos en este tipo de aceros y están relacionadas con la relación de fases. Las curvas esfuerzo deformación monotónica y cíclica se encuentran en la figura 4.

Los resultados obtenidos de las pruebas de fatiga de bajos ciclos fueron tratados aplicando la ley de Hooke para separar la componente elástica y la plástica de las mediciones de la amplitud deformación, utilizando el valor promedio del módulo de elasticidad, ya que esto es válido siempre y cuando éste no varíe más del 5% [13].

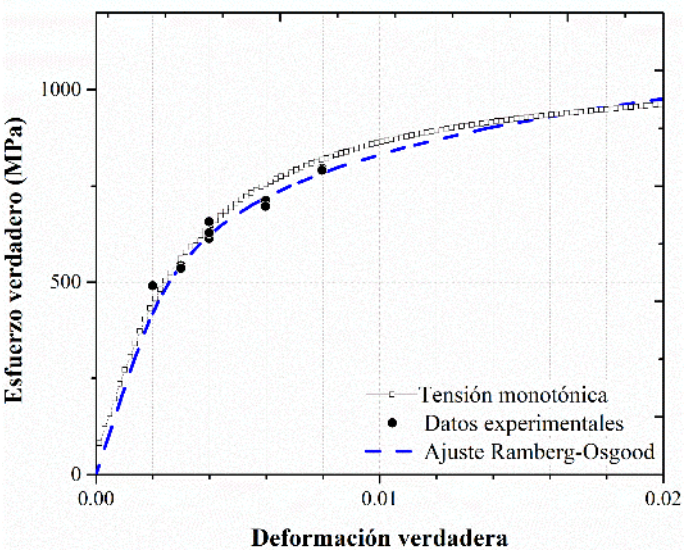


Figura 4. Diagramas esfuerzo-deformación cíclica y monotónica.

La tabla 3 contiene los diferentes valores del módulo de elasticidad para cada nivel de deformación aplicado. En la figura 5 se muestra el diagrama S-N y en la figura 6 se puede apreciar el diagrama de deformación-vida en fatiga, evaluadas utilizando las ecuaciones de Basquin y Coffin-Manson para la componente elástica ε_e y plástica ε_p, respectivamente.

Tabla 3. Propiedades mecánicas cíclicas y de fatiga evaluadas en la lámina de acero DP-980

Módulo de elasticidad cíclico (*Ec*) [GPa]	Coeficiente de endurecimiento cíclico (*K´*) [MPa]	Exponente de endurecimiento por deformación cíclico (*n´*)	Coeficiente de resistencia a la fatiga (σ'_f) [MPa]	Exponente de resistencia a la fatiga (*b*)	Coeficiente de ductilidad a la fatiga (ε'_f)	Exponente de ductilidad a la fatiga (*c*)
234	2325	0.20	1724	-0.102	3.388	-0.810

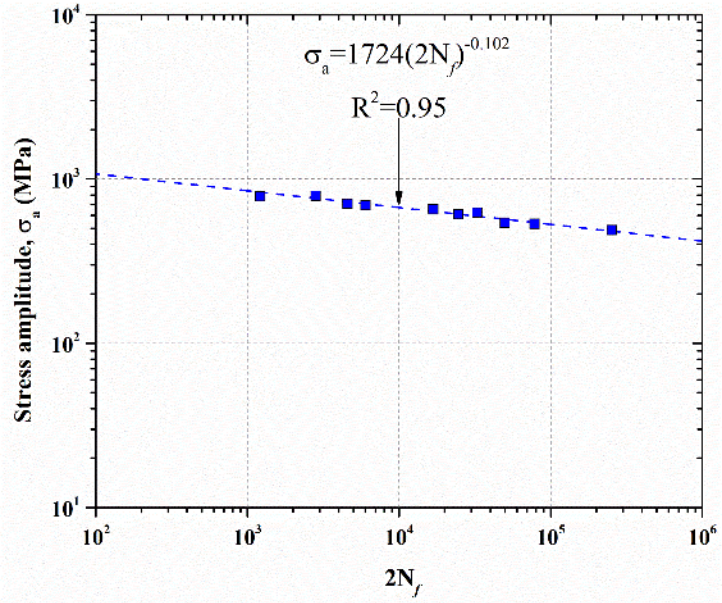


Figura 5. Curvas S-N para el acero DP-980

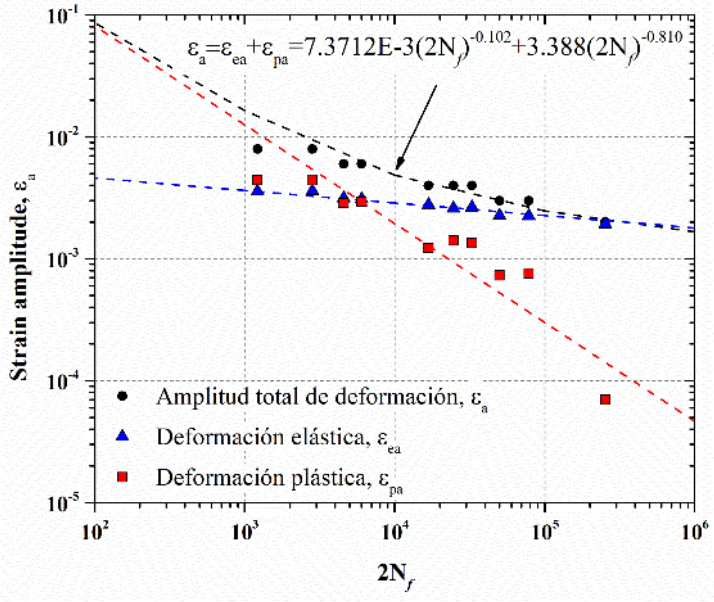


Figura 6. Curvas $\boldsymbol{\varepsilon - N}$ para el acero DP980

En los lazos de histéresis de la figura 7 se observa el comportamiento en términos del esfuerzo en función de la deformación cíclica aplicada, de donde se obtuvo la componente plástica y la componente elástica de cada amplitud de deformación, así como el módulo de elasticidad cíclico del acero DP980. El módulo elástico y las propiedades tales como coeficiente de endurecimiento por deformación ($\boldsymbol{K'}$) y el exponente de endurecimiento cíclico ($\boldsymbol{n'}$) se presentan en la tabla 3, en donde se observa un incremento en los valores con respecto de los monotónicos, lo cual se atribuye a la acumulación de dislocaciones debido a los ciclos de deformación [17]. El coeficiente de resistencia a la fatiga ($\boldsymbol{\sigma'_f}$), el exponente de resistencia a la fatiga ($\boldsymbol{b}$), el coeficiente de ductilidad a la fatiga (ε'_f) y el exponente de ductilidad a la fatiga obtenidos del ajuste a la ecuación de Manson-Coffin permitió construir los diagramas de vida a la fatiga y graficar el comportamiento de este tipo de aceros.

También se observó la superficie de fractura a baja amplitud de deformación ($\boldsymbol{\varepsilon_a}$=0.002) y mayor amplitud ($\boldsymbol{\varepsilon_a}$=0.006). En la figura 8, se encuentran señaladas las zonas de iniciación de la grieta y la zona de propagación estable caracterizada por las marcas de playa, que confirma el fenómeno de fatiga. Este es un comportamiento típico de este tipo de materiales en fatiga de bajos ciclos [17]. Finalmente, en la figura 9 se observan las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, en estas imágenes se puede observar zonas de fractura dúctil, en las cuales se aprecian las estriaciones causadas por el deslizamiento de los planos durante la deformación [8,17]. Por otro lado, también se puede observar zonas de clivaje, éstas corresponden a la fase martensítica de contenida en el material, mientras que las zonas con estriaciones mencionadas anteriormente se encuentran en los granos pertenecientes a la matriz ferrítica.

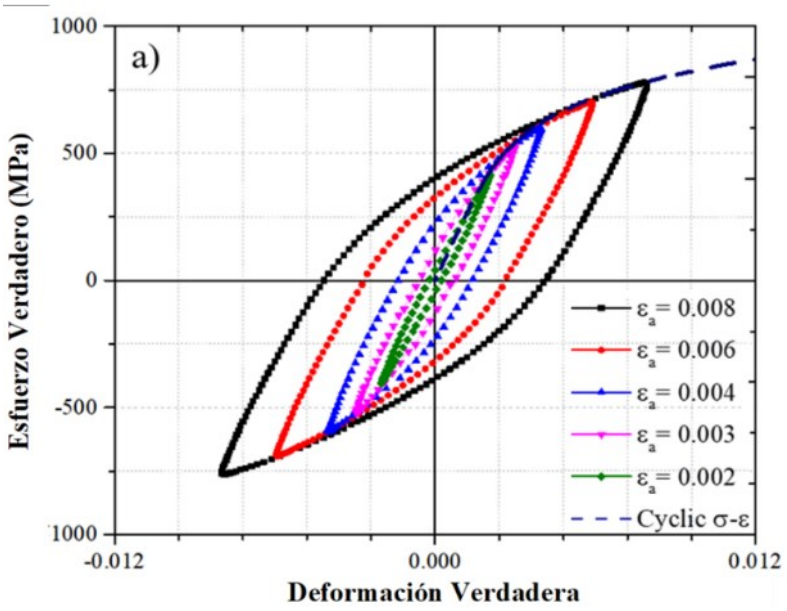


Figura 7. Lazos de histéresis del acero DP-980

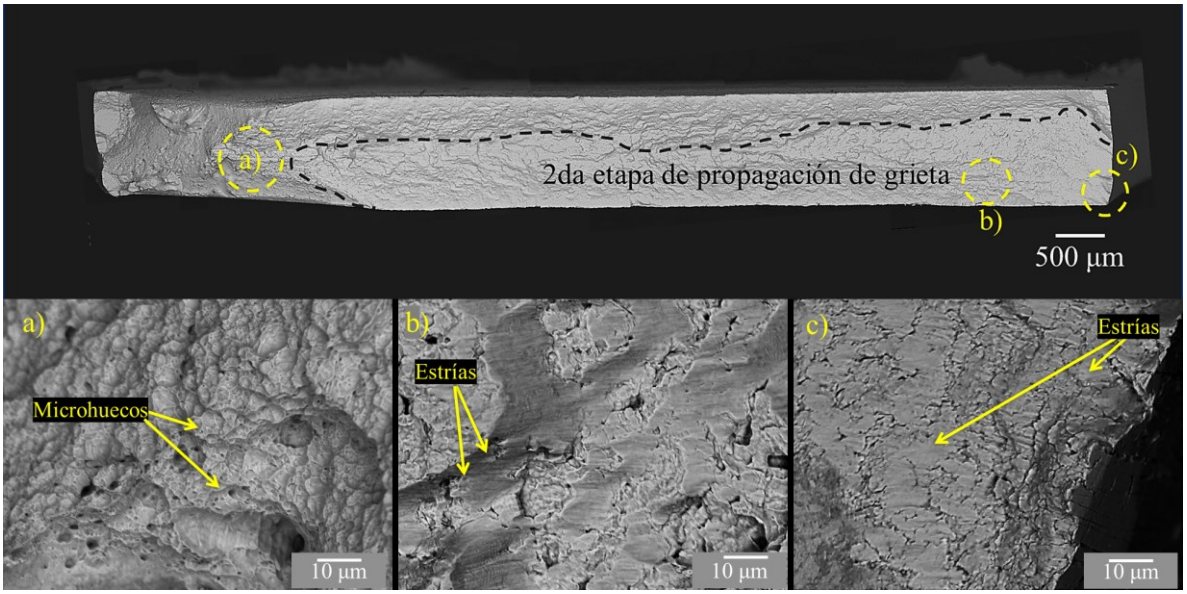


Figura 8. Superficie de fractura del acero DP980 ensayado a $\boldsymbol{\varepsilon_a}$=0.002.
a) Muestra una superficie predominantemente dúctil, b) zonas con estrías por fatiga y c) superficie cercana al inicio de la grieta.

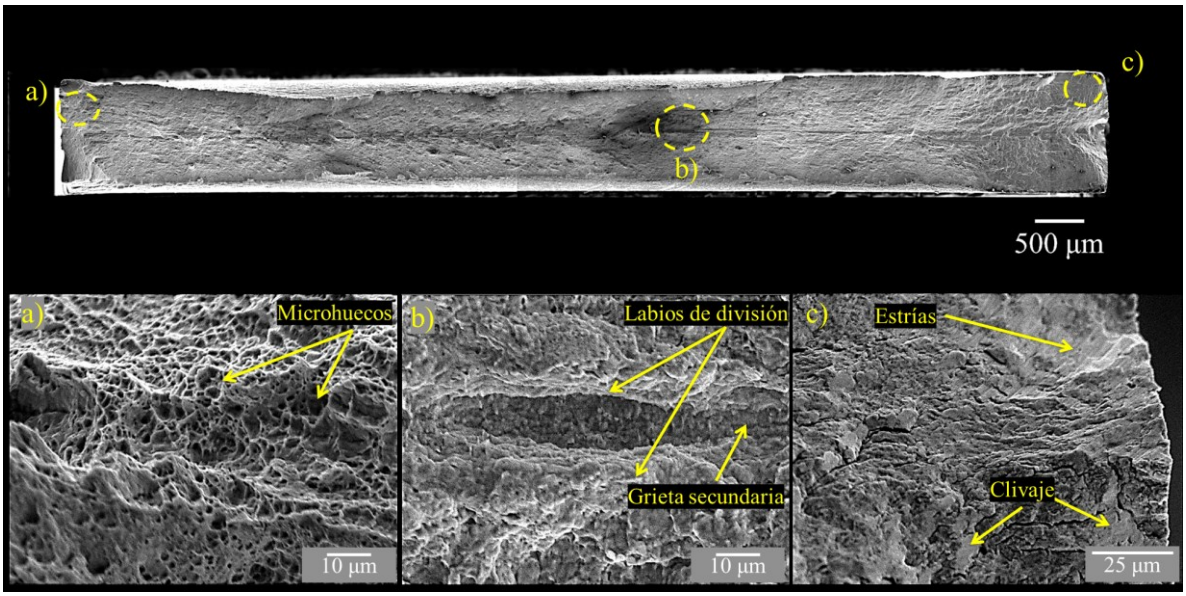


Figura 9. Probeta de acero DP980 ensayada a una amplitud de deformación ε_a =0.006. a) Microhuecos, b) agrietamiento secundario, c) presencia de estrías por fatiga en el inicio de una grieta.

CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo corroborar el comportamiento de la lámina de acero DP-980 bajo condiciones de deformación cíclica.
Existe un incremento en el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación cuando se evalúa en condiciones cíclicas, debido a la acumulación de dislocaciones durante cada ciclo de deformación.

De las superficies de fractura se concluye que la región de crecimiento de grieta en la etapa 2 es predominante cuando se evalúan amplitudes de deformación bajas ε_a=0.002.
El acero DP980 tiene una morfología de fractura predominantemente dúctil, debido a la matriz ferrítica y se observa desprendimiento de algunas islas de martensita de la matriz ferrítica en amplitudes de deformación altas ε_a=0.006.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hall, J. N., & Fekete, J. R. ‘’Steels for auto bodies’’. In Automotive Steels, Elsevier, 2017, pp. 19–45.
2. Wolfgang Bleck AFJO. ‘’Niobium in dual phase and trip steels’’. Niobium–Science & Technology. Proceedings. Niobium, 2001, p. 727–52.
3. Davies, R. G. ‘’Influence of martensite composition and content on the properties of dual phase steels’’ Metallurgical Transactions A, vol. 9, 5,1978, pp. 671–679.
4. Dieter, G. E. ‘’Mechanical Metallurgy’’ 3rd ed. McGraw-Hill Book Company-London (1986).
5. Martin, J. W. ‘’Determination of mechanical properties’’ In Materials for Engineering, 2006, pp. 37–67.
6. Yoshida, F., Uemori, T., & Fujiwara, K. ‘’Elastic–plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension–compression at large strain’’ International Journal of Plasticity, Vol 18, 5, 2002, pp. 633–659.
7. Mohrbacher H. ‘’High-Performance Steels for Sustainable Manufacturing of Vehicles’’. Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material, Elsevier; 2015, pp. 135–63.
8. WorldAutoSteel. ‘’Advanced High-Strength Steels Application Guidelines’’ Version 6. 2017.

9. Tasan CC, Diehl M, Yan D, Bechtold M, Roters F, Schemmann L, et al. ‘’An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design’’ Annu Rev Mater Res, Vol. 45, 2015, pp.391–431.
10. Paul SK, Stanford N, Hilditch T. ‘’Effect of martensite volume fraction on low cycle fatigue behaviour of dual phase steels: Experimental and microstructural investigation’’ Materials Science and Engineering A, Vol. 638, 2015, pp. 296–304.
11. Meyers MA, Chawla KK. ‘’Mechanical Behavior of Materials. Cambridge’’ Cambridge University Press; 2008.
12. Fatigue and Fracture. ASM International; 1996.
13. Dowling NE. ‘’Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue’’ 4th ed. (Edimburg, Pearson Education, 2012).
14. ISO 12106:2003(E)Metallic materials-Fatigue testing, "Axial strain-controlled method", ISO, Geneva, Switzerland, 2003.
15. Anbarlooie B, Hosseini-Toudeshky H, Kadkhodapour J. ‘’High cycle fatigue micromechanical behavior of dual phase steel: Damage initiation, propagation and final failure’’ Mechanics of Materials Vol. 106, 2017, pp. 8–19.
16. Molaei MJ, Ekrami A. ‘’The effect of dynamic strain aging on fatigue properties of dual phase steels with different martensite morphology’’ Materials Science and Engineering A
17. Mediratta S, Ramaswamy V, Rao P. ‘’Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on the low cycle fatigue of a dual-phase steel’’ Int J Fatigue, Vol. 7, 1985, pp.107–15.
18. Fonstein N. ‘’Dual-phase steels. Automotive Steels’’ Elsevier, 2017, pp. 169–216.
19. Hilditch TB, Timokhina IB, Robertson LT, Pereloma E V., Hodgson PD. ‘’Cyclic Deformation of Advanced High-Strength Steels: Mechanical Behavior and Microstructural Analysis’’ Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40, 2009, pp.342–53.
20. ASTM E3-11, ‘’Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens’’ (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org)
21. ASTM E8 / E8M-16ae1, ‘’Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials’’ (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org)

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS

Berenice Noriega Luna, Luis Ángel Rodríguez Montelongo, María Jesús Puy Y Alquiza, Alma Hortensia Serafín Muñoz, Jesús René Báez Espinosa

Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@ugto.mx

RESUMEN

La exposición de semillas a campos eléctricos puede romper la dormancia de las semillas y mejorar la germinación al modificar los procesos fisiológicos. El uso de energía eléctrica para alterar la respuesta de sistemas biológicos ha sido objeto de estudio durante mucho tiempo. En la literatura, se encuentran investigaciones que analizan el efecto de la electricidad en el aumento del rendimiento y desarrollo de las plantas. Por otro lado, existen estudios que sugieren que la aplicación de corriente eléctrica a las semillas no tiene efecto o incluso puede provocar una disminución en la germinación y desarrollo de las plantas tratadas. Esta técnica se conoce actualmente como electrocultivo. El objetivo de este estudio fue desarrollar un protocolo para incrementar la tasa de germinación y crecimiento de las semillas de pepino (*Cucumis sativus*) y maíz (*Zea mays* L.) mediante la aplicación de campos eléctricos.

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda constante por mejorar la productividad agrícola y garantizar la seguridad alimentaria, surge el electrocultivo como una técnica innovadora con el potencial de revolucionar la producción de cultivos. Esta metodología, que emplea la electricidad para estimular el crecimiento de las plantas, ha captado la atención de los agricultores modernos debido a sus beneficios significativos en la optimización de los rendimientos y la calidad de los cultivos. El electrocultivo implica la aplicación de corrientes eléctricas de baja intensidad sobre las plantas, semillas o suelos, estimulando procesos biológicos y promoviendo el desarrollo vegetal. A través de la electroestimulación, se puede potencialmente aumentar la absorción de nutrientes, acelerar la germinación y mejorar el crecimiento de las raíces, lo que se traduce en cultivos más sanos y robustos (Figura 1).

Figura 1. *Electrocultivo: Estimulación eléctrica en semillas. "Imagen generada con inteligencia artificial utilizando el modelo de texto a imagen.* Fuente: OpenAI's GPT-3.

TEORÍA

Una de las ventajas clave del electrocultivo es su capacidad para incrementar los rendimientos de los cultivos al tiempo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos y pesticidas. Este enfoque respetuoso con el medio ambiente no solo contribuye a prácticas agrícolas sostenibles, sino que también minimiza el impacto ecológico de los métodos tradicionales de agricultura. Además, el electrocultivo ha demostrado resultados prometedores en la mejora de la resistencia de las plantas a enfermedades y plagas. Al potenciar los mecanismos de defensa naturales de las plantas a través de la estimulación eléctrica, los agricultores pueden reducir la dependencia de tratamientos químicos nocivos, creando un ecosistema agrícola más saludable y sostenible. Las aplicaciones del electrocultivo van más allá de las prácticas agrícolas convencionales. Esta tecnología tiene el potencial de integrarse en la agricultura vertical, sistemas hidropónicos y cultivos en invernaderos, ofreciendo nuevas posibilidades para la agricultura urbana y la agricultura en ambientes controlados. Además de sus beneficios agrícolas, el electrocultivo abre oportunidades para la investigación y la innovación en el campo de la ciencia de las plantas. Recientemente se están explorando los mecanismos detrás de la electroestimulación y sus efectos en la fisiología de las plantas, buscando nuevos avances en la mejora de los cultivos y la agricultura sostenible[1,2,3,4].

La aplicación de estímulos eléctricos en las semillas de maíz y pepino ha demostrado tener un impacto significativo en el proceso de germinación. Al proporcionar un ambiente eléctrico óptimo, se ha observado un aumento en la velocidad y uniformidad de la germinación, resultando en una mayor tasa de establecimiento de plántulas sanas y vigorosas. Este efecto se traduce en una mejor uniformidad en la emergencia de las plántulas en el campo, lo cual es crucial para maximizar la productividad de los cultivos de maíz y pepino. Además, la estimulación eléctrica también ha mostrado efectos positivos en el crecimiento inicial de las plantas de maíz y pepino. Los estímulos eléctricos aplicados a las semillas pueden promover la división celular y el alargamiento, lo que lleva a un desarrollo más robusto del sistema radicular y una mayor capacidad de absorción de nutrientes. Esto resulta en plantas más fuertes y saludables, capaces de resistir mejor el estrés ambiental y producir rendimientos más elevados. Asimismo, la estimulación eléctrica ha demostrado mejorar la tolerancia al estrés y la resistencia a enfermedades en las plantas maduras. Al activar los mecanismos de defensa de las plantas mediante señales eléctricas durante las etapas iniciales de crecimiento, se fortalece su capacidad para combatir patógenos y factores de estrés ambiental, lo que se traduce en cultivos más sanos y productivos. Además, la estimulación eléctrica en las semillas de maíz y pepino también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad agrícola al reducir la dependencia de insumos químicos. Esto promueve prácticas agrícolas más amigables con el medio ambiente y contribuye a la salud del suelo. La mejora en la resistencia al estrés y la calidad de los frutos son aspectos clave para los agricultores, ya que les permite cultivar pepinos de alta calidad de manera más eficiente y sostenible. En resumen, la estimulación eléctrica en las semillas de maíz y pepino representa una herramienta innovadora que puede impulsar la productividad, la sostenibilidad y la calidad en la producción de este cultivo tan apreciado. A medida que esta técnica evoluciona y se integra en las prácticas agrícolas, se vislumbra un futuro donde la electricidad juega un papel crucial en el cultivo de maíz y pepino, contribuyendo a una agricultura más eficiente, sostenible y rentable. La adopción de la estimulación eléctrica en la producción de pepinos abre nuevas posibilidades para los agricultores, promoviendo un enfoque más innovador y responsable hacia la agricultura del siglo XXI [5,6,7,8].

El mecanismo detrás del impacto de los estímulos eléctricos en las semillas de maíz y pepino no está completamente comprendido, pero se han propuesto varias hipótesis y mecanismos posibles: 1) Los estímulos eléctricos pueden promover la división celular y el crecimiento de las células en las semillas. Esto podría resultar en un mayor desarrollo de las raíces y brotes, lo que a su vez conduce a un crecimiento más robusto de las plántulas; 2) Los estímulos eléctricos pueden influir en la permeabilidad de las membranas celulares, lo que podría facilitar la absorción de agua y nutrientes por parte de las semillas y las plántulas. Esto podría mejorar la capacidad de las plantas para obtener los recursos necesarios para un crecimiento saludable; 3) Los estímulos eléctricos podrían

desencadenar respuestas bioquímicas en las semillas y las plántulas, como la liberación de hormonas de crecimiento o la activación de enzimas que están involucradas en los procesos de germinación y crecimiento de las plantas; 4) Los estímulos eléctricos pueden activar los mecanismos de defensa de las plantas, lo que podría aumentar su resistencia a enfermedades y estrés ambiental. Estos mecanismos podrían incluir la producción de metabolitos secundarios y la activación de genes involucrados en la respuesta inmune de las plantas. Es importante destacar que la comprensión precisa del mecanismo detrás del impacto de los estímulos eléctricos en las semillas de maíz y pepino aún está en desarrollo y requiere más investigaciones científicas. El objetivo del presente estudio es desarrollar un electrocultivo para estimular semillas de maíz y pepino con campos eléctricos de baja intensidad [9,10].

PARTE EXPERIMENTAL

Diseño del electrocultivo (figura 2):

***Selección Semillas*:** La selección de semillas de maíz y pepino se llevó a cabo por observación de características como tamaño, grosor y evitando la presencia de daños físicos notables (rupturas en la parte externa, ausencia de parte de su físico).

Diseño del Sistema de Estimulación: Los experimentos se realizaron utilizando una corriente directa (CD) de baja intensidad con un campo eléctrico de 0.0185, 0.0370, 0.56 y 1.0 V/cm. Se empleó un recipiente de plástico de 18x27 cm que contenía 1000 g de suelo seco y tamizado. Posteriormente, el suelo se saturó con agua, alcanzando un pH de 7.5 y una conductividad eléctrica de 39 µS/cm. Las semillas de maíz y pepino se sembraron en filas de 5 semillas cada una, con una separación de 2 cm entre semillas, dentro del espacio entre los electrodos.

***Aplicación de la Estimulación*:** Una vez sembradas, las semillas se sometieron a un periodo de 24 horas de vernalización a 4ºC. Posteriormente, los electrodos se conectaron a una fuente de alimentación, que actuó como fuente de energía. Cada tratamiento tuvo una duración de 4 horas diarias durante 4 días con los campos eléctricos mencionados anteriormente. En cada serie de experimentos, se incluyó un grupo de control sin estimulación eléctrica. Después de los tratamientos de electrocultivo, las muestras se colocaron en un entorno aislado con un fotoperiodo de 8 horas de luz y 16 horas de oscuridad. La temperatura se mantuvo a 25 a 28 ºC durante todo el experimento.

Evaluación de los Resultados: El porcentaje de germinación se determinó contando el número total de semillas que superaron la latencia, es decir, cuando emergió el epicótilo. Para evaluar el desarrollo de las plántulas después del tratamiento de electrocultivo, se empleó un calibrador analógico para medir el diámetro de la roseta de las plantas germinadas de un extremo al otro de las hojas más largas de cada planta en la célula.

Figura 2. *Prototipo de electrocultivo en el laboratorio: Estimulación eléctrica en semillas. "Imagen generada con inteligencia artificial utilizando el modelo de texto a imagen.* Fuente: OpenAI's GPT-3.

RESULTADOS

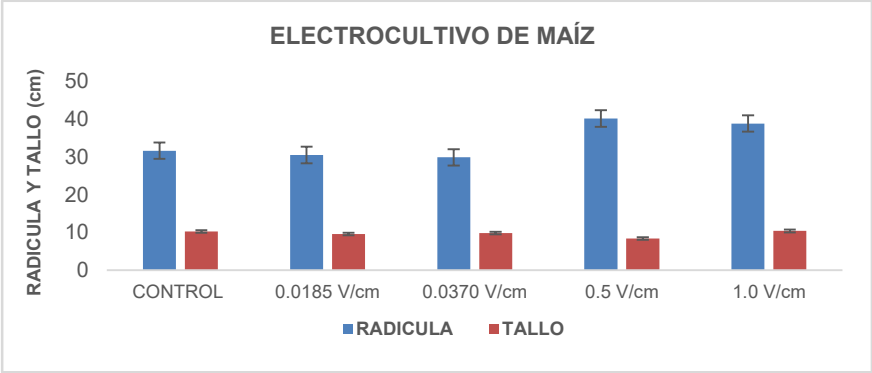
Las observaciones se llevaron a cabo para evaluar el desarrollo de las plántulas desde sus cotiledones, así como para determinar si todas las muestras emergieron adecuadamente. Se encontró que todas las plántulas emergieron de manera saludable y adecuada, mostrando un despliegue normal de los cotiledones. Además, no se observaron manchas cloróticas ni nervaduras centrales amarillas en las plántulas. Su color verde oscuro indica un buen estado de salud, nutrición y condiciones edafoclimáticas favorables (Figura 3).

Figura 3. *Plántulas de maíz y pepino: control pepino, maíz expuesto a un campo eléctrico de 0.5V/cm, pepino expuesto a un campo eléctrico de 0.5V/cm, de izquierda a derecha.* Fuente propia.

La longitud y estructura de la raíz son parámetros fundamentales, ya que representan la interacción directa entre la planta y el estímulo eléctrico. El estímulo facilita la absorción y translocación de nutrientes esenciales, tanto macronutrientes como micronutrientes, aumentando su disponibilidad para el tejido radicular. Por lo tanto, los cambios más significativos se observarán directamente en la raíz (Figura 4).

Figura 4. *Raíces de las plántulas de maíz y pepino: maíz expuesto a un campo eléctrico de 1 V/cm, pepino expuesto a un campo eléctrico de 1 V/cm, de izquierda a derecha.* Fuente propia.

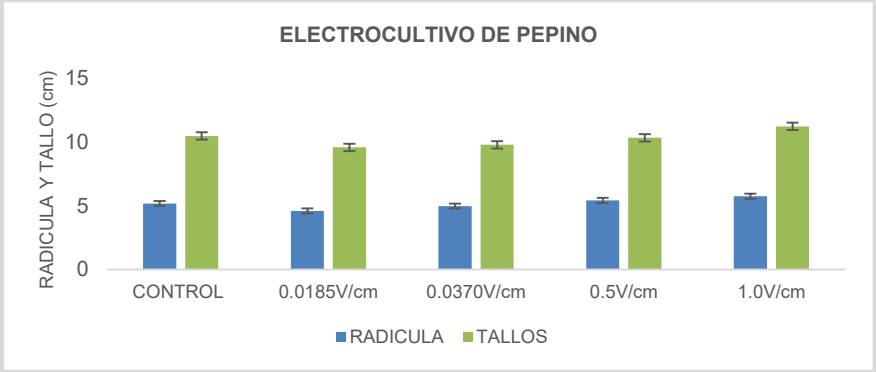
La gráfica 1 muestra la comparación de la longitud de la radícula y del tallo en cultivos de maíz sometidos a diferentes intensidades de un campo eléctrico. En el eje vertical se representa la longitud en centímetros (cm), tanto de la radícula como del tallo, y en el eje horizontal se indican las diferentes intensidades del campo eléctrico. Se puede observar que, en el grupo de control, sin campo eléctrico, tanto la radícula como el tallo tienen longitudes más bajas en comparación con algunos grupos expuestos a campos eléctricos. A medida que aumenta la intensidad del campo eléctrico, se observa un incremento en la longitud de la radícula. Específicamente, las intensidades de 0.5 V/cm y 1 V/cm muestran un aumento significativo en la longitud de la radícula en comparación con el grupo de control. En cuanto a la longitud del tallo, se puede observar que a medida que aumenta la intensidad del campo eléctrico, hay una tendencia a que la longitud del tallo también aumente, aunque esta tendencia no es tan marcada o consistente como en el caso de la radícula.



Gráfica 1: *Comparación de la longitud de la radícula y del tallo en cultivos de maíz sometidos a diferentes intensidades de campo eléctrico.*

En la gráfica 2 muestra la comparación de la longitud de la radícula y del tallo en cultivos de pepino. Se puede observar que el grupo de control, sin exposición al campo eléctrico, presenta una longitud promedio de radícula de aproximadamente 5 cm y una longitud promedio de tallo de aproximadamente 10.5 cm. A medida que aumenta la intensidad del campo eléctrico, se observa una disminución en el crecimiento de la radícula y el tallo en los tratamientos de 0.0185 V/cm y 0.0370 V/cm en comparación con el grupo de control. Sin embargo, a una intensidad de 1.0 V/cm, se produce un incremento en la longitud promedio de la radícula y el tallo, alcanzando aproximadamente 5.5. cm y 11 cm respectivamente. En cuanto al tratamiento de 0.5 V/cm, se

observa que las longitudes promedio de la radícula y el tallo son similares a las del grupo de control. Estos resultados sugieren que la aplicación de un campo eléctrico puede afectar el crecimiento de la radícula y el tallo en los cultivos de pepino, con una respuesta positiva a una intensidad de 1.0 V/cm y una recuperación a niveles similares al grupo de control a una intensidad de 0.5 V/cm.



Gráfica 2: *Comparación de la longitud de la radícula y del tallo en cultivos de pepino sometidos a diferentes intensidades de campo eléctrico.*

CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que la aplicación de un campo eléctrico puede tener un efecto positivo en el crecimiento de la radícula en cultivos de maíz, mientras que el impacto en la longitud del tallo es menos pronunciado. El hecho de que todas las plántulas hayan emergido de manera saludable y adecuada, sin mostrar signos de estrés y con un color verde oscuro que indica un buen estado de salud, sugiere que la aplicación de un campo eléctrico controlado puede ser una técnica prometedora para mejorar el desarrollo y crecimiento de las plantas desde las etapas tempranas de germinación.

La variación en el crecimiento de la radícula y el tallo en respuesta a diferentes intensidades de campo eléctrico en los cultivos de maíz y pepino destaca la importancia de encontrar el equilibrio adecuado en la aplicación de este estímulo para maximizar los beneficios en el crecimiento de las plantas. La identificación de las intensidades óptimas que promueven un crecimiento saludable de las raíces y los tallos puede tener implicaciones significativas en la producción agrícola y la sostenibilidad de los cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahangarnezhad, N., Abbaszadeh, R., & Norouzian, A. (2018). Design and construction of electro-culture system and evaluation of its effect on grass seed (Festuca arandinacea) performance improvement and germination rate. *Agricultural Engineering*, *40*(2), 1-12.

2. Amante, V. (2019). Electro-Culture: Utilizing Electricity in Agriculture for Better Crop Yield. *Ascendens Asia Journal of Multidisciplinary Research Abstracts*, *3*(2O).

3. Jayakrishna, S., & Kumar, R. (2021). Identification And Rehabilitation of Plant Disease by Image Processing and Electro culture Treatment. *SPAST Abstracts*, *1*(01).

4. Sidaway, G. H. (1975). Some early experiments in electro-culture. *Journal of Electrostatics*, *1*(4), 389-394.

5. Nehru, S. S. (1934). New Methods in Electro-Culture. *Journal of the Royal Society of Arts*, *82*(4234), 231-257.

6. Giri, K. V., Mirchandani, T. J., & Subrahmanyan, V. (1931). STUDIES IN ELECTRO-CULTURE. PART I. *Journal of the Indian Institute of Science*, *14*, 67.

7. Phœnix, W. (1929). Electricity in agriculture, with special reference to electro-culture. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, *67*(395), 1283-1301.

8. Phœnix, W. (1929). Electricity in agriculture, with special reference to electro-culture. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, *67*(395), 1283-1301.

9. Lee, S., & Oh, M. M. (2023). Electric field: a new environmental factor for controlling plant growth and development in agriculture. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, *64*(6), 955-961.

10. Patwardhan, M. S., & Gandhare, W. Z. (2013, December). Enhancement of seed germination by applying electrostatic field. In *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)* (pp. 1-4). IEEE.

IMPLEMENTACIÓN DE FALLAS EN UN INVERSOR DE CINCO NIVELES PUENTE H MEDIANTE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE SALIDA

Andrea Banda Estrada, Gilberto Muñoz Moreno, José Juan Alfaro Rodríguez, Adolfo Rafael López Núñez, Mario Alberto Juárez Balderas, José Miguel Sosa Zúñiga, Gerardo Vázquez Guzmán,

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
mip22110006@irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

En atención a la creciente demanda de energías alternativas, los inversores multinivel, reconocidos por su eficiencia en sistemas de voltaje medio/alto y su aplicación en estas fuentes alternativas, han enfrentado una significativa incidencia de fallas. Entre ellas destaca la falla de circuito abierto (FCA) en sus interruptores. Estas fallas, que pueden pasar desapercibidas, afectan el rendimiento y la calidad de la energía inyectada a la red. Nuestra metodología se centra en la introducción controlada de FCAs en un inversor multinivel puente-H de cinco niveles para analizar su impacto en comparación con el funcionamiento normal. Los resultados, expresados en valor eficaz (RMS) y Distorsión Armónica Total (THD), revelaron variaciones en el desempeño del inversor al introducir fallas, destacando cambios significativos en voltaje y corriente de salida. Estos hallazgos proporcionan información crucial para el diseño, operación y mantenimiento adecuados del sistema.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha presentado un crecimiento constante en la aplicación de fuentes alternas de energía. Esto se atribuye principalmente a la disminución de los recursos naturales, el incremento en los costos del petróleo y los niveles elevados de contaminación originados por el uso de diversas fuentes de energía fósil. Algunas de estas fuentes se incluyen, por ejemplo, los paneles fotovoltaicos, los cuales, tienen como objetivo suministrar energía renovable a la red eléctrica, requiriendo la implementación de un convertidor CD-CA (también conocido como inversor). Es crucial que este dispositivo posea características deseables, como eficiencia y mínima contaminación, en el proceso de generación de energía[1].

A medida que la demanda de estas fuentes alternativas de energía sigue en aumento, los inversores también experimentan cambios en busca de mejorar y adaptarse a la integración de tecnologías inteligentes para una gestión más eficaz; por lo que, dentro de las topologías básicas de estos convertidores, y los cuales se implementan para estas aplicaciones, se encuentra la multinivel[2].

Si bien las topologías multinivel presentan ciertas características, las cuales resultan ser altamente beneficiosas en comparación con otras topologías, diversos estudios han indicado que estos convertidores poseen un alto porcentaje de incidencia a fallas. Uno de los principales problemas radica en la cantidad de dispositivos semiconductores que los componen, en los que se manifiestan dos tipos de fallas: de cortocircuito (FCC) y circuito abierto (FCA). El resultado que se obtiene ante la presencia de cualquiera de estas fallas se refleja directamente en las variables eléctricas del sistema conectado; en otras palabras, la ocurrencia de una falla generará un desequilibrio de voltaje, lo que puede resultar en un rendimiento deficiente del sistema y de la carga conectada, además de afectar la calidad de la energía eléctrica inyectada a la red[3, 4, 5, 6, 7].

El enfoque de varias investigaciones se dirige hacia las fallas de circuito abierto en inversores multinivel, representando aproximadamente el 18% de las fallas más frecuentes en los dispositivos semiconductores. En consecuencia, se prioriza el análisis de dicha falla, pues constituye en la categoría predominante en términos de fallas[8].

TEORÍA

Un inversor es un dispositivo electrónico diseñado para transformar la corriente directa (CD) en corriente alterna (CA). Su función principal radica en realizar la transferencia de potencia desde una fuente de alimentación de corriente directa hacia una carga de corriente alterna[9].

Las topologías básicas de estos convertidores son:

- Inversor de medio puente
- Inversor de puente completo (puente H)
- Inversor multinivel

Inversor Multinivel

Los inversores multinivel emergen como una solución eficaz y confiable para abordar las demandas crecientes de técnicas de conversión de energía que requieren niveles superiores de potencia y una mayor calidad[10]. Su función principal consiste en generar un voltaje alterno a través de un proceso de cambio secuencial en las conexiones de las fuentes de alimentación de corriente directa que suministran energía al circuito. Estos inversores tienen la capacidad de conectarse ya sea en serie (con fuentes de CD flotantes aisladas galvánicamente) o en paralelo (con una fuente de CD común y aislamiento galvánico mediante transformadores de potencia en la carga), mientras mayor sea el número de fuentes se obtendrá un número mayor de niveles a la salida[11,12].

Entre las principales ventajas que posee esta topología se encuentra una disminución significativa en la velocidad de cambio de voltaje por conmutación ($\frac{dV}{dt}$), esfuerzos de voltaje reducidos en los dispositivos semiconductores, mejora en la calidad de la señal de salida y una disminución en la Distorsión Armónica Total (THD)[13].

De acuerdo con la Figura 1, es posible generalizar mediante la ecuación (1) para determinar el número de niveles ($\boldsymbol{n}$) de la señal de salida de un inversor con $\boldsymbol{m}$ fuentes de alimentación[11]:

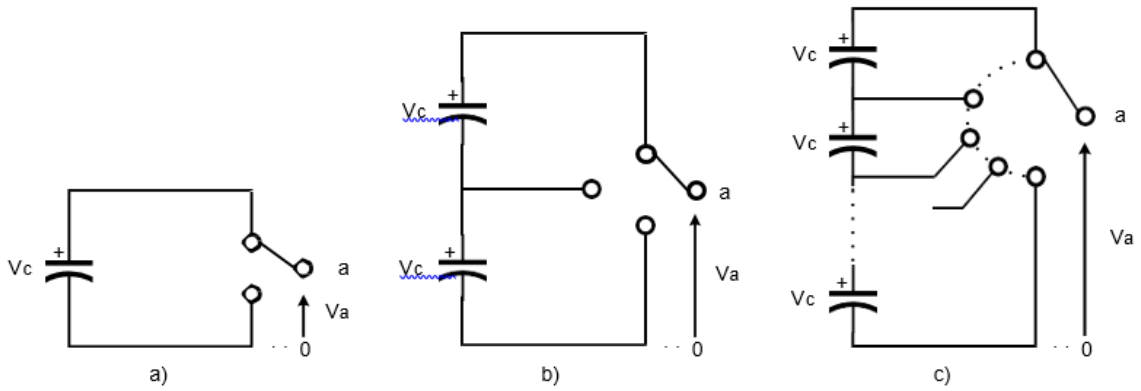


Figura 1. Inversor de a) dos niveles, b) tres niveles y c) $\boldsymbol{n}$ niveles.

$$\boldsymbol{n = m + 1}$$

Las topologías más comunes en el campo de los inversores multinivel son[1,10,14]:

- Inversor con diodos de enclavamiento o NPC (Neutral Point Clamped)
- Inversor con capacitores flotantes (Flying Capacitor Multilevel Inverter, FCMLI)
- Inversor puente H en cascada (Cascaded H-Bridge, CHB) Además,

existen otras estructuras multinivel como[14]:

- Celdas generalizadas multinivel
- Celdas asimétricas híbridas multinivel
- Convertidores multinivel de conmutación suave

Cada una de las topologías anteriores presenta estructuras y características únicas, pero todas comparten la capacidad de generar una forma de onda de voltaje de salida en niveles discretos.

Este atributo les permite operar eficientemente con niveles elevados de voltaje, logrado mediante la conmutación de los interruptores[14].

Inversor puente H en cascada

Esta topología implica la presencia de módulos compuestos por un número definido de puentes H, tal como se muestra en la Figura 2[15]:

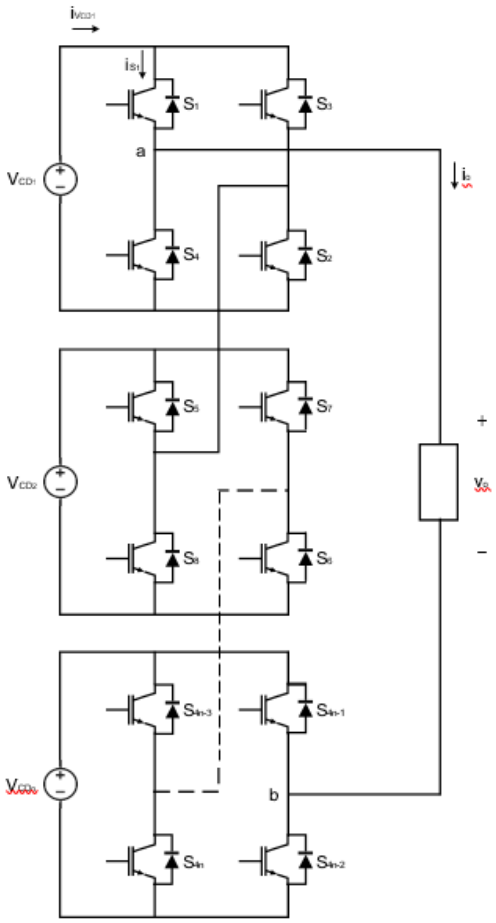


Figura 2. Inversor multinivel puente H en cascada.

Su principio de operación se fundamenta en la combinación de los voltajes generados por los puentes H o etapas conectadas a la misma fase. En consecuencia, el voltaje de salida es la suma de los voltajes producidos por los $\boldsymbol{n}$ puentes H conectados en serie y con fuentes de alimentación independientes, por lo que es posible obtener más niveles de voltaje que permitan sintetizar y mejorar la calidad en la forma de onda a la salida resultante; esto permite la reducción de armónicos (frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de una señal, las cuales son no deseadas y pueden causar distorsión en la señal eléctrica) y la posible aplicación de un filtro a la salida. Por medio de la ecuación (2), se describe la cantidad de niveles que se

generarán[11,12,15,16]:

$$n_{HB} = 2m_{HB} + 1 \quad (2)$$

Así mismo, esta topología puede clasificarse como *simétrico* y *asimétrico.* Cuando todas las fuentes de alimentación presentes en cada módulo poseen el mismo valor, al inversor se le denomina como simétrico; pero en el caso en que las fuentes tengan valores de voltaje diferentes, se trata de un inversor en cascada asimétrico[12].

Es fundamental resaltar que la estructura del inversor puente H en cascada no solo permite la aplicación de métodos de control optimizados, sino que también requiere un número menor de componentes para generar más niveles de voltaje en comparación con otras topologías[17,18]. Sin embargo, este también presenta ciertos inconvenientes. Uno de ellos radica en la necesidad de contar con fuentes independientes de igual valor. Además, conforme aumenta el número de niveles, el control de los interruptores se vuelve más complejo al utilizar más de ellos, factor a tener en cuenta en la implementación de esta configuración[13].

En la Figura 3a) se muestra el diagrama de conexión de un inversor puente H en cascada de dos etapas, el cual, de acuerdo con la ecuación (2), genera un voltaje a la salida de cinco niveles (Figura 3b)): $+\mathbf{2V_{CD}}$, $+\mathbf{V_{CD}}$, $\mathbf{0}$, $-\mathbf{V_{CD}}$, $-\mathbf{2V_{CD}}$[11]:

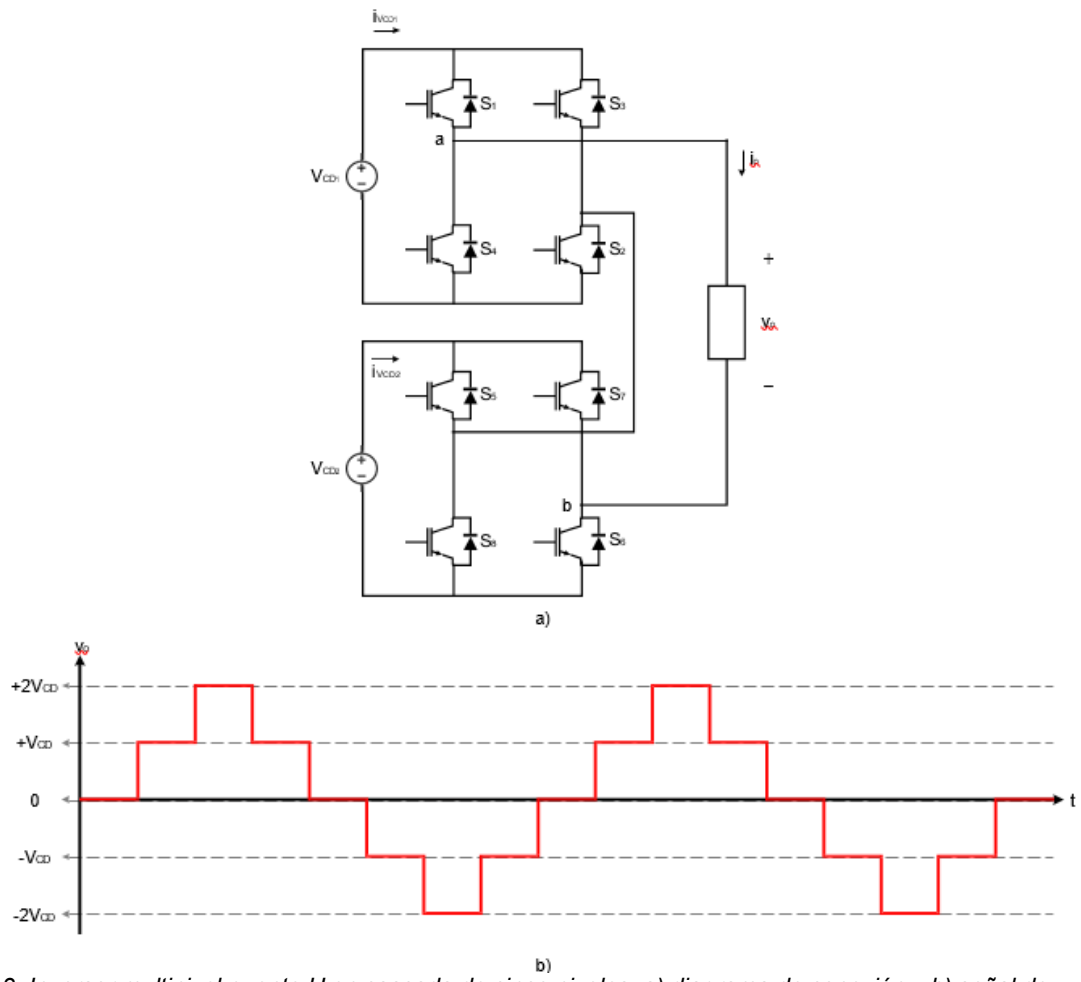


Figura 3. Inversor multinivel puente H en cascada de cinco niveles: a) diagrama de conexión y b) señal de voltaje a la salida.

Dichos niveles se obtienen de acuerdo a la secuencia de conmutación que se muestra en la Tabla 1[11]:

Tabla 1. Secuencias de conmutación de los interruptores y voltajes de salida del inversor puente H en cascada de cinco niveles.

n	Interruptores cerrados								Voltaje a la salida (v_o)
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	
1	1	1	0	0	1	1	0	0	$+2V_{CD}$
2	1	1	0	0	0	1	0	1	$+V_{CD}$
	1	1	0	0	1	0	1	0	
	0	1	0	1	1	1	0	0	
	1	0	1	0	1	1	0	0	
3	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	1	0	1	1	0	1	0	
	1	0	1	0	0	1	0	1	
	1	0	1	0	1	0	1	0	
	1	1	0	0	0	0	1	1	
	0	0	1	1	1	1	0	0	
4	0	0	1	1	1	0	1	0	$-V_{CD}$
	0	0	1	1	0	1	0	1	
	0	1	0	1	0	0	1	1	
	1	0	1	0	0	0	1	1	
5	0	0	1	1	0	0	1	1	$-2V_{CD}$

Los métodos de control (o modulación) de *Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM)* comúnmente utilizadas para inversores tradicionales también se pueden aplicar al multinivel. Estos métodos se denominan como Modulación de *Ancho de Pulso Sinusoidal con Multiportadora (Multi Carrier SPWM, MC-SPWM)*[15,19], siendo la estrategia PD-PWM la más aplicada debido a su capacidad para ofrecer un rendimiento armónico superior[20].

Fallas en los inversores

Las fallas más frecuentes en los inversores se originan debido a la integración de elementos electrónicos en el sistema inversor. Estas se clasifican de la siguiente manera[8]:

- Fallas en la fuente de CD (por ejemplo, en los diodos de rectificación)
- Fallas en los Dispositivos Semiconductores de Potencia (DSEP)
- Fallas en el control de los DSEP
- Fallas térmicas en los DSEP
- Falla en la carga

Donde las fallas más comunes en los DSEP se dividen en varias categorías: un 18% corresponde a dispositivos en circuito abierto, un 15% a dispositivos en corto circuito, un 30% a fallas en el control, un 25% a fatiga térmica y un 12% a otras fallas. Cuando se produce alguna de estas fallas, se genera una salida desbalanceada. Específicamente, las fallas en los convertidores multinivel han sido objeto de atención, centrándose en particular en las fallas de circuito abierto[8].

Falla de circuito abierto (FCA)

Esta falla se manifiesta en el inversor cuando uno de los interruptores permanece desactivado a pesar de estar recibiendo la señal de compuerta para su activación. En esta situación, no es posible la transmisión de la energía a través del inversor hacia la carga[8].

La presencia de esta falla puede tener diversas causas, desde un problema con los hilos de

conexión internos del módulo, así como la ausencia de la señal de compuerta a causa de factores externos (como la desconexión provocada por vibraciones mecánicas). En la Figura 4, se muestra el diagrama del circuito durante la ocurrencia de una FCA[8,10]:

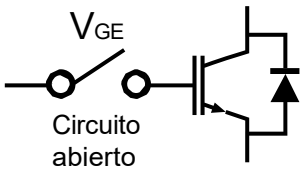


Figura 4. Diagrama durante una falla de circuito abierto.

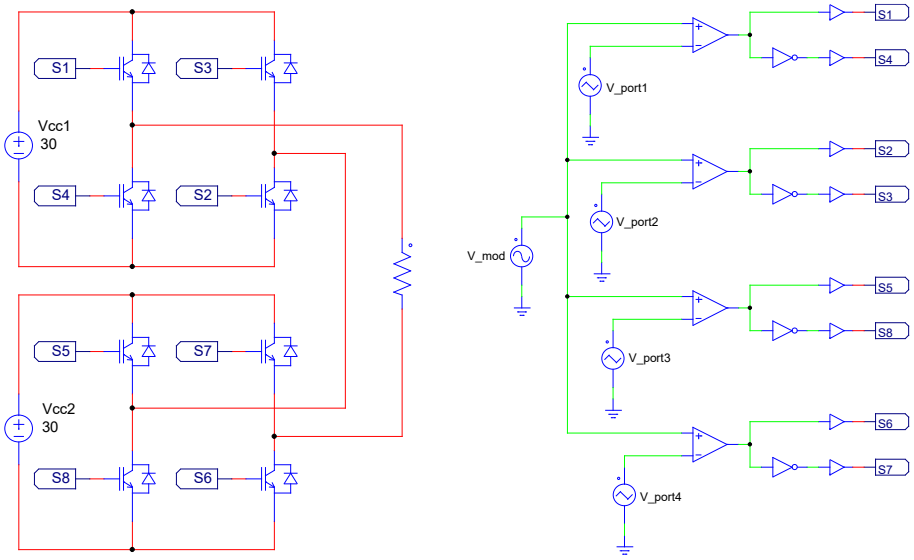
Cuando surge esta anomalía, el comportamiento del voltaje de salida del inversor experimenta modificaciones, resultando en que el nivel de voltaje en la salida permanezca nulo; esto resulta en una reducción de la capacidad de potencia de salida, la generación de corrientes pulsantes, un

aumento en el contenido armónico y la deformación de la forma de onda de corriente y voltaje de salida. Como consecuencia, puede dar lugar a una falla secundaria de otros componentes con el tiempo[6,8].

PARTE EXPERIMENTAL

La implementación controlada de fallas es esencial para evaluar la robustez y la fiabilidad de los sistemas de potencia. En este contexto, la presente sección se dedica a la implementación y análisis de fallas de circuito abierto en un inversor puente H en cascada de cinco niveles. Para determinar el comportamiento de las fallas, se realiza un análisis de los estados de conmutación de los interruptores y en ellos inducir las fallas que causen una avería en el inversor. Por lo tanto, de acuerdo a la Tabla 1, se aplica un método de control para generar el voltaje a la salida, siguiendo el método PD-LSPWM.

En primer lugar, la Figura 5 presenta tanto la topología como el método de control a implementar, desarrollados en el software de simulación PSIM:



a) b)

Figura 5. a) Configuración de un inversor puente H en cascada de cinco niveles, modulado mediante b) PD-LSPWM.

En el método de modulación por desplazamiento de nivel, todas las portadoras triangulares están

en fase y se disponen una sobre otra, como se muestra en la Figura 6a). Estas portadoras triangulares superpuestas se comparan con una onda de referencia (o moduladora) para obtener los pulsos destinados a los interruptores del inversor multinivel. En un inversor de $\boldsymbol{n}$ niveles, el número de señales portadoras ($\boldsymbol{N_C}$) se define de acuerdo con la ecuación (3)[15,21]:

$$\boldsymbol{N_C = n - 1} \tag{3}$$

Para implementar este método de control, se necesitan cuatro señales portadoras, cada una con una amplitud de 0.5 V. Esta amplitud se elige para asegurar una comparación adecuada con la señal moduladora, la cual, tiene una amplitud de 0.85 V siendo un valor comúnmente utilizado para evitar sobremodulaciones y garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

El resultado de este proceso se observa en la Figura 6, la cual muestra el voltaje y la corriente de salida. Es fundamental destacar que el inversor implementado sigue un diseño simétrico, lo que implica que las fuentes de alimentación utilizadas suministran el mismo valor de voltaje, fijado en 30 V. En el lado de salida, se conecta una carga resistiva de 100 Ω, por ende, la corriente (Figura 6c)) sigue el patrón de comportamiento de la señal de voltaje (Figura 6b)):

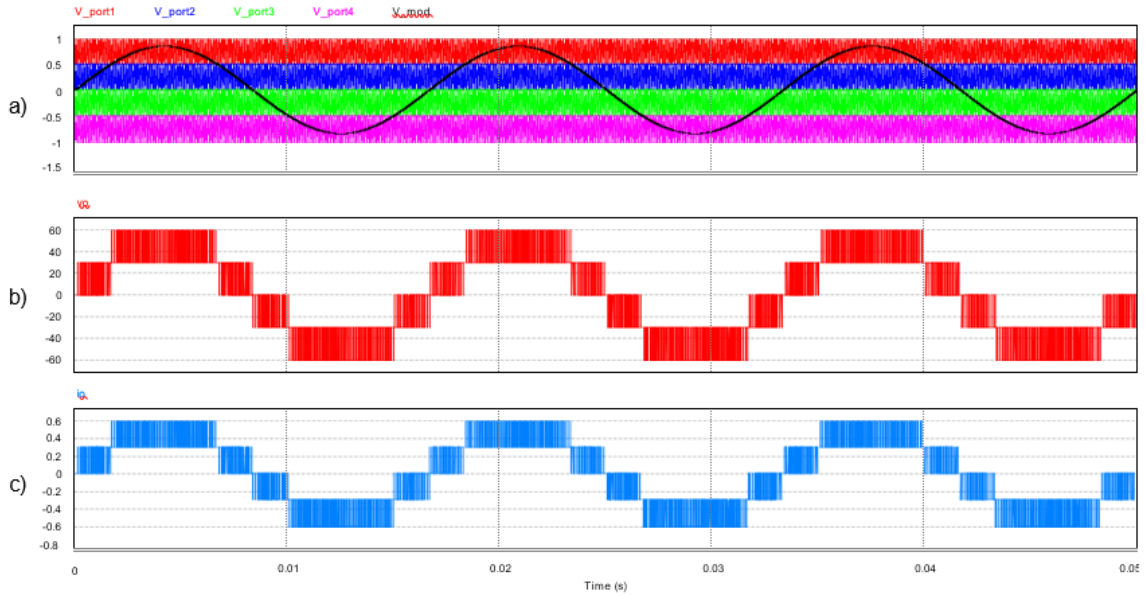


Figura 6. a) Señales de referencia y portadoras del método de control PD-LSPWM con el resultado de las señales de b) voltaje y c) corriente al aplicar una carga resistiva.

Las señales presentan valores eficaces de 36.3454 V y 363.4543 mA, con valores del 38.3832% para la Distorsión Armónica Total (THD) tanto en el voltaje como en la corriente. Con base en estos resultados, se procede a la introducción manual de fallas en circuito abierto. Esta acción se lleva a cabo mediante la implementación de compuertas lógicas AND, posicionadas entre el circuito generador del método de control y las compuertas de los IGBT's, como se muestra en la Figura 7:

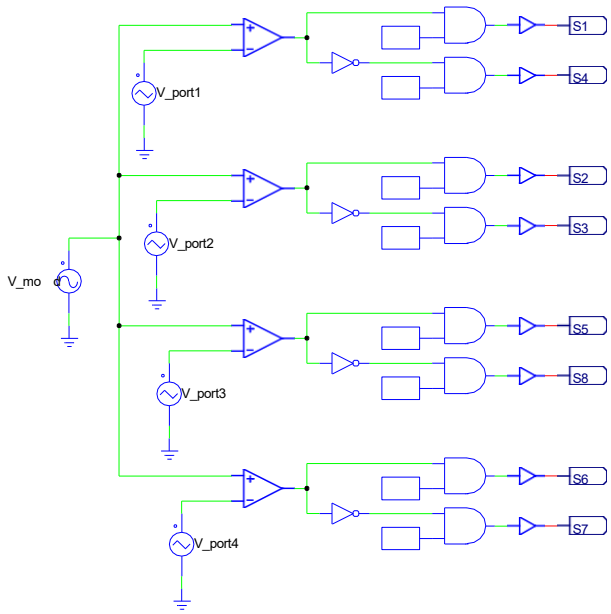


Figura 7. Diagrama de implementación manual de fallas de circuito abierto (FCA) mediante compuertas AND dentro del método de control PD-LSPWM implementado en PSIM.

Para llevar a cabo esta operación, se incorporaron bloques denominados "Constantes" que posibilitan la introducción de valores capaces de regular el flujo de pulsos hacia las compuertas, facilitando así su activación o detención. En consecuencia, se induce la falla individual en cada uno de los interruptores, así como en dos simultáneamente. Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 8, donde se presentan algunos resultados de dicha falla evidenciados en el voltaje de salida del inversor:

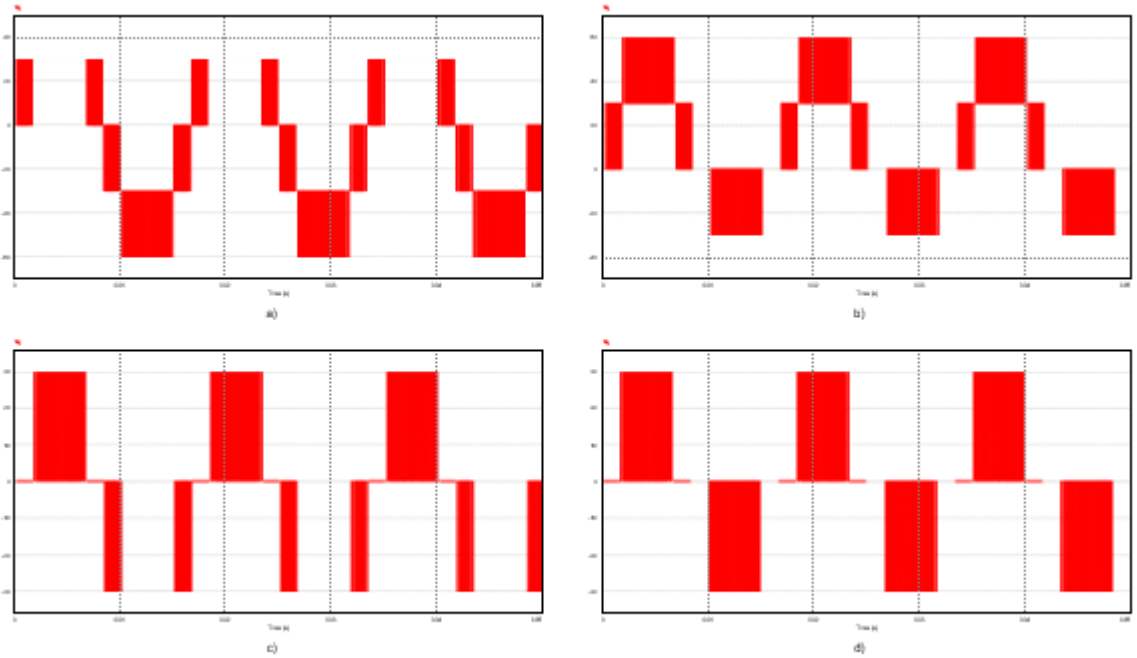


Figura 8. Falla de circuito abierto (FCA) en: a) interruptor S_1, b) interruptor S_8, c) interruptores S_5S_7 e d) interruptores S_4S_6.

Figura 8. Falla de circuito abierto (FCA) en: a) interruptor S_1, b) interruptor S_8, c) interruptores S_5S_7 e d) interruptores S_4S_6.

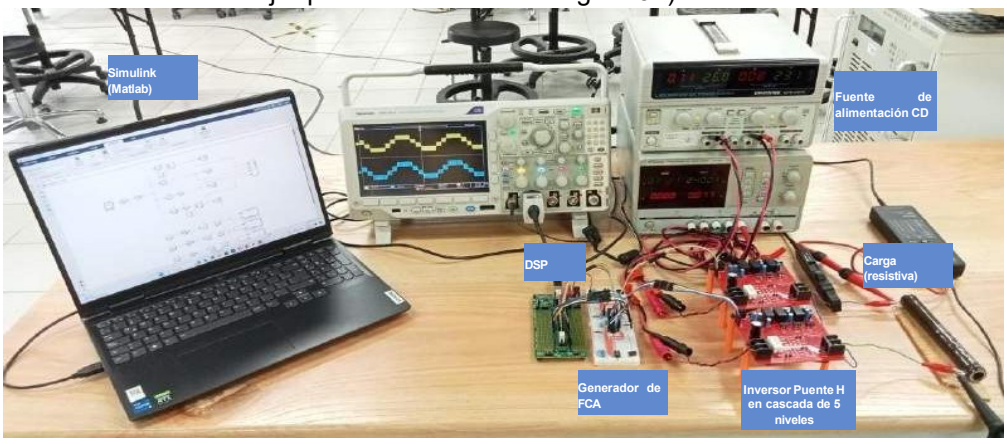
Posteriormente se analizan los resultados obtenidos, de la simulación realizada en PSIM, para extraer las características de valor eficaz y el THD tanto del voltaje y corriente de salida del inversor. En la Tabla 2, se encuentran los valores obtenidos de dicho análisis:

Tabla 2. Valores eficaz y porcentajes de THD en señales de voltaje y corriente de salida con falla de circuito abierto determinados mediante PSIM.

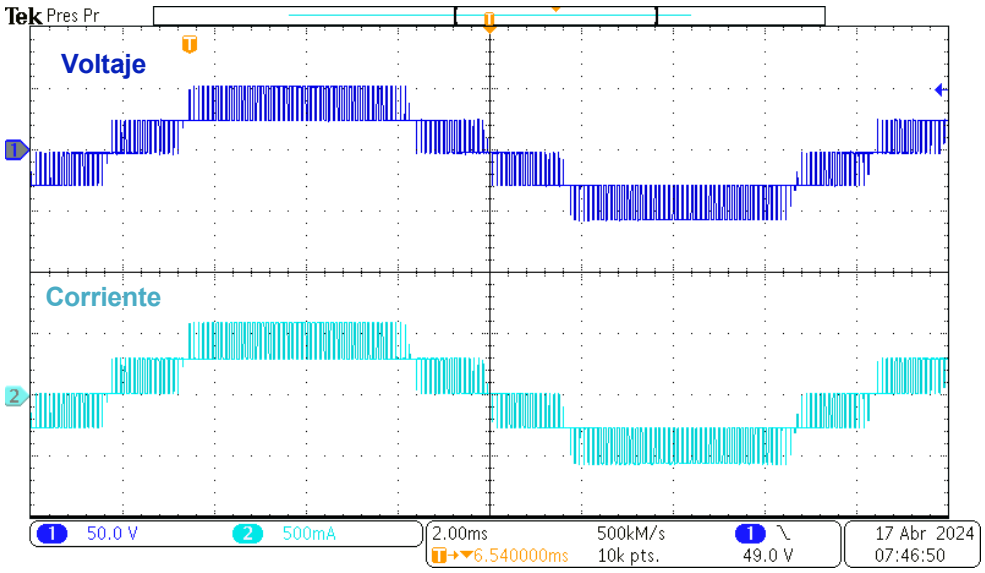
Interruptor	Voltaje		Corriente	
	v_{rms} (V)	THD_v (%)	i_{rms} (mA)	THD_i (%)
S_1	31.899453	40.850380	318.99453	40.850379
S_2	27.599111	81.712507	275.99111	81.712506
S_3	27.597357	81.743894	275.97357	81.743895
S_4	27.597357	81.743895	275.97356	81.743896
S_5	27.588749	81.886431	275.88749	81.886431
S_6	27.599111	81.712505	275.99111	81.712505
S_7	31.896753	40.858506	318.96753	40.858506
S_8	27.597357	81.743895	275.97357	81.743896
S_1S_3	22.071103	70.671661	220.71103	70.639685
S_5S_7	22.027336	70.929474	220.27336	70.929474
S_4S_6	15.73613	108.09411	157.3613	108.09411
S_8S_6	15.73669	108.09411	157.3669	108.09411
S_4S_2	15.73669	108.09411	157.3669	108.09411
S_1S_7	26.943262	35.914658	269.43263	35.914658

RESULTADOS

En la implementación del prototipo, el cual se muestra en la Figura 9a), el primer paso consiste en seleccionar el método de control, en este caso, se opta por el mismo método mencionado previamente. Para llevar a cabo esta elección, se utiliza el software Simulink de Matlab, donde se incorporan bloques ePWM y el dispositivo DSP. Cada módulo ePWM posee dos entradas de comparación con señales de referencia: ePWMA y ePWMB. Cada una posee una salida PWM respectivamente, donde su comportamiento se configura dependiendo de las entradas. Dentro de cada bloque se considera la frecuencia de conmutación y el reloj del dispositivo DSP para calcular el periodo de la señal PWM y el tiempo muerto (en este caso se emplearon tiempos muertos de 1 µs). Con ello se generan los pulsos para activar y desactivar los interruptores para cada puente-H, generando la señal de voltaje que se muestra en la Figura 9b):



a)



b)

Figura 9. a) Prototipo implementado y b) sus señales a la salida.

En este caso, los valores eficaces determinados fueron de 40.3 V y 424 mA, con una THD del voltaje del 2.2% y del 2.4% para la corriente. Así, para inducir la falla, al igual que en la sección previa, se utilizan compuertas lógicas AND entre el DSP y los interruptores del inversor, siendo estos transistores del tipo IGBT. Es fundamental destacar que, en este punto, se han considerado los optoacopladores como el método elegido para la activación/desactivación y el aislamiento, los cuales se ubican antes de los IGBT. Es relevante mencionar que estos dispositivos tienen ciertos límites de corriente según su hoja de datos. Al integrar un componente previo a ellos, se lleva a cabo el cálculo necesario para limitar adecuadamente dicha corriente, asegurando así el correcto funcionamiento del optoacoplador.

En la Figura 10 se presentan los resultados de algunas de las fallas sobre el voltaje y la corriente a la salida del inversor, las cuales fueron previamente visualizadas en la Figura 8:

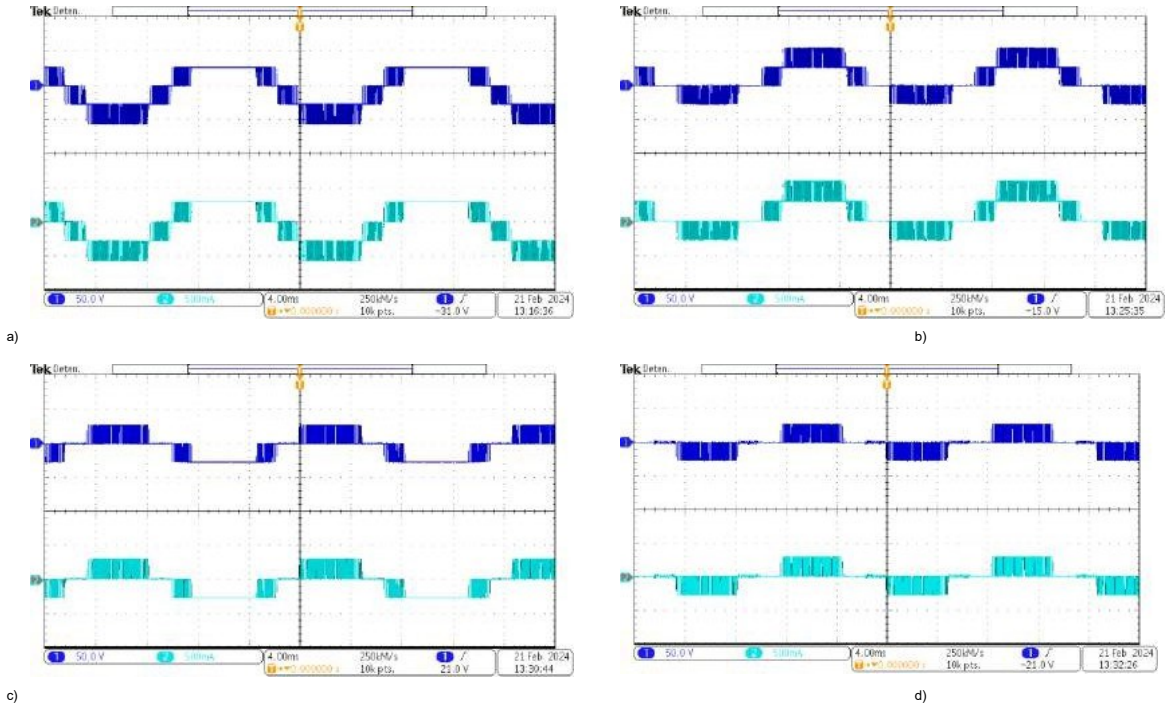


Figura 10. Falla de circuito abierto (FCA) en: a) interruptor S_1, b) interruptor S_8, c) interruptores S_5S_7 e d) interruptores S_4S_6.

Mediante los cuales se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Valores eficaz y porcentajes de THD en señales de voltaje y corriente de salida con falla de circuito abierto.

Interruptor	Voltaje		Corriente	
	v_{rms} (V)	THD_v (%)	i_{rms} (mA)	THD_i (%)
S_1	33.4	19.9	348	20.1
S_2	31.1	19	321	18.8
S_3	31.2	19	334	19.4
S_4	31.2	19	334	19.4
S_5	31.1	19	321	18.8
S_6	31.1	19	321	18.8
S_7	33.5	20	355	20.6
S_8	31.2	19	333	19.4
S_1S_3	21.6	22	230	21.5
S_5S_7	21.4	22	223	21.7
S_4S_6	17.7	36.8	186	36.7
S_8S_6	17.8	36.9	186	37.1
S_4S_2	17.7	36.9	187	37
S_1S_7	24.8	23.2	261	23.6

Es relevante destacar que las mediciones para calcular el THD se llevaron a cabo con el dispositivo FLUKE 435 Series II, diseñado para analizar la calidad eléctrica y energética. Su objetivo es minimizar el tiempo de inactividad, resolver rápidamente problemas de calidad eléctrica y calcular los costos de la pérdida de energía.

De acuerdo a su hoja de datos, este dispositivo presenta limitaciones en cuanto a la cobertura de armónicos. Esta restricción puede dar lugar a la omisión de armónicos significativos,

especialmente en sistemas con frecuencias de conmutación elevadas, como los inversores de frecuencia variable. Como consecuencia, se presenta la posibilidad de subestimar la Distorsión Armónica Total (THD), lo que podría no proporcionar una imagen completa de la calidad de la señal. Esta limitación se refleja en las notables diferencias entre los valores obtenidos durante la simulación y los registrados en las mediciones reales.

CONCLUSIONES

La presencia de fallas, especialmente la falla de circuito abierto (FCA), en un inversor multinivel, considerando que es mayormente utilizado en sistemas de paneles fotovoltaicos, puede tener un impacto significativo en el rendimiento y la calidad de la energía generada. Durante condiciones normales de operación, se registran valores eficaces de voltaje de 40 V y corriente de 424 mA, indicativos de una generación eficiente de energía. Sin embargo, cuando se produce una FCA, estos valores disminuyen drásticamente a 17.7 V y 186 mA, respectivamente, lo que afecta la capacidad del sistema para mantener niveles estables de voltaje y corriente.

Además, el aumento en la THD durante la presencia de la falla, que se eleva a un máximo del 37%, indica una disminución en la calidad de la energía generada, lo que puede tener implicaciones en la eficiencia general del sistema y en su capacidad para satisfacer las demandas de energía. La comprensión y mitigación de las posibles fallas en inversores multinivel son críticas para garantizar un rendimiento óptimo y una operación confiable en aplicaciones como la generación de energía solar a partir de paneles fotovoltaicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. A. Pecina-Sánchez, D. U. Campos-Delgado, C. H. De Angelo, D. R. Espinoza-Trejo, A.
   A. Valdez-Fernández, “Diagnóstico de Fallas de Circuito Abierto Mediante Observadores PI en Inversores Multinivel NPC Interconectados con la Red”, Congreso Nacional de Control Automático (AMCA), Ensenada, Baja California, México, 2013.
2. A. G. Sánchez-Reyna, F. E. López-Monteagudo, and J. de la Torre-Ramos, "Análisis de Inversores Monofásicos Multinivel," Instituto Superior de Coatzacoalcos, 2016. http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1649.
3. J. A. Pecina-Sánchez, D. U. Campos-Delgado, D. R. Espinoza-Trejo, A. A. Valdez-Fernández, C. H. De Angelo, “Diagnóstico de Fallas en Inversores Interconectados con la Red Mediante el Análisis de Componentes Simétricas”, Congreso Nacional de Control Automático (AMCA), Cuernavaca, Morelos, México, 2015.
4. J. A. Pecina-Sánchez, D. U. Campos-Delgado, D. R. Espinoza-Trejo, A. A. Valdez-Fernández, C. H. De Angelo, “Diagnóstico de Fallas en Inversores Multinivel NPC Empleando un Enfoque Basado en Reconocimiento de Patrones”, Congreso Nacional de Control Automático (AMCA), Ensenada, Baja California, México, 2013.
5. J. Aguayo-Alquicira, A. Claudio-Sánchez, L. G. Vela-Valdés, M. A. Rodríguez, and R. A. Vargas-Méndez, "Análisis de un inversor multinivel en cascada con tolerancia a fallas," Ingeniería e Investigación, vol. 31, no. 3, pp. 66-79, diciembre 2011.
6. R. Wu, F. Blaabjerg, H. Wang, M. Liserre, F. Iannuzzo, "Catastrophic failure and fault-tolerant design of IGBT power electronic converters - an overview", IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 507-513, doi: 10.1109/IECON.2013.6699187.
7. H. Wang, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, June 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2252958.
8. A. E. Mayo-Reyes, “Detección de Fallas en un Inversor Multinivel Puente-H Simétrico de 5 Niveles en Cascada Monofásico”, Tesis Profesional para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, 2023.

9. D. W. Hart, "Electrónica de potencia," Pearson Educación S. A., Madrid, 2001. ISBN: 84- 205-3179-0.
10. J. A. Pecina-Sánchez, “Diagnóstico de Fallas en Convertidores de Potencia para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red”, Tesis Profesional para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, 2017.
11. O. A. Alfaro-Cruz, R. E. Murgas-Zelaya, “Diseño y construcción de inversor monofásico de cuatro etapas”, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero Electricista, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, San Salvador, 2010.
12. J. A. Araque-Gallardo, J. L. Diaz-Rodriguez and A. P. García, "THD optimization of a single phase cascaded multilevel converter using PSO technique," 2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), Bogota, Colombia, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEPQA.2013.6614944.
13. J. Gordillo-Estrada, “Compensación por Medio de la Modulación de la Onda de Salida de un Inversor Multinivel en Cascada ante Desbalances en las Fuentes de Alimentación”, Tesis Profesional para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México, 2011.
14. M. González, F. Salinas, M. Escalante, “Convertidor Multinivel Tipo Condensadores Flotantes como compensador estático (STATCOM) de potencia reactiva”, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, 2008.
15. G. Schettino, C. Buccella, M. Caruso, C. Cecati, V. Castiglia, R. Miceli, F. Viola, “Overview and Experimental Analysis of MC SPWM Techniques for Single-Phase Five Level Cascaded H-Bridge FPGA Controller-Based”, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, Italy, 2016, pp. 4529-4534, doi: 10.1109/IECON.2016.7793351.
16. F. Cabrera-Salamanca, S. Salinas-Rivas, “Control para Convertidores Tipo Puente-H con Celdas Desbalanceadas en Potencia”, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero Civil en Automatización, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 2018.
17. L. N. Espinosa-Vásquez, J. Ramírez-Arenas, “Control de Inversor Multinivel Modular MMC Monofásico de 500 W a 120 Vrms”, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones, Departamento de automática y Electrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia, 2021.
18. C. García-Santacruz, “Comparación de Técnicas de Modulación para el control de Convertidores Electrónicos de Potencia Multinivel”, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero de Tecnologías Industriales, Departamento de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
19. M. Calais, L. J. Borle and V. G. Agelidis, "Analysis of multicarrier PWM methods for a single-phase five level inverter," 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230), Vancouver, BC, Canada, 2001, pp. 1351-1356 vol. 3, doi: 10.1109/PESC.2001.954308.
20. P. M. Lingom, J. Song-Manguelle, J. M. Nyobe-Yome, D. L. Mon-Nzongo, T. Jin and M. L. Doumbia, "A Single-Carrier PWM Method for Multilevel Converters," 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China, 2019, pp. 122-127, doi: 10.1109/PEDG.2019.8807453.
21. S. Swathy, N. Niveditha, K. S. Chandragupta-Mauryan, "Design of Five-Level Cascaded H- Bridge Multilevel Inverter", en Innovations in Electrical and Electronics Engineering (pp. 65- 80), 2020, doi: 10.1007/978-981-15-2256-7_7.

IMPLEMENTACIÓN DE ASISTENCIA ELÉCTRICA A UNA BICICLETA

Rodolfo Rodríguez Padilla, María del Rosario Baltazar Flores y Miguel Ángel Casillas Araiza

Instituto Tecnológico de León.
rodolfo.rodriguez@leon.tecnm.mx

RESUMEN

Actualmente se está promoviendo el uso de vehículos que utilicen energías alternativas a los combustibles fósiles para disminuir el impacto ambiental producto de las excesivas emisiones de gases con carbono a la atmósfera. Uno de estos aparatos es la bicicleta eléctrica, que en su modalidad de propulsión humana, es conocida y ha sido usada por la mayoría de las personas alguna vez en la vida, misma que proporciona esparcimiento y actividad física, resultando además, ser un medio económico y fácil de utilizar.

En una bicicleta de rodada 26 pulgadas, se colocó un motor eléctrico de 120 vatios de potencia y de hasta 12 voltios de fuerza electromotriz, conectado a la rueda delantera mediante una cadena de bicicleta, una rueda dentada de nueve dientes acoplada al eje del motor, y una de cincuenta y cinco dientes en una rueda libre, acoplada a la rueda delantera. La velocidad del motor, se reguló con un control electrónico de velocidad, el mismo se alimentó con una batería de 12 voltios. Se logró una velocidad promedio de 15Km/h solo con el empuje del motor, y una velocidad máxima con asistencia de 32Km/h. Considerando un recorrido con asistencia eléctrica de 20Km a 20Km/h, se tendría un consumo de corriente de 4.2 amperios durante una hora, por lo que la energía de la batería debería de ser de 5 amperios hora para cumplir con el recorrido con una sola carga.

La asistencia eléctrica irá disminuyendo conforme se adquiere velocidad. Al llegar a 23Km/h, la asistencia eléctrica sería de la mitad, la otra mitad del empuje sería proporcionado por el usuario, disminuyendo el esfuerzo del conductor y aumentando la capacidad de la distancia del recorrido, para así de esta manera, fomentar el uso de este tipo de vehículos y desincentivar el del automóvil, disminuyendo considerablemente el impacto ambiental.

INTRODUCCIÓN

El uso del automóvil ha repercute en la generación de una mayor emisión de dióxido de carbono entre otros contaminantes y las contingencias ambientales son cada vez más frecuentes debido al crecimiento de las ciudades y por consiguiente en el aumento de la circulación de vehículos con motores térmicos.

Una alternativa para mitigar la contaminación del aire, es la introducción de automóviles eléctricos para sustituir gradualmente el parque vehicular, aunque el elevado costo de las baterías hace difícil la adquisición de uno de estos para la mayoría de los consumidores.

Otra alternativa es la bicicleta y los patines eléctricos, los cuales son los vehículos más accesibles económicamente para la mayoría de los usuarios, y el tiempo de carga de la batería es mucho menor, además que con la bicicleta, se puede continuar con el trayecto aun cuando la batería se haya descargado.

TEORÍA

Se utilizaron los términos de física involucrados en el movimiento de una bicicleta[1] (Bikedeengenheiro, 2017), relacionados con movimiento uniforme para la transmisión, energía cinética, potencia, trabajo y energía, para el cálculo de la batería y la entrega de potencia a diferentes velocidades del motor. Con la prueba del motor en vacío, se obtendría la velocidad máxima sin entrega de torque, y con una persona sin pedalear, la velocidad máxima entregada por el motor a la bicicleta.

Perímetro de una circunferencia
Se obtiene al efectuar el producto de π multiplicado por el diámetro.

$$\boldsymbol{P = \pi * D}$$

Donde:

$\boldsymbol{P}$ **es el perímetro**.
$\boldsymbol{\pi}$ **es la relación entre el perímetro y el diámetro y equivale a** $\boldsymbol{3.1416}$.
$\boldsymbol{D}$ **es el diámetro**.

Ley de Watt
La potencia eléctrica consumida por la carga, es el resultado del producto del voltaje aplicado y la corriente que circula por el elemento o aparato conectado a la fuente eléctrica.

$$\boldsymbol{P = E * I}$$

Donde:

$\boldsymbol{P}$ **es la Potencia y se mide en en Vatios** ($\boldsymbol{W}$).
$\boldsymbol{E}$ **es la fuerza electromotríz y se mide en Voltios** ($\boldsymbol{V}$).
$\boldsymbol{I}$ **es la intensidad de corriente y se mide en Amperios** ($\boldsymbol{A}$) .

Energía cinética
Cuando un cuerpo se mueve, se dice que tiene una energía cinética, y está equivale a la mitad de la masa, multiplicada por la velocidad del objeto.

$$\boldsymbol{K = \frac{1}{2} m v^2}$$

Donde:

$\boldsymbol{K}$ **es la energía cinética y se mide en en Julios** ($\boldsymbol{J}$).
$\boldsymbol{m}$ **es la masa y se mide en Kilogramos** ($\boldsymbol{Kg}$).
$\boldsymbol{v}$ **es la velocidad y se mide en metros sobre segundo** ($\boldsymbol{m/s}$) .

Trabajo mecánico
Definida por la cantidad de trabajo que se desarrolla en una cantidad de tiempo.

$$\boldsymbol{T = F * d}$$

Donde:

$\boldsymbol{T}$ **es el Trabajo y se mide en Julios** ($\boldsymbol{J}$).
$\boldsymbol{F}$ **es la Fuerza y se mide en en Kilogramos** ($\boldsymbol{Kg}$).
$\boldsymbol{d}$ **es la Distancia y se mide en Metros** ($\boldsymbol{m}$) .

El trabajo realizado para llevar a un objeto de una velocidad a otra, es igual a la diferencia entre la energía cinética de la velocidad inicial y la inicial. Si la velocidad inicial es cero, el trabajo sería equivalente a la energía cinética de la velocidad final.

$$\boldsymbol{T = K_{final} - K_{inicial}}$$
$$\boldsymbol{T = K_{final}}$$

Potencia mecánica

Definida por la cantidad de trabajo que se desarrolla en una cantidad de tiempo.

$$\boldsymbol{P = \frac{T}{t}}$$

Donde:

$\boldsymbol{P\ es\ la\ Potencia\ y\ se\ mide\ en\ en\ Vatios}(\boldsymbol{W})$.
$\boldsymbol{T\ es\ el\ Trabajo\ y\ se\ mide\ en\ Julios}(\boldsymbol{J})$.
$\boldsymbol{t\ es\ el\ Tiempo\ y\ se\ mide\ en\ Segundos}\ (\boldsymbol{s})$.

Otra forma de expresar la fórmula de la potencia mecánica, es sustituyendo la definición del trabajo y al dividir la distancia entre el tiempo, sustituir esta razón por la velocidad.

$$\boldsymbol{P = \frac{F * d}{t}} \qquad \boldsymbol{P = F\,\frac{d}{t}} \qquad \boldsymbol{P = F * v}$$

Donde:

$\boldsymbol{P\ es\ la\ Potencia\ y\ se\ mide\ en\ en\ Vatios}(\boldsymbol{W})$.
$\boldsymbol{T\ es\ el\ Trabajo\ y\ se\ mide\ en\ Julios}(\boldsymbol{J})$.
$\boldsymbol{t\ es\ el\ Tiempo\ y\ se\ mide\ en\ Segundos}\ (\boldsymbol{s})$.

Resistencia aerodinámica

Al desplazarse un objeto en un fluido, la fricción entre ambos provocará una resistencia al avance, misma que dependerá de la forma del objeto, la densidad del fluido, el cuadrado de la velocidad a la que se desplace dentro del fluido y al área que se proyecte sobre la dirección del movimiento.

$$\boldsymbol{F_d = \frac{1}{2}(C_d * \rho * v^2 * A)}$$

Donde:

$\boldsymbol{F_d\ es\ la\ fuerza\ de\ arrastre\ se\ mide\ en\ Newtons}\ (\boldsymbol{N})$.
$\boldsymbol{C_d\ es\ el\ coeficiente\ de\ arrastre\ aerodinámico\ y\ no\ tiene\ unidades}\ (-)$.
$\boldsymbol{\rho\ es\ la\ densidad\ del\ airey\ se\ mide\ en\ kilogramos\ sobre\ metro\ cúbico}\ (\boldsymbol{Kg/m^3})$.
$\boldsymbol{v\ es\ la\ velocidad\ del\ objeto\ y\ se\ mide\ en\ metros\ sobre\ segundo}\ (\boldsymbol{m/s})$.
$\boldsymbol{A\ es\ el\ área\ frontal\ del\ objeto\ y\ se\ mide\ en\ metros\ cuadrados}\ (\boldsymbol{m^2})$.

Resistencia a la rodadura

Está dada por el peso del conjunto formado por el ciclista y la bicicleta, multiplicado por un coeficiente que dependerá de la llanta.

$$\boldsymbol{F_r = m * g * C_r}$$

Donde:

$\boldsymbol{F_r\ es\ la\ fuerza\ de\ rodadura\ y\ se\ mide\ en\ Newtons}\ (\boldsymbol{N})$.
$\boldsymbol{g\ es\ la\ gravedad\ y\ se\ mide\ en\ \ metros\ sobre\ segundo\ cuadrado}(\boldsymbol{m/s^2})$.
$\boldsymbol{C_r\ es\ el\ coeficiente\ de\ rodadura\ y\ no\ tiene\ unidades}\ (-)$.

PARTE EXPERIMENTAL

Caracterización del motor

Se consideraron dos tipos de motores para el armado del sistema. El primero, un motor de arranque de motocicleta, el cual proporcionaba un gran torque al arranque, pero su consumo de corriente en vacío era mucho mayor que el motor de patín. A 12 voltios giraba a 1662 rpm y consumía 9.2 amperios.

Imagen 1. Prueba en vacío del motor de arranque de motocicleta.

Imagen 2. Prueba en vacío del motor de patín.

El segundo motor, es el utilizado en los patines eléctricos, consume solo 0.22 amperios en vacío, lo que disminuiría en 9 amperios el consumo de energía eléctrica con respecto al motor de marcha, aunque el torque disminuiría. Además de un mayor consumo de corriente, el motor de arranque

presentaba un calentamiento y emisión de ruido mayor, que el motor de patín, puntos a considerar para seleccionar al segundo para continuar con pruebas posteriores.

Tomando en cuenta que la potencia del motor no sería suficiente para mover por si solo una bicicleta a 35 Km/h, y que el torque de un motor eléctrico con imanes permanentes en el estator es lineal y decrece con la velocidad de rotación, se decidió que se tendría un torque del 50%, si la velocidad de vacío del motor a 24 voltios, estaría relacionada con una velocidad máxima de la bicicleta de 70Km/h. Se procedió entonces con los cálculos para seleccionar el número de dientes de la estrella (piñón conducido), a partir del piñón de 9 dientes del motor, del diámetro de la rueda, y la velocidad de crucero de entre 20 y 35Km por hora.

Transmisión
Cálculo del perímetro en metros, a partir del diámetro de la rueda de 26 pulgadas:

$$\boldsymbol{Perímetro = 26in\left(\frac{2.54cm}{1\ in}\right)\left(\frac{1m}{100cm}\right) = 2.07m}$$

Transformando la velocidad de 70 Km/h a revoluciones por minuto.

$$\boldsymbol{v = 70\frac{Km}{h}\left(\frac{1000m}{1Km}\right)\left(\frac{1h}{60min}\right) = 1167\frac{m}{min}}$$

$$\boldsymbol{v = 1167\frac{m}{min}\left(\frac{1\ revolución}{2.07m}\right) = 564\frac{revolución}{min}}$$

Encontrando la cantidad de dientes para la estrella.

$$\boldsymbol{\left(\frac{Dientes\ estrella}{9\ dientes}\right) = \left(\frac{3500rpm}{564rpm}\right)}$$

$$\boldsymbol{Dientes\ estrella * 564\ rpm = 3500rpm * 9\ dientes}$$

$$\boldsymbol{Dientes\ estrella = 3500\ rpm\left(\frac{9\ dientes}{564rpm}\right) = 55.8\ dientes}$$

Los cálculos arrojaron un total de 55.8 dientes, y se tomó la decisión de fabricar la estrella con un valor de 55 dientes.

El sistema se montó en la rueda delantera, para así de esta manera no modificar la parte trasera, ya que es una bicicleta de montaña y tiene una transmisión de dieciocho velocidades y resultaría mucho más complicada su instalación en cada bicicleta que se busque electrificar.

Se Instaló una la masa trasera en el rin delantero, se tomaron medidas para ubicar la base para el motor, de manera que la cadena pudiera girar libremente en el mismo plano que la rueda libre y la estrella.

Imagen 3. Toma de medidas del brazo de la tijera para colocar la placa de sujeción del motor.

Imagen 4. Montaje de estrella de 44 dientes en la rueda libre de 20 dientes.

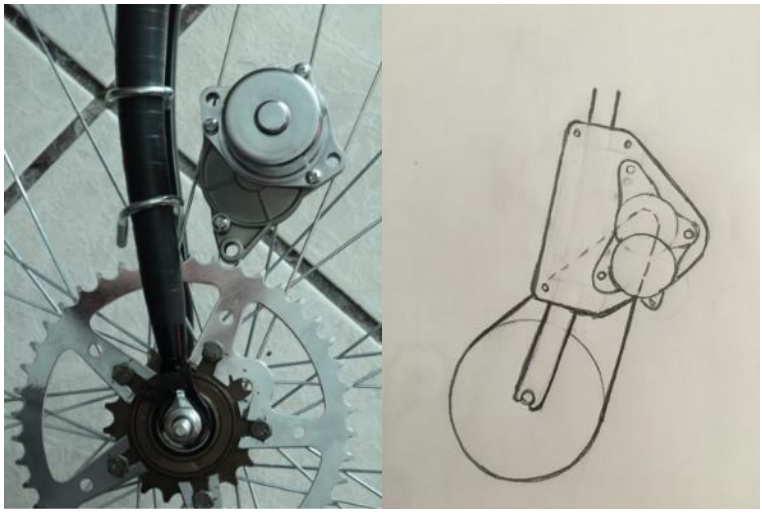


Imagen 5. Ubicación del motor y esquema para la placa y sujeción.

Se utilizó una masa trasera en la rueda delantera, esto para poder fijar la rueda libre, donde se instalaría la estrella y posteriormente se montaría la cadena. Se montó en una placa el motor, y se fijó con un par de abrazaderas en u al brazo derecho de la tijera que sujeta la rueda.

Imagen 6. Medidas de la rueda libre y montado de la estrella de 55 dientes.

La flecha del motor cuenta con un diámetro de 8mm, y 15mm de largo para montar el piñón. Se fabricó con el número mínimo de dientes para mantener lo más pequeño posible el sistema de tracción, y evitar que se atasque la cadena. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se decidió que el piñón contaría con nueve dientes.

Imagen 7. Diseño y manufactura del piñón, instalado en el motor del motor de patín.

Imagen 8. Prueba en vacío con el motor de marcha de motocicleta.

Imagen 9. Prueba en vacío con el motor de patín eléctrico.

Imagen 10. Revoluciones por minuto de la rueda al realizar la prueba en vacío.

Durante la prueba de vacío, la rueda delantera arrojó un valor de 532rpm. Con la relación de dientes de la transmisión, se obtuvieron 3251rpm para el motor, y para la velocidad en kilómetros por hora de la bicicleta, los cálculos arrojaron un valor de 66Km/h.

$$v_{motor} = 532\ rpm\ rueda\left(\frac{55\ dientes}{9\ dientes}\right) = 3251\ rpm\ motor$$

$$v_{bicicleta} = 532\frac{rev}{min}\left(\frac{2.07m}{1\ rev}\right)\left(\frac{1\ km}{1000m}\right)\left(\frac{60min}{1h}\right) = 66Km/h$$

Al hacerse la prueba sin pedalear, midiendo con una app en el celular, se tuvo una velocidad máxima de 17Km/h en un sentido, y 13Km/h en el otro sentido. Obteniéndose un promedio de 15Km/h. Sin ayuda de la asistencia eléctrica una velocidad máxima de 27Km/h, y con la asistencia eléctrica, se alcanzaron los 32Km/h. Para una velocidad de crucero de 22Km/h, se pudo circular cómodamente, con la asistencia eléctrica.

Considerando una asistencia eléctrica para un recorrido diario de 20Km, a 20Km/h, se tendría un consumo de corriente de 4.2Amperios durante una hora, con un voltaje de 24Voltios. Se requeriría entonces, dos baterías de 5Ah de 12V cada una.

Fuerzas
Análisis de la resistencia al avance
Generación de la ecuación para la resistencia aerodinámica al avance:

$$F_d = \frac{1}{2}(C_d * \rho * v^2 * A)$$

$$F_d = \frac{1}{2}\left(1 * 1.3\frac{Kg}{m^3} * v^2 * 0.4\ m^2\right)$$

$$F_d = \frac{1}{2}\left(1 * 1.3\frac{Kg}{m^3} * (4.17m/s)^2 * 0.4\ m^2\right)$$

$$F_d = 4.52N$$

Generación de la ecuación para la fuerza de resistencia a la rodadura.

$$F_r = m * g * C_r$$

$$F_r = 80Kg * 9.81m/s * 0.005$$

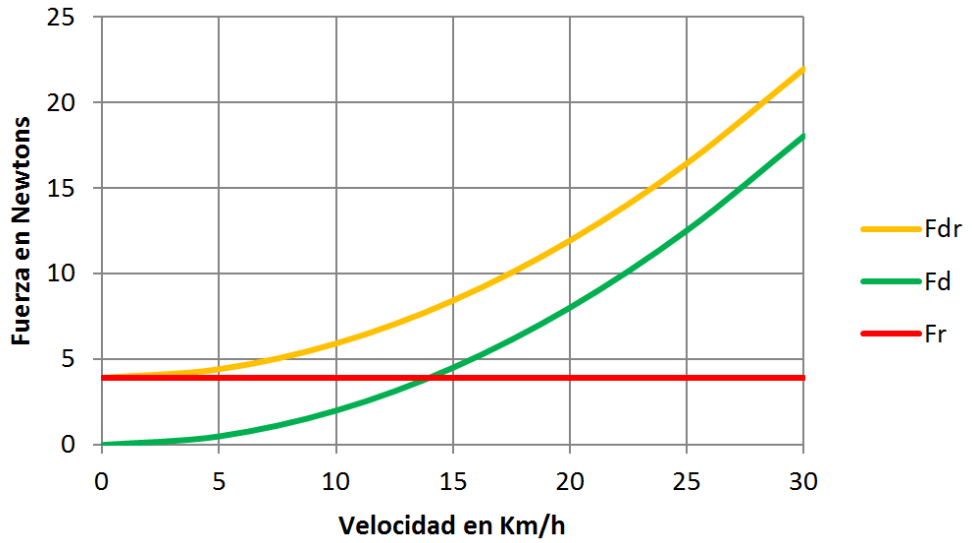
$$F_r = 3.92N$$

Ecuación para la potencia de arrastre y rodadura.

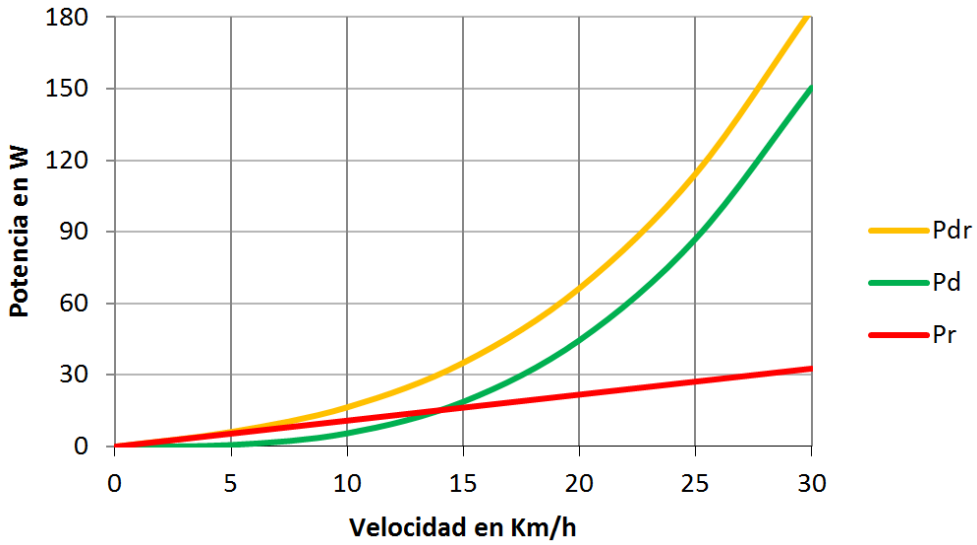
$$P_d = F_d * v \qquad P_r = F_r * v$$

Ecuación para la potencia total.

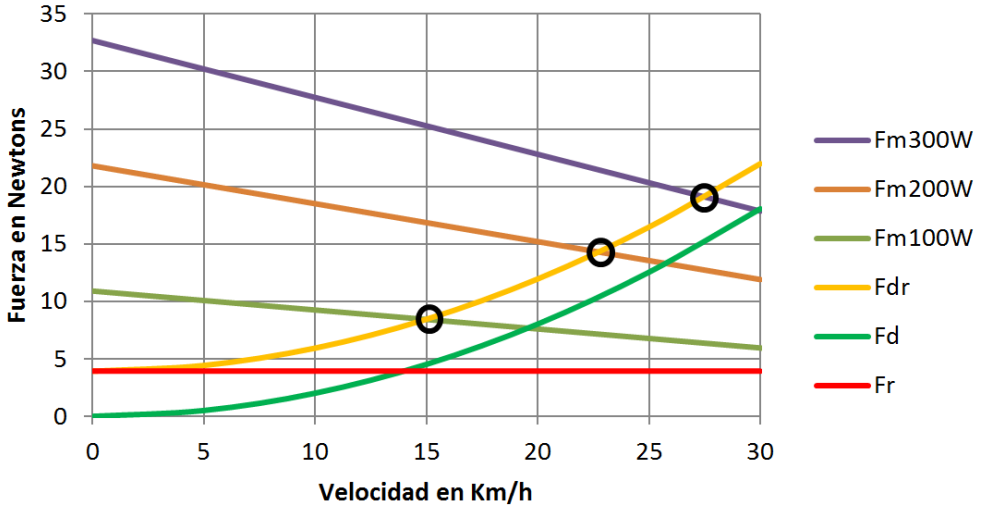
$$P = P_d + P_r$$



Gráfica 1. Fuerza de resistencia a la rodadura, resistencia aerodinámica y la suma de ambas.



Gráfica 2. Potencia de resistencia a la rodadura, potencia aerodinámica, y la suma de ambas.



Gráfica 3. Velocidades alcanzadas por la bicicleta con diferentes potencias de motores.

Si la bicicleta llego a una velocidad máxima de 15Km/h, donde la gráfica indica que la fuerza necesaria para moverse a esa velocidad es de 8.42N, y sí la rueda mide 0.33m de radio, entonces tendremos un torque proporcionado por el motor de 2.78Nm a 739rpm.

Ecuación del motor:

$$\boldsymbol{Torque = Fuerza * distancia}$$
$$\boldsymbol{Torque = 8.42N * 0.33m}$$
$$\boldsymbol{Torque = 2.78Nm}$$

Ecuación de la recta para graficar el torque del motor, en función de sus rpm.
Puntos:

$$\boldsymbol{P_1 = (15Km/h\,, 8.42N)}$$

$$\boldsymbol{P_2 = (66Km/h\,, 0N)}$$

Ecuación de la recta:

$$\boldsymbol{y_1 = (\,mx_2 - x_1\,) + y_2}$$

Encontramos la pendiente, utilizando los puntos conocidos:
Fórmula de la pendiente:

$$\boldsymbol{m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}}$$

$$\boldsymbol{p_1 = (\,15Km/h\,, 8.42N\,)} \quad \boldsymbol{p_2 = (\,66Km/h\,, 0N\,)}$$

Sustituyendo $\boldsymbol{p_1}$ y $\boldsymbol{p_2}$ en la fórmula de la pendiente:

$$\boldsymbol{m = \frac{0N - 8.42N}{66Km/h - 15Km/h}}$$

$$\boldsymbol{m = -0.1651\,Nh/Km}$$

Sustituyendo m y el punto $\boldsymbol{p_1}$ en la ecuación de la recta:
Ecuación de la recta:

$$\boldsymbol{y = m(x - x_1) + y_1}$$

Cambio de variable:

$$F_{motor} = m(v - v_1) + F_1$$

$$F_{motor} = (-0.1651Nh/Km)(v - 15Km/h) + 8.42N$$

$$F_{motor} = (-0.1651Nh/Km)v + 10.9N$$

Fórmula para la hoja de cálculo:

$$F_{motor} = -0.165v + 10.9$$

Cuando la velocidad es cero:

$$F_{motor} = -0.165\ (\ 0Km/h\ ) + 10.9$$

$$F_{motor} = 10.9N$$

Encontramos que el torque máximo del motor es 3.597N a 0Km/h.

$$Torque = Fuerza * distancia$$
$$Torque = 10.9N * 0.33m$$
$$Torque = 3.597Nm$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al hacerse la prueba sin pedalear, midiendo con una app en el celular, se detectó una velocidad máxima de 17Km/h en un sentido, y 13Km/h en el otro sentido. Obteniéndose un promedio de 15Km/h. Sin ayuda de la asistencia eléctrica una velocidad máxima de 27Km/h, y con la asistencia eléctrica, se alcanzaron los 32Km/h. Para una velocidad de crucero de 22Km/h, se pudo circular cómodamente, con la asistencia eléctrica.

Considerando una asistencia eléctrica para un recorrido diario de 20Km, a 20Km/h, se tendría un consumo de corriente de 4.2Amperios durante una hora, con un voltaje de 24Voltios. Se requeriría entonces, dos baterías de 5Ah de 12V cada una.

CONCLUSIONES

Con el agregado de un motor y una batería eléctrica, y unas pequeñas modificaciones en la rueda delantera, se obtiene una asistencia eléctrica que puede llevar cómodamente a una o dos personas en un trayectos cortos y medios, o ayudar para realizar trayectos medios o largos. Para quienes usan su automóvil con regularidad, la bicicleta con asistencia eléctrica es una opción económicamente accesible para reducir el impacto ambiental de los motores de combustión interna.

REFERENCIAS

1. Bikedeengenheiro (2017). “Blog para tartar temas de ingeniería, bicicletas, calculos y todo mezclado”. Febrero. Sitio web: https://bikedeengenheiro.blogspot.com/2017/02/

EDITORAS

Cristina E. Solano Sosa
María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Alexandra Monsetrrat García

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.

9 786078 821488

ISBN TOMO VI
INGENIERÍAS

9 786078 821426

ISBN OBRA COMPLETA
AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO I