

Handbook T-I

Diseño de Materiales Avanzados y Sistemas Energéticos con Física Aplicada

Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín. PhD

Flores-Gil, Aarón. PhD

Mandujano-Ramírez, Humberto Julián. PhD

Patiño-Carachure, Cristóbal. PhD

Coordinadores

ECORFAN®

Coordinadores

Figuroa-Ramírez, Sandra Jazmín. PhD
Flores-Gil, Aarón. PhD
Mandujano-Ramírez, Humberto Julián. PhD
Patiño-Carachure, Cristóbal. PhD

Editor en Jefe

Vargas-Delgado, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva

Ramos-Escamilla, María. PhD

Directora Editorial

Peralta-Castro, Enrique. MsC

Diseñador Web

Escamilla-Bouchan, Imelda. PhD

Diagramador Web

Luna-Soto, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

Rosales-Borbor, Eleana. BsC

Filóloga

Ramos-Arancibia, Alejandra. BsC

ISBN: 978-607-8948-65-9

Sello Editorial ECORFAN: 607-8948

Número de Control HDMA: 2025-07

Clasificación HDMA [2025]: 301025-0107

©ECORFAN-México, S.C.

Park Pedregal Business 3580 – Adolfo Ruiz Cortines Boulevard, CP-01900. San Jeronimo Aculco Álvaro Obregón - Mexico City.

Ninguna parte de este escrito protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: Citas en artículos y comentarios bibliográficos de compilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos. Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor. Violaciones: Ser obligado al procesamiento bajo ley de copyright mexicana. El uso de nombres descriptivos generales, nombres registrados, marcas o nombres comerciales en esta publicación no implica, uniformemente en ausencia de una declaración específica, que tales nombres estén exentos del protector relevante en leyes y reglamentos de México y por lo tanto libres para uso general por la comunidad científica internacional. HDMA es parte de los medios de ECORFAN [www.ecorfan.org]. Publicado por ECORFAN-México. Todos los derechos reservados.

Obras derivadas: Los usuarios pueden reproducir tablas de contenido o preparar listas de capítulos incluyendo resúmenes para circulación interna dentro de sus instituciones o empresas. Excepto los capítulos publicados bajo la licencia CC BY.

Almacenamiento o uso: Salvo lo indicado anteriormente o lo establecido en la correspondiente licencia de uso, ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en un sistema de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, grabación o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito del editor.

Los Autores. Publicado por ECORFAN-México, S.C. para su Holding México en nombre de Handbook HDMA. Este es un manual de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Handbooks

Definición de Handbooks

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en las Áreas de investigación SECIHTI y PRODEP

ECORFAN-Mexico S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de SECIHTI con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales




Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas – Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados – Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación SECIHTI.

Alcance, Cobertura y Audiencia

Handbooks es un Producto editado por ECORFAN-Mexico S.C en su Holding con repositorio en México, es una publicación científica arbitrada e indizada. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de las Área de investigación SECIHTI y PRODEP respectivamente con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias. El horizonte editorial de ECORFAN-Mexico® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial



Carvajal - Millan, Elizabeth. PhD

 Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Universidad de Sonora •  D-4230-2013 •  0000-0003-4390-7457

Córdova - Guerrero, Iván. PhD

 Universidad Autónoma de Baja California •  ABD-2879-2020 •  0000-0002-5528-400X •  217323



Armado - Matute, Arnaldo José. PhD

 Universidad de Carabobo (UC) •  0000-0003-4670-0339





Rivera - Becerril, Facundo. PhD

 Universidad Autónoma Metropolitana •  0000-0002-2166-4311

Cruz - Reyes, Juan. PhD

 Universidad Autónoma de Baja California •  0000-0003-0763-7955

Lopez - Zamora, Leticia. PhD

 Instituto de Tecnología de Orizaba •  KYR-9025-2024 •  0000-0003-3236-9462 •  56228



Stilianova - Stoytcheva, Margarita. PhD

 Universidad Autónoma de Baja California •  0000-0002-8281-9823 •  215808





Cornejo - Bravo, José Manuel. PhD

 Universidad Autónoma de Baja California •  AAF-8741-2021 •  0000-0002-0013-8937 •  14338

Sotero - Solis, Victor Erasmo. PhD





 Universidade de São Paulo •  0000-0002-3562-605X

Oropeza - Guzmán, Mercedes Teresita. PhD



 Tecnológico Nacional de México •  AAS-7285-2020 •  0000-0001-7399-5529 •  210428

Comité Arbitral

Alvarado - Flores, Jesús. PhD

 Unidad de Ciencias del Agua, CICY A.C. Cancún, Quintana Roo México. •  LDG-7923-2024 • 
0009-0008-5948-3779 •  266358





De Leon - Flores, Aned. PhD

 Universidad de Sonora •  0000-0003-3909-2742




Martínez - Quiroz, Marisela. PhD

 Escuela de Ingeniería CINAP •  0000-0001-6374-3029





Magana - Badilla, Héctor Alfonso. PhD

 Universidad Autónoma de Baja California •  ADQ-6080-2022 •  0009-0004-9383-7914 • 
471302




Valdez - Castro, Ricardo. PhD

 Universidad Nacional Autónoma de México •  KBQ-2525-2024 •  0000-0001-8196-0027 • 
230911

Quiroz - Castillo, Jesús Manuel. PhD

 Universidad de Sonora •  AFL-8728-2022 •  0000-0002-8810-6162 •  170543

Santacruz - Ortega, Hisila del Carmen. PhD

 Universidad de Sonora •  AGW-4625-2022 •  0000-0002-7123-8791




Mendoza - Castillo, Didilia Ileana. PhD

 Instituto Tecnológico de Aguascalientes •  AAH-4694-2020 •  0000-0002-8047-9116 •  173442

Ochoa - Terán, Adrián. PhD

 Tecnológico Nacional de México •  KHW-7438-2024 •  0000-0002-3746-3960

Frontana - Vazquez, Carlos Eduardo. PhD

 Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. •  0000-0003-2783-8535
•  101279

Saldarriaga, Hugo. PhD

 Universidad Autónoma del Estado de México •  AGU-2313-2022 •  0000-0002-0676-0639 • 
225261

Cesión de derechos

El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones científicas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación de la Obra Científica y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-SECIHTI- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORCID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor [Correo y Teléfono] e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor de la Obra Científica.

Detección de Plagio

Todas las Obras Científicas serán testeadas por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirán de la recepción de la Obra Científica notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todas las Obras Científicas se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de SECIHTI para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del ECORFAN Handbooks con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial-Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de la Obra Científica Modificado para Edición-Publicación

ECORFAN Diseño de Materiales Avanzados y Sistemas Energéticos con Física Aplicada

Volumen I

El Handbook ofrecerá contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyen a la actividad de divulgación científica de la Universidad Autónoma del Carmen en sus áreas de Física Aplicada. Además de contar con una evaluación completa, a cargo de los coordinadores de la Universidad Autónoma del Carmen, de la calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada con estándares internacionales [V|LEX, RESEARCH GATE, MENDELEY, GOOGLE SCHOLAR y REDIB], el Handbook propone así a la comunidad académica, informes recientes sobre nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de Física Aplicada.

Diseño de Materiales Avanzados y Sistemas Energéticos con Física Aplicada T-I

Handbook

Coordinadores

Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín. PhD

Flores-Gil, Aarón. PhD

Mandujano-Ramírez, Humberto Julián. PhD

Patiño-Carachure, Cristóbal. PhD

Universidad Autónoma del Carmen

Octubre 2025

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.1.101>



Prefacio

La colaboración entre los cuerpos académicos (CA's) de "Diseño, Materiales y Energía", "Materiales Avanzados" y "Física Aplicada" representa una oportunidad significativa que impulsa la investigación y el desarrollo en diversas áreas del conocimiento científico y tecnológico. La sinergia entre estos grupos académicos se traduce en trabajo y colaboración interdisciplinaria que potencializa la ciencia, la tecnología y la innovación.

Los proyectos de investigación reúnen las capacidades de los distintos cuerpos académicos para desarrollar nuevos materiales con potencial en sistemas energéticos eficientes y en diversas áreas de la física aplicada. El diseño es otro pilar fundamental que favorece la creación de prototipos que incorporan principios innovadores para el desarrollo de materiales avanzados y técnicas que minimizan el impacto ambiental.

Cada cuerpo académico aporta una perspectiva única: el CA-25 de "Diseño, Materiales y Energía" se enfoca en la innovación de tecnologías energéticas; el CA-40 "Materiales Avanzados" se enfoca en el desarrollo de materiales innovadores; y el CA-39 de "Física Aplicada" en la aplicación de principios físicos en ingeniería y tecnología.

La interacción entre estos cuerpos académicos resulta fundamental para el desarrollo integral de la investigación, promoviendo la innovación, la sostenibilidad y la formación de profesionales capacitados para enfrentar los desafíos del futuro. En este contexto, la interdisciplinariedad, los proyectos de innovación y la difusión de resultados son clave para el éxito de esta colaboración.





*Universidad Autónoma del Carmen
Octubre 30, 2025*





Contenido	Pag
<p>1 Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] para sensado térmico Coba-Ramos, Jesus Alberto, De la Cruz-May, Lelio, Benavides, Olena y Meza-Cruz, Onésimo</p>	1-18
<p>2 Viabilidad energética y sustentabilidad ambiental de la energía solar en el sector agroalimentario: caso de rastros municipales Meza-Cruz, Onésimo, Sierra-Grajeda, Juan, Pérez-Montejo, Salatiel y Flores-Gil, Aarón</p>	19-26
<p>3 Caracterización microestructural y electroquímica de la aleación Al-Cu 25 % peso en agua de mar sintética Flores-Chan, José Enrique, Calan-Canche, Jose Damian, Martínez-Vargas, Sergio y Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín</p>	27-35
<p>4 Caracterización Espectroscópica y Fitoquímica del extracto metanólico provenientes de hojas de la planta <i>Terminalia cattapa</i> Sánchez-Martínez, Víctor Alberto, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores Gil, Aarón y Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo</p>	36-43
<p>5 Análisis comparativo del desempeño de electrolizadores PEM: Efecto de la geometría del campo de flujo Sierra-Grajeda, Juan, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores-Chan, José Enrique y Mandujano-Ramírez, Humberto</p>	44-52
<p>6 Estudio de uña humana in vivo empleando espectroscopia Raman Confocal Urrieta-Almeida, Edgar, Flores-Gil, Aarón, De la Cruz-May, Lelio y Patiño-Carachure, Cristóbal</p>	53-61
<p>7 Adsorción de CO₂ en fullereno C30 dopado con fosforo. Estudio DFT Toxqui-De La Torre, Ana Paulina, Mandujano-Ramírez, Humberto Julián, Flores-Chan, José Enrique y Martínez-Vargas, Sergio</p>	62-70
<p>8 Análisis térmico-mecánico de la boquilla de agua de alimentación de un reactor de agua en ebullición-5 Pérez-Montejo, Salatiel, Meza-Cruz, Onésimo, Martínez-Vargas, Sergio y Calan-Canche, Damián</p>	71-79
<p>9 Producción de hidrógeno utilizando placas de aluminio reciclado expuestos en solución de NaOH Quiroz-Hernández, Luis Efraín, Pérez-Montejo, Salatiel, Flores-Gil, Aarón y Patiño-Carachure, Cristóbal</p>	80-88
<p>10 Simulación numérica de celdas solares de perovskita: estudio teórico del fenómeno de histéresis Mandujano-Ramírez, Humberto, Julián, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores-Gil, Aarón y Martínez-Vargas, Sergio</p>	89-101





Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] para sensado térmico





Design and Characterization of a Raman Fiber Laser with FBG at 1119 nm: Comparative Study of MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km], and 1060XP [1 km] Fibers for Thermal Sensing

Coba-Ramos, Jesus Alberto ^a, De la Cruz-May, Lelio * ^b, Benavides, Olena ^c y Meza-Cruz, Onésimo ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  MVY-7025-2025 •  0009-0005-8071-7021 •  392386

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  D-3896-2011 •  0000-0003-3918-0582 •  75160

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  Q-3771-2019 •  0000-0002-8124-0326 •  339830

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  LTD-0198-2024 •  0000-0002-0875-6852 •  488085

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.1.18>

Área: Física-Matemáticas y Ciencias de la Tierra

Campo: Física

Disciplina: Óptica

Subdisciplina: Láseres

Key Handbooks

En este trabajo se presenta el diseño y la caracterización de un láser Raman de fibra óptica con rejilla de Bragg [FBG] a 1119 nm. El objetivo es evaluar cuatro configuraciones experimentales empleando fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km], analizando la influencia de la longitud y del área efectiva de la fibra en la eficiencia Raman, la generación del primer Stokes y la estabilidad espectral. Es importante destacar que se alcanzaron sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14 a 0.23 nm, confirmando la confiabilidad del sistema como sensor térmico. Los resultados posicionan a este diseño como una alternativa robusta, compacta y económica frente a los sensores convencionales a 1550 nm, con gran potencial de aplicación en telecomunicaciones, industria y biomedicina. Los autores por orden en este capítulo de libro cuentan con la siguiente cantidad de citas 1, 2, 2 y 0. El autor Coba-Ramos cuenta con beca CONAHCYT y el resto de los autores cuentan con perfil deseable PRODEP y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Todos los autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son: Láser Raman de Fibra Óptica, Rejilla de Bragg [FBG] y Sensor.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Coba-Ramos, Jesus Alberto, De la Cruz-May, Lelio, Benavides, Olena y Meza-Cruz, Onésimo. 2025. Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] para sensado térmico. 1-18. ECORFAN.

* ✉ [\[ldelacruz@pampano.unacar.mx\]](mailto:ldelacruz@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]


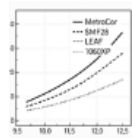


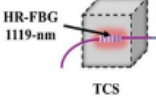
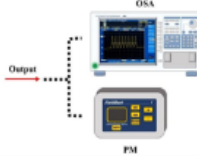
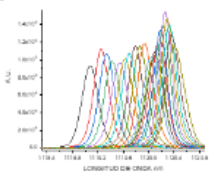
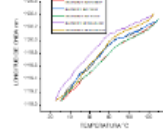
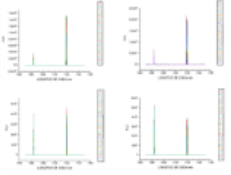
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

This work presents the design and characterization of a Raman fiber laser with a Fiber Bragg Grating [FBG] at 1119 nm, aimed at high-precision thermal sensing. Four experimental configurations using MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km], and 1060XP [1 km] fibers were evaluated, analyzing the influence of fiber length and effective area on Raman efficiency and spectral stability. Results demonstrated thermal sensitivities ranging from 12.7 to 14.32 pm/°C and a reduced hysteresis of 0.14–0.23 nm, confirming the reliability of the sensor during heating and cooling cycles. The performance achieved surpasses that of conventional sensors operating at 1550 nm, consolidating this proposal as a robust, compact, and cost-effective alternative with strong potential for remote monitoring, telecommunications, industry, and biomedical applications where temperature measurement accuracy is critical.

“Design and Characterization of a Raman Fiber Laser with FBG at 1119 nm: Comparative Study of MetroCor (4 km), SMF28 (5 km), LEAF (4.7 km), and 1060XP (1 km) Fibers for Temperature Sensing”


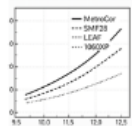


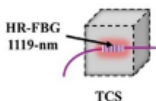
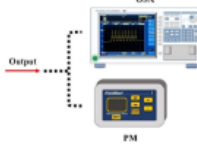
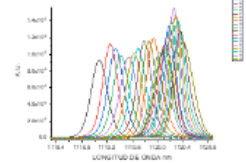
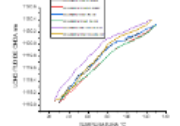
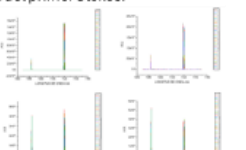
Objective	Methodology	Contribution
<p>To design and characterize a Raman fiber laser with FBG at 1119 nm for temperature sensing</p>  <p>To compare the results of different fibers (MetroCor, SMF28, LEAF, 1060XP) in terms of thermal sensitivity and system stability</p>  <p>To validate the feasibility of this technology as an alternative to conventional optical sensors at 1550 nm</p> 	<p>Four experimental setups were designed and characterized</p> <ul style="list-style-type: none"> 4 km MetroCor + 4.7 km LEAF 4 km MetroCor + 1 km 1060XP 5 km SMF28 + 4.7 km LEAF 5 km SMF28 + 1 km 1060XP  <p>The FBG (1119 nm) was subjected to temperature variations (35–160°C) in a controlled oven.</p>  <p>Spectra and powers were analyzed using an OSA and an optical power meter.</p> 	<p>Thermal sensitivities between 12.7 and 14.32 pm/°C were achieved</p>  <p>A reduced hysteresis of 0.24 nm was achieved, confirming the stability of the system</p>  <p>The relationship between fibers with different effective areas improves the efficiency of the first Stokes</p>  <p>This work provides a new compact, precise, and robust photonic alternative for industrial, biomedical, and remote monitoring applications.</p>

Raman Fiber Laser, Fiber Bragg Grating [FBG], Sensor

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y la caracterización de un láser Raman de fibra óptica con rejilla de Bragg [FBG] a 1119 nm, orientado a sensores térmicos de alta precisión. Se evaluaron cuatro configuraciones experimentales con fibras MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km], analizando la influencia de la longitud y área efectiva de la fibra en la eficiencia Raman y en la estabilidad espectral del sistema. Los resultados muestran sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14 a 0.23 nm, confirmando la confiabilidad del sensor en ciclos de calentamiento y enfriamiento. El desempeño alcanzado supera a los sensores convencionales a 1550 nm, consolidando esta propuesta como una alternativa robusta, compacta y económica, con potencial de aplicación en monitoreo remoto, telecomunicaciones, industria y biomedicina, donde la exactitud en la medición de temperatura resulta crítica.

“Diseño y caracterización de un Láser Raman de Fibra Óptica con FBG a 1119 nm: estudio comparativo de fibras MetroCor (4 km), SMF28 (5 km), LEAF (4.7 km) y 1060XP (1 km) para sensado térmico”

Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Diseñar y caracterizar un láser Raman de fibra óptica con FBG a 1119 nm para sensado de temperatura.</p>  <p>Comparar los resultados de diferentes fibras (MetroCor, SMF28, LEAF, 1060XP) en la sensibilidad térmica y estabilidad del sistema.</p>  <p>Validar la viabilidad de esta tecnología como alternativa a sensores ópticos convencionales a 1550 nm.</p> 	<p>Se diseñaron y caracterizaron 4 arreglos experimentales</p> <p>4 km MetroCor + 4.7 km LEAF 4 km MetroCor + 1 km 1060XP 5 km SMF28 + 4.7 km LEAF 5 km SMF28 + 1 km 1060XP</p>  <p>La FBG (1119 nm) fue sometida a variaciones de temperatura (35–160 °C) en un horno de control.</p>  <p>Se analizaron espectros y potencias con un OSA y medidor óptico.</p> 	<p>Se alcanzaron sensibilidades térmicas entre 12.7 y 14.32 pm/°C.</p>  <p>Se logró una histéresis reducida de 0.24 nm, confirmando la estabilidad del sistema.</p>  <p>La relación entre fibras de distinta área efectiva mejora la eficiencia del primer Stokes.</p>  <p>El trabajo aporta una nueva alternativa fotónica compacta, precisa y robusta para aplicaciones industriales, biomédicas y de monitoreo remoto.</p>

Láser Raman de Fibra Óptica, Rejilla de Bragg [FBG], Sensor

Introducción

En los últimos años, los **láseres Raman de fibra óptica** han adquirido gran relevancia dentro de la fotónica por su capacidad de generar emisiones coherentes y ajustables en distintas longitudes de onda. Estas propiedades los hacen altamente atractivos para aplicaciones en **telecomunicaciones, espectroscopía, monitoreo ambiental y sensado remoto**. A diferencia de los sistemas convencionales, este tipo de láseres ofrece beneficios adicionales como su **capacidad, robustez, estabilidad espectral y resistencia a condiciones adversas**, lo cual amplía su rango de aplicación en entornos industriales y científicos [Feng, 2017; Agrawal, 2013; Islam, 2002].

Box 1

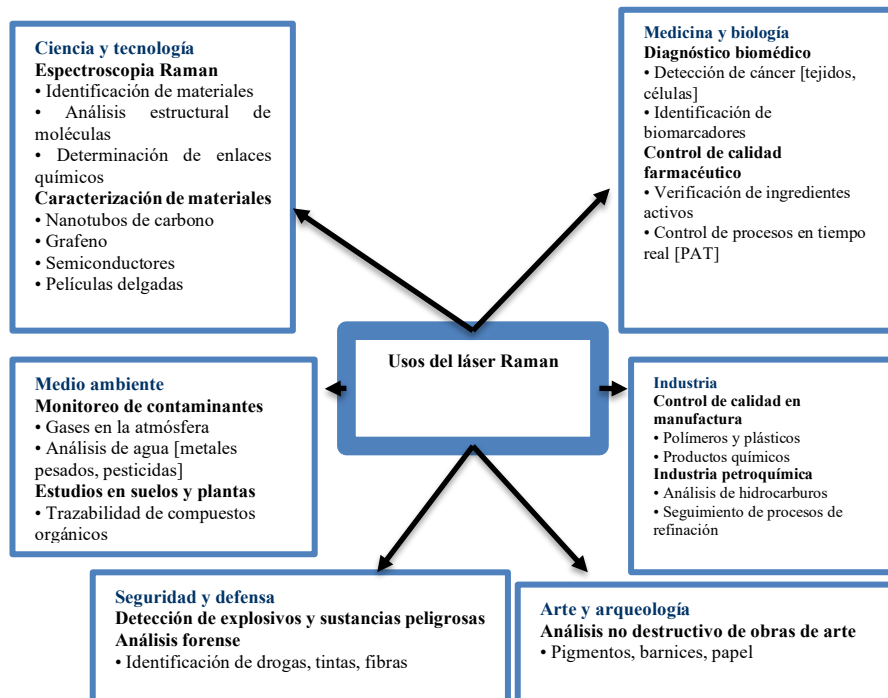


Figura 1

Usos de los laser Raman de fibra Óptica

El **Esparcimiento Raman Estimulado [SRS, por sus siglas en inglés]** constituye un fenómeno fundamental en diversas áreas, entre ellas las telecomunicaciones por fibra óptica, el procesado de materiales, las fuentes de bombeo, la espectroscopía y aplicaciones médicas. En el ámbito de las fibras ópticas, la SRS se aprovecha como un mecanismo de ganancia altamente eficiente que permite amplificar o desplazar señales dentro del intervalo espectral de 1000 a 1700 nm [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

El efecto Raman se produce cuando un fotón interactúa con una molécula, resultando en dos tipos de dispersión: la dispersión elástica o Rayleigh, en la que el fotón dispersado conserva la misma energía del incidente; y la dispersión inelástica o Raman, en la que el fotón dispersado cambia su frecuencia. Esta última puede subdividirse en dos casos: dispersión Raman-Stokes, cuando el fotón pierde energía al transferirla a la molécula, y dispersión Raman-anti-Stokes, cuando el fotón gana energía desde la molécula [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

Box 2

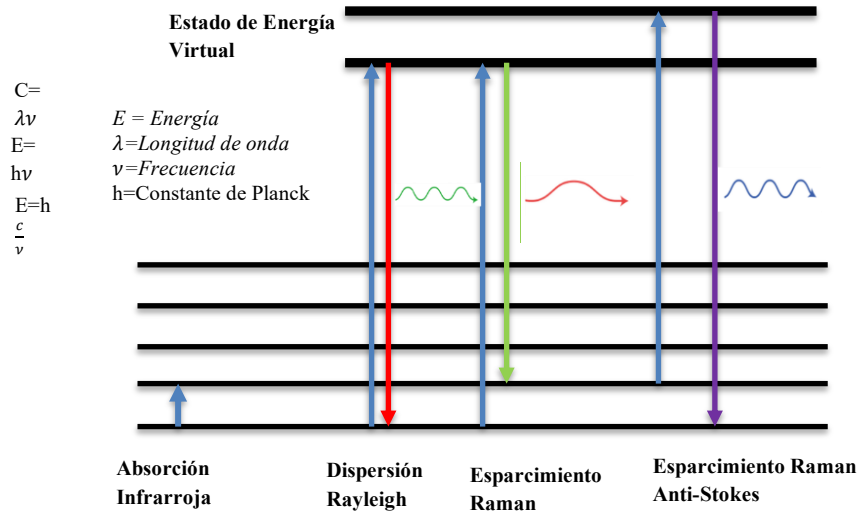


Figura 2
Niveles de energía del fotón en el Esparcimiento Raman

Si un fotón con la frecuencia de Stokes interactúa con una molécula en un estado vibracional virtual, induce a la molécula a decaer a un nivel vibracional de menor energía. Este proceso resulta en la emisión de otro fotón de Stokes, el cual comparte la misma fase y amplitud que el fotón incidente, amplificando así la señal. La repetición de esta interacción a lo largo de la trayectoria del haz de Stokes, y con múltiples moléculas excitadas en el estado virtual, conduce a la amplificación coherente de la luz, fenómeno conocido como Esparcimiento Raman Estimulado [Agrawal, 2013; Islam, 2002; De la Cruz-May et al., 2023].

Box 3

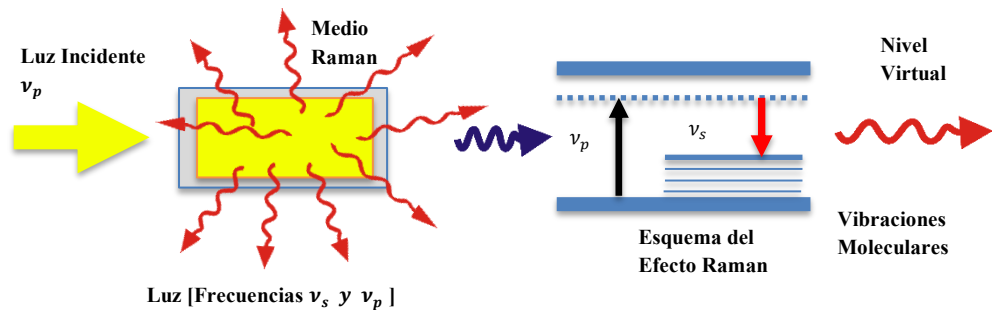


Figura 3
Esparcimiento Raman Estimulado

Ganancia Raman

$$gR = \frac{16A_{eff}}{P_{th}L_{eff}} \tag{1}$$

Potencia de Umbral

$$P_{th} = \frac{16\alpha[\pi w^2]}{gR} \tag{2}$$

Ecuaciones diferenciales acopladas que describen el comportamiento del esparsimiento Raman Estimulado

$$\frac{dP_p^+}{dz} = -\alpha_p P_p^+ - \frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_{RP}}{A_{eff}} P_p^+ [P_p^+ + P_p^-] \tag{3}$$

$$\frac{dP_P^+}{dz} = -\alpha_S P_S^+ + \frac{g_{RS}}{A_{eff}} P_S^+ [P_P^+] \quad [4]$$

$$\frac{dP_P^-}{dz} = \alpha_S P_S^- - \frac{g_{RS}}{A_{eff}} P_S^- [P_P^+] \quad [5]$$

En este caso, P_P^+ , P_S^+ y P_S^- corresponden a las potencias de bombeo y de Stokes, respectivamente, donde los superíndices $+$ y $-$ indican la propagación en sentido directo e inverso. Los parámetros α_P y α_S representan las atenuaciones de la fibra para la onda de bombeo y la onda de Stokes, respectivamente. Por su parte, g_{RP} y g_{RS} designan los coeficientes de ganancia Raman asociados al bombeo y a la señal Stokes. La variable A se refiere al área efectiva de Stokes en la fibra, mientras que z indica la posición a lo largo del eje de la fibra óptica [Islam, 2004; Agrawal, 2010; Pages-Pacheco et al., 2023].

Un componente clave en el funcionamiento de los láseres Raman es la fibra óptica, que presenta una ganancia Raman intrínseca. Para aplicaciones avanzadas, se requieren fibras con mayor ganancia Raman y características específicas como un área efectiva del modo optimizada, la cual depende del perfil del índice de refracción de la fibra. Esta área efectiva influye directamente en la intensidad de la radiación de bombeo necesaria para una potencia dada al igual que su Longitud efectiva tal como se muestra en las ecuaciones [Islam, 2004; Agrawal, 2010; Pages-Pacheco et al., 2023].

En el mundo actual, medir con precisión la temperatura en diferentes entornos industriales, científicos e incluso biomédicos se ha vuelto fundamental. Para lograrlo, la tecnología ha ido más allá de los métodos tradicionales, abriendo paso a soluciones basadas en la luz y la fibra óptica. Una de estas innovaciones es el uso de rejillas de Bragg en fibra óptica [FBG, por sus siglas en inglés], dispositivos que aprovechan las propiedades ópticas de la luz para detectar cambios sutiles en el ambiente [Yin, Ruffin & Yu, 2008; Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021].

Box 4

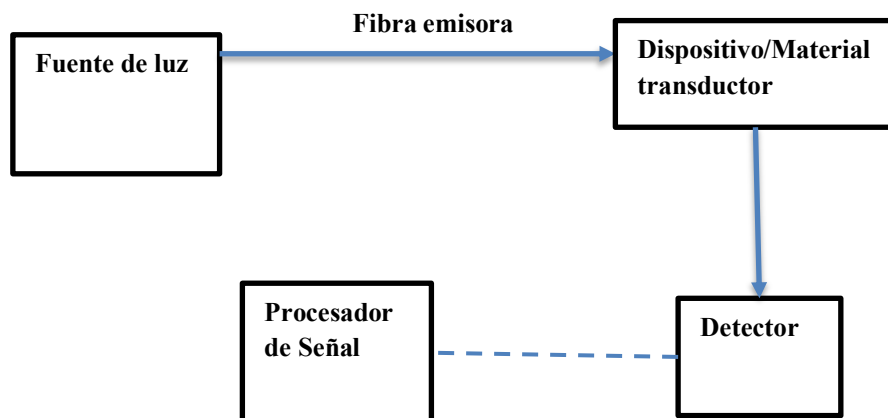


Figura 4

Diagrama de bloques de los componentes de un sensor óptico básico.

La fibra óptica, conocida por su capacidad de transmitir datos a gran velocidad, también puede actuar como un sensor sensible y confiable. Al integrar rejillas de Bragg en estas fibras, es posible obtener mediciones de temperatura extremadamente precisas. La razón radica en que la estructura interna de la rejilla cambia cuando la temperatura varía, modificando así la longitud de onda de la luz reflejada [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014]. Este efecto permite utilizar la fibra como un termómetro de alta tecnología.

En este sentido para la investigación realizada la **rejilla de Bragg en fibra [FBG]** es uno de los elementos clave en este sistema para detectar cambios de temperatura, ya que esta actúa como reflector y sensor al mismo tiempo. El principio de funcionamiento se basa en la variación del periodo de la rejilla y del índice de refracción efectivo, lo que ocasiona un corrimiento en la longitud de onda reflejada. Esta característica convierte a las FBG en sensores ópticos de alta precisión, capaces de detectar cambios de temperatura y tensión con gran exactitud. Entre sus ventajas se encuentran la **inmunidad a interferencias electromagnéticas, resistencia a radiaciones y facilidad de integración en redes ópticas**, lo que representa un avance frente a tecnologías tradicionales, [Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014; Maini, 2013].

Además, al combinar esta tecnología con los láseres Raman de fibra óptica, se puede obtener una fuente de luz más estable y ajustable, lo que mejora la precisión de la medición. Los láseres Raman, basados en un fenómeno conocido como esparcimiento Raman estimulado, interactúan con las moléculas de la fibra para amplificar señales luminosas específicas [Feng, 2017; Yin, Ruffin & Yu, 2008]. Esta interacción genera lo que se conoce como señal Stokes, que se puede aprovechar en conjunto con la FBG para detectar cambios de temperatura de forma remota y segura [Feng, 2017; Maini, 2013; Kashyap, 2009].

A diferencia de los sistemas convencionales que utilizan rejillas de Bragg que operan a longitudes de onda de 1550 nm, en este trabajo se explora una nueva alternativa a 1119 nm, lo que no solo amplía las posibilidades de aplicación, sino que también mejora la estabilidad y sensibilidad de los sensores ópticos [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021]. Gracias a su diseño compacto, resistencia a vibraciones y alta precisión, estos sistemas prometen revolucionar la forma en que se mide la temperatura en sectores donde la exactitud es crucial.

El interés del estudio de los sensores ópticos es que tiene muchas ventajas en comparación con los sensores convencionales, como son los siguientes: Inmunidad a las interferencias electromagnéticas, no es muy pesado, tamaño pequeño, no conducen corriente, resistentes a radiaciones ionizantes, no necesitan recalibración, pueden colocarse en lugares remotos/inaccesibles, alta sensibilidad, gran ancho de banda, facilidad para ser utilizados dentro de las redes de comunicaciones ópticas, posibilidad de multiplexación [Yin, Ruffin & Yu, 2008; Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014].

Teoría

Las rejillas de Bragg en fibra óptica [FBG] son herramientas especialmente valiosas para el monitoreo de temperatura, debido a su alta sensibilidad. La temperatura influye directamente en el espaciado entre los períodos que conforman la FBG, alterando su estructura interna. Esta modificación en el período de la rejilla provoca un cambio proporcional en la longitud de onda de Bragg reflejada. [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021; Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014; Maini, 2013]. Esta relación directa entre la temperatura y la longitud de onda de Bragg es lo que permite utilizar las FBG como sensores de temperatura de alta precisión. La longitud de onda de la luz reflejada o longitud de onda de Bragg está dada por:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad [6]$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, Λ es el periodo de red de Bragg, n_{eff} es el índice de refracción efectiva.

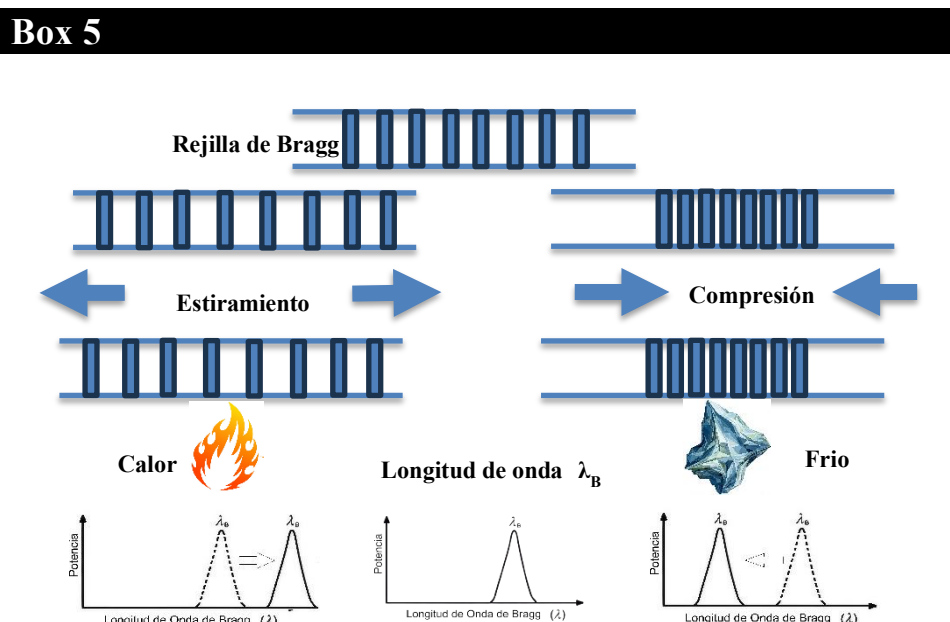


Figura 5
Longitud de Onda de Bragg

La respuesta al corrimiento en longitud de onda de Bragg debido a cambios de temperatura es llamada sensibilidad y está dada por:

$$S = \Delta\lambda_B / \Delta T \quad [7]$$

Donde $\Delta\lambda_B$ es la diferencia de longitud de onda de Bragg inducida por el aumento de temperatura y ΔT es el cambio de temperatura [Kashyap, 2009].

Por otra parte, el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg con la temperatura y la tensión viene dado por la expresión:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \{ [1 - \rho_e] \Delta\varepsilon + [\alpha_\Lambda + \alpha_n] \Delta T \} \quad [8]$$

donde: ρ_e : coeficiente de tensión, $\Delta\varepsilon$: incremento/disminución de tensión aplicada, α_Λ coeficiente de expansión térmica, α_n coeficiente de expansión termo-óptica, ΔT incremento/disminución de temperatura [Maini, 2013; Kashyap, 2009].

EL desplazamiento de la longitud de onda de Bragg frente a la temperatura se expresa:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \lambda_B [\alpha + \xi] \quad [9]$$

α = coeficiente de expansión térmica de la fibra

ξ = coeficiente termo-óptico de la sílice

Box 6

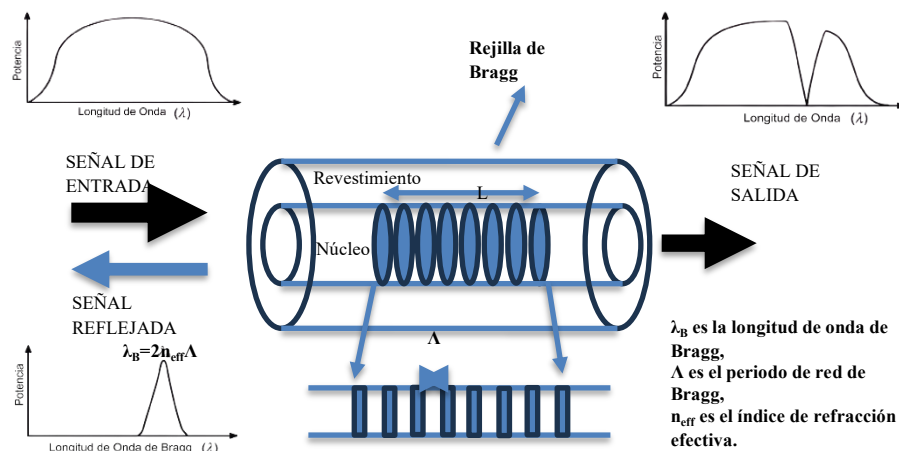


Figura 6

Rejilla de Bragg

El valor agregado de esta investigación se centra en la **optimización de un láser Raman de fibra óptica a 1119 nm**, acoplado con FBG, como alternativa a los sistemas que operan en la región de 1550 nm. Esta longitud de onda menos explorada ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de sensores ópticos más estables, compactos y sensibles.

La **hipótesis central** plantea que la combinación de fibras con diferentes longitudes y áreas efectivas —como MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km] y que influyen de manera determinante en la eficiencia Raman, en la generación del primer Stokes y en la precisión del sensado térmico.

Con este enfoque, el trabajo busca demostrar cómo la integración de láseres Raman y FBG puede consolidarse como una solución innovadora para el desarrollo de **sensores ópticos de temperatura**, contribuyendo a la generación de nuevo conocimiento y al fortalecimiento de las tecnologías fotónicas.

Metodología

En esta configuración se emplea como fuente de bombeo un láser de fibra dopado con iterbio [Yb], operando en modo continuo, modelo YLR-10-1064-LP de la empresa IPG Photonics. Este dispositivo proporciona una potencia máxima de salida de 10 W a una longitud de onda central de 1064 nm. Su emisión está linealmente polarizada en el modo fundamental TME00, con un ancho espectral de 0.5 nm. La señal del láser se introduce en el puerto 1 de un multiplexor por división de longitud de onda [WDM] el cual está diseñado para soportar hasta 5 W de potencia óptica a 1064 nm. A través del puerto 2 del WDM, se transmite aproximadamente el 42% de la potencia óptica a esa longitud de onda, mientras que alrededor del 15% se dirige por el puerto 3 y cerca del 4.6% por el puerto 4. El resto, aproximadamente un 38.4%, corresponde a pérdidas por inserción del dispositivo.

En el puerto 2 se empalmarán en [S3] conforme a los dos arreglos propuestos dos tipos de fibra con las siguientes características: un tramo de 4 km de fibra óptica del tipo Corning MetroCor, la cual presenta un área efectiva cercana a $40 \mu\text{m}^2$ y posteriormente se realizó un segundo arreglo empalmando 5 Km de fibra SMF28 con un área efectiva de $90 \mu\text{m}^2$ [medios de ganancia en el arreglo Raman] Tabla 1. Y como medios de operación [transmisión] en el puerto 4, S2 se empalmaron 4.7 km de fibra LEAF, que después se quitó y se sustituyó por 1 km de fibra 1060XP, ambas se empalmaron en S4, junto con una rejilla de Bragg de fibra óptica [FBG] con las siguientes características: longitud de onda central de 1119.768 nm, ancho a media altura [FWHM] de 0.120 nm, sin recubrimiento, reflectividad del 99%, sensibilidad tipo I y periodo uniforme. La FBG se alojó dentro de un horno para control preciso de la temperatura, proporcionando retroalimentación puntual; Las pérdidas por empalme en toda la configuración fueron del orden de 0.01 dB.

Box 7

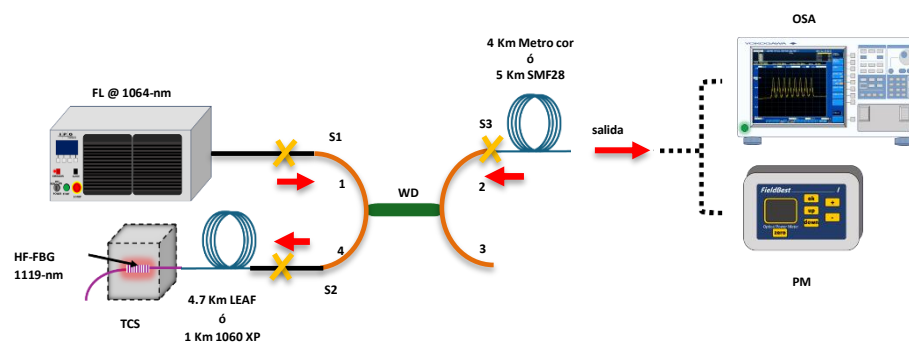


Figura 7

Diseño Experimental con las fibras Metrocor y SMF28 como medios de ganancia Raman y fibras LEAF y 1060XP como medio de operación [transmisión]

Box 8

Table 1

Descripción de los arreglos experimentales

Arreglo	Descripcion	Uso de la fibra optica
1	4 Km Metrocor -4.7 Km LEAF -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 4 Km de fibra Metrocor , Medio de Operación[transmision]: 4.7 Km de fibra LEAF
2	4 Km Metrocor -1 Km 1060XP -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 4 Km de fibra Metrocor , Medio de Operación[transmision]: 1 Km de fibra 1060XP
3	5 Km SMF 28 -4.7 Km LEAF - Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 5 Km de fibra SMF 28, Medio de Operación[transmision]: 4.7 Km de fibra LEAF]
4	5 Km SMF 28 -1 Km 1060 XP -Rejilla de Bragg 1119 nm	Medio de Ganancia: 5 Km de fibra SMF 28 , Medio de Operación[transmision]: 1 Km de fibra 1060 XP

Cuando se bombea una potencia de 4.3 W en el puerto 2 del WDM, tanto la fibra óptica Corning MetroCor de 4 km y la SMF 28 [en los dos arreglos] se inicia de forma inmediata, el proceso de dispersión Raman estimulada. En esta parte del experimento, se generan señales Stokes [esparcimiento Raman espontaneo y esparcimiento Raman estimulado], con una emisión centrada alrededor de los 1121 nm, en concordancia con lo reportado previamente [Coba-Ramos et al., 2025]

Simultáneamente, cerca del 4.6% de la potencia de bombeo se acopla por el puerto 4 y es guiada a través de los 4.7 km de fibra LEAF y en 1 Km de fibra 1060 XP [según el arreglo] hasta llegar a la FBG, que está diseñada para reflejar señales a 1119 nm. Adicionalmente, en el extremo de salida de la FBG ocurre una reflexión parcial [$\sim 4\%$] de la potencia de bombeo debido al efecto Fresnel en la interfaz aire-vidrio. Esta porción de luz reflejada atraviesa nuevamente la FBG, y recorre en sentido inverso los 4.7 km de fibra LEAF ó 1 Km de fibra 1060XP [según el arreglo] y regresa al puerto 2 del WDM, al tramo de 4 km de fibra MetroCor ó 5 Km de fibra SMF28 de acuerdo con el arreglo experimental.

Cabe mencionar que la señal reflejada, que coincide con las longitudes de onda de operación de la FBG, se combina con el bombeo que se propaga en sentido directo dentro del medio de ganancia Raman. Este proceso contribuye a estimular las transiciones de moléculas excitadas en los niveles virtuales del vidrio, generando fotones coherentes con las características de la FBG, lo que da lugar a la amplificación Raman o emisión Stokes.

Para el análisis espectral de la señal generada, se conectó un analizador de espectro óptico [OSA] al extremo de salida de la fibra MetroCor de 4 km ó a los 5 Km de fibra SMF28 [según sea el caso]. Asimismo, se empleó un medidor de potencia óptica [PM], insensible a la longitud de onda, con el fin de registrar la potencia entregada. Cabe destacar que se utilizó una cuña óptica para atenuar la potencia del láser antes de ingresar al OSA. No obstante, posibles imperfecciones en el recubrimiento de la cuña o variaciones en la dirección del haz láser pueden producir fluctuaciones en la potencia transmitida, lo cual se refleja en cambios observables durante el monitoreo de salida del sistema. La variación de temperatura en este sistema se lleva a cabo mediante un controlador digital REX-C100, el cual se programa para ejecutar los cambios térmicos dentro de un sistema herméticamente sellado, fabricado con concreto refractario TR44 Clase C, que garantiza la estabilidad térmica. El sistema cuenta con resistencias eléctricas capaces de alcanzar temperaturas desde ambiente hasta 700 °C.

Para la caracterización del láser Raman de fibra óptica, se empleó una rejilla de Bragg [FBG] como cavidad resonante, y se realizó un control térmico preciso sobre ella, aumentando y disminuyendo la temperatura desde 35 °C hasta 160 °C y viceversa, variando la temperatura cada 10°C. Durante este proceso, se garantizó que el sistema permaneciera libre de tensiones mecánicas o deformaciones que pudieran comprometer los resultados experimentales. En todas las configuraciones se llevó a cabo el mismo proceso para una evaluación precisa del desplazamiento de la longitud de onda de Bragg, en función de la temperatura aplicada a la FBG.

Box 9

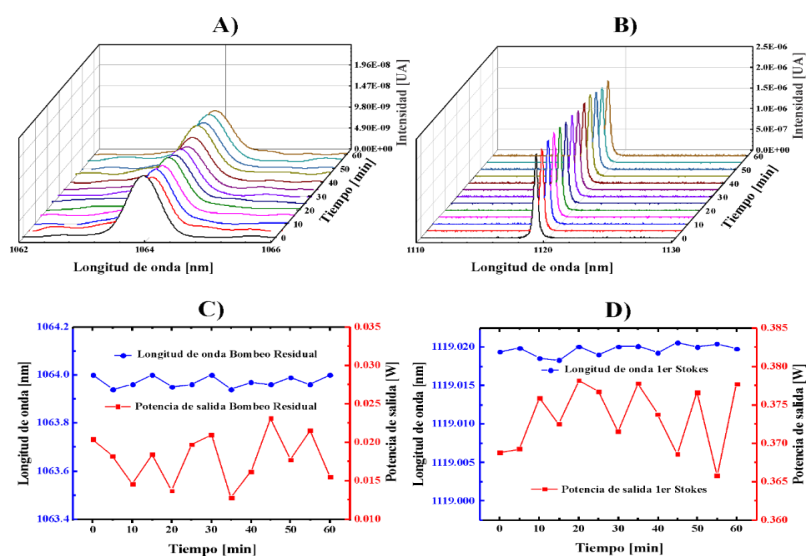


Figura 8

Estabilidad de la emisión láser registrada a temperatura ambiente durante un intervalo de 60 minutos. A) Evolución temporal de la potencia residual. B) Evolución temporal del primer Stokes. C) Variación conjunta de la potencia de salida y de la longitud de onda correspondientes a la potencia residual. D) Variación conjunta de la potencia de salida y de la longitud de onda asociadas al primer Stokes. Todas las mediciones fueron realizadas bajo una potencia de bombeo de 4.3 W.

Con el propósito de verificar la estabilidad de la configuración experimental, se realizaron mediciones de la potencia y la longitud de onda cada 5 minutos durante un periodo total de 60 minutos, empleando una potencia de bombeo de 4.3 W y manteniendo constante la temperatura ambiente. Posteriormente, los resultados fueron analizados para identificar las variaciones tanto en potencia como en longitud de onda. Las Figuras 8, A] y B] muestran los espectros de salida registrados bajo estas condiciones experimentales.

La exposición del sistema a una potencia de bombeo de 4.3 W dio lugar a la aparición de dos componentes espectrales claramente diferenciadas: un pico de bombeo residual de baja intensidad [A] y un pico asociado al primer Stokes generado por el proceso SRS [B].

El análisis de los datos obtenidos evidencia una elevada estabilidad en la potencia de salida. Se detectaron fluctuaciones de aproximadamente 0.01 W en el bombeo residual y de 0.015 W en el primer Stokes. Dichas variaciones, consideradas mínimas, confirman una excelente estabilidad en la conversión de potencia y en la generación del primer Stokes. En cuanto a la longitud de onda, los resultados a temperatura ambiente mostraron ligeras variaciones tanto en el bombeo residual como en el primer Stokes. Esta estabilidad, tanto en potencia como en longitud de onda, se encuentra ilustrada en las Figuras C y D.

Resultados

El análisis experimental de los cuatro arreglos propuestos permitió evaluar cómo influye el tipo de fibra conforme a su longitud y su área efectiva sobre la sensibilidad térmica y la histéresis del sistema basado en un sensor térmico con FBG a 1119 nm.

Box 10

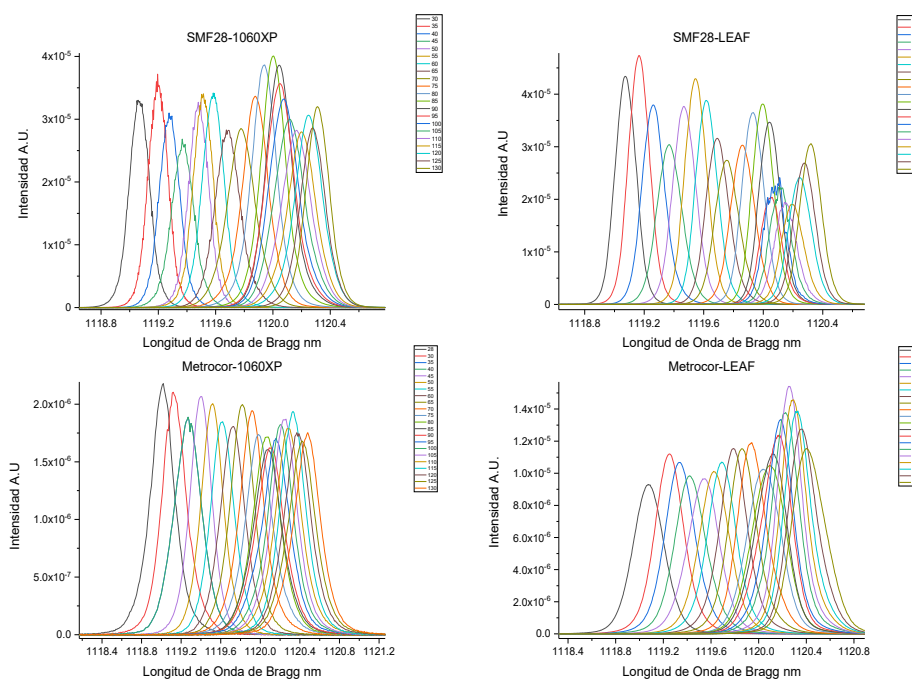


Figura 9

Desplazamiento de longitud de onda de Bragg en los arreglos

En la Figura 9 se muestra el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg en función de la temperatura para cada configuración. Los resultados evidencian un comportamiento lineal en todos los casos, confirmando la capacidad del sistema para detectar variaciones de temperatura con alta precisión. Las sensibilidades obtenidas oscilaron entre 12.7 y 14.32 pm/°C, siendo el arreglo MetroCor–1060XP el que presentó la mayor sensibilidad.

Box 11

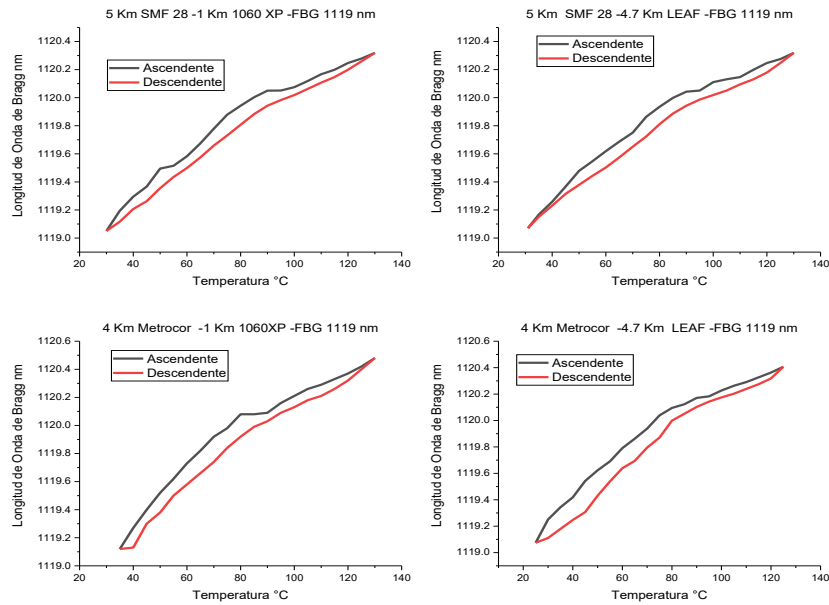


Figura 10

Comportamiento de la histéresis en los 4 arreglos

La Figura 10 presenta el comportamiento de la histéresis en los cuatro arreglos, donde se observa que los valores se mantuvieron reducidos en un rango de 0.14 a 0.23 nm, lo cual demuestra la estabilidad espectral del sistema frente a ciclos de calentamiento y enfriamiento. Esta baja histéresis garantiza la reproducibilidad del sensor y su potencial uso en aplicaciones que demandan exactitud.

Box 12

Tabla 2

Descripción de los resultados obtenidos por arreglo

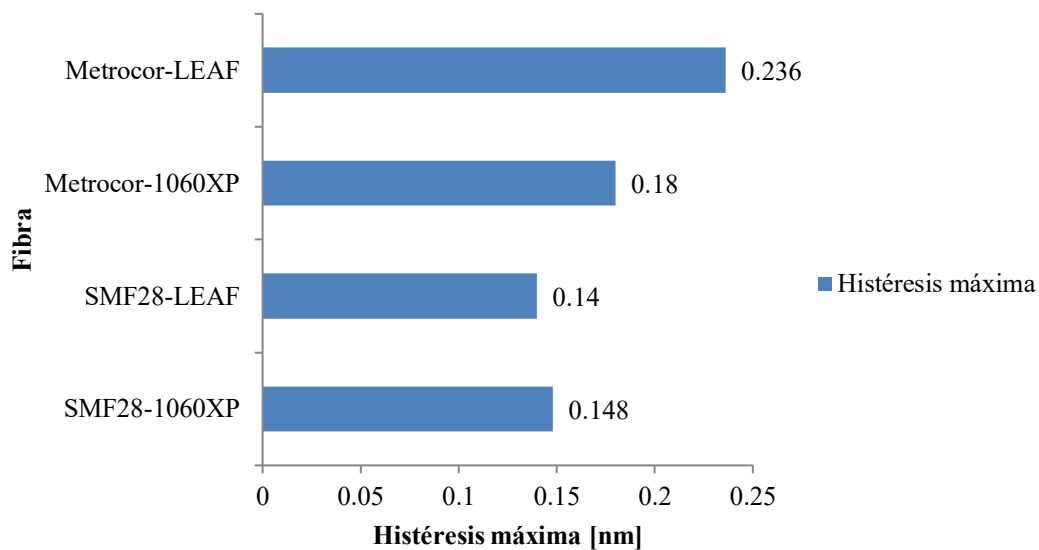
Arreglo	1	2	3	4
Fibra optica utilizada como medio amplificador	4 KM FIBRA METROCOR	4 KM FIBRA METROCOR	5 KM DE FIBRA SMF28	5 KM DE FIBRA SMF28
Fibra optica utilizada para operación	4.7 KM DE FIBRA LEAF	1 KM DE FIBRA 1060XP	4.7 KM DE FIBRA LEAF	1 KM DE FIBRA 1060XP
Area efectiva de la fibra optica	70 μm^2	30 μm^2	70 μm^2	30 μm^2
Variacion de temperatura de la rejilla de BRAGG 1119 nm	30 A 130 °C	30 A 130 °C	30 A 130 °C	30 A 130 °C
Sensibilidad de la rejilla en el arreglo experimental	13.9 pm/ °C	14.32 pm/ °C	13.5 pm/ °C	12.7 pm/ °C
Potencia de salida	0.5 W	0.5 W	0.5 W	0.5 W

La Tabla 2 resume los parámetros de operación y resultados experimentales de cada configuración. Se destaca que, a pesar de las diferencias en área efectiva de las fibras, la potencia de salida registrada fue de aproximadamente 0.5 W en todos los casos, asegurando un desempeño estable del láser Raman bajo una potencia de bombeo de 4.3 W.

Box 13**Tabla 3**

Comparación de histéresis de los 4 arreglos

Fibra	Intervalo [°C]	H_max [nm]	H_max [pm]
SMF28-1060XP	75	0.148	148
SMF28-LEAF	75	0.14	140
Metrocor-1060XP	70	0.18	180

Box 14**Figura 11**

Comparación de Histéresis entre arreglos

Por su parte, la Tabla 3 y la Figura 11 comparan los valores máximos de histéresis. Se observa que el arreglo MetroCor–LEAF presentó el mayor valor [0.236 nm], mientras que la combinación SMF28–LEAF registró el menor [0.14 nm]. Esto evidencia que la elección de las fibras no solo influye en la sensibilidad, sino también en la estabilidad térmica del sistema.

Con estos resultados podemos decir que la integración de fibras con diferentes áreas efectivas y longitudes de propagación permite optimizar tanto la eficiencia Raman como la precisión del sensado.

Conclusiones

El presente trabajo demuestra que la integración de láseres Raman de fibra óptica con rejillas de Bragg [FBG] a 1119 nm constituye una alternativa robusta, precisa y altamente competitiva frente a los sensores ópticos convencionales a 1550 nm. El análisis comparativo entre las configuraciones experimentales — MetroCor [4 km], SMF28 [5 km], LEAF [4.7 km] y 1060XP [1 km]— evidencia que la selección del medio de ganancia y del medio de operación impacta de manera determinante en la eficiencia Raman, en la generación del primer Stokes y en la sensibilidad térmica del sistema.

Los resultados experimentales, con sensibilidades entre 12.7 y 14.32 pm/°C y una histéresis reducida de 0.14–0.23 nm, validan la estabilidad espectral y la confiabilidad del sensor bajo ciclos repetitivos de calentamiento y enfriamiento. Dicho comportamiento confirma no solo la reproducibilidad del sistema, sino también su potencial para aplicaciones que demandan alta exactitud en la medición de temperatura.

La comparación con desarrollos recientes en sensado térmico óptico [Tabla 4] revela que el diseño propuesto se ubica dentro de los estándares más avanzados, con el valor añadido de operar en una longitud de onda menos explorada, lo cual abre nuevas oportunidades para la investigación y la innovación fotónica. Así, esta propuesta se consolida como una contribución relevante a la generación de conocimiento científico y tecnológico en el campo de los sensores de fibra óptica, con proyección hacia aplicaciones en entornos industriales, biomédicos y de monitoreo remoto.

En síntesis, la investigación no solo aporta evidencia experimental sólida sobre el desempeño de las FBG a 1119 nm, sino que también sienta bases para el desarrollo de sistemas compactos, económicos y de alta precisión

Box 15

Tabla 4

Revisión comparativa de los últimos avances en sensores de temperatura basados en mecanismos de Esparcimiento Raman

Sensor	Sensibilidad [pm/°C] / Rango de Temperatura [°C]	Longitud de Onda de Operación [μm]	Referencia
FBG	13.38/22–500	1.5	[Mandal et al., 2005]
FBG	9.7/25–70	1.5	[Díaz & López-Amo, 2016]
Interferómetro Todo de Fibra	10/30–80	1.5	[Fukano & Ooshima, 2024]
LPFG [Rejilla de Fibra de Período Largo]	8.61/35–60	1.5	[Li et al., 2024]
FBG	11.9/20–150	1.5	[Tung et al., 2024]
FBG	15.07/35–160	1.1	[Coba-Ramos et al., 2025]
Metrocor-LEAF	13.9/35–160	1.1	Este trabajo
Metrocor-1060XP	14.32/35–160	1.1	Este trabajo
SMF28-LEAF	13.5/35–160	1.1	Este trabajo
SMF28-1060XP	12.7/35–160	1.1	Este trabajo

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Coba-Ramos Jesus Alberto: Escribió la versión preliminar del manuscrito

De la Cruz- May Lelio: Contribuyó a la idea del proyecto, al método y a la técnica de investigación.

Benavides, Olena: Revisó cuidadosamente y editó la versión final siguiendo el formato y las directrices.

Meza-Cruz, Onésimo: Completó los formularios requeridos para enviar el artículo

Disponibilidad de datos y materiales

Indique la disponibilidad de los datos obtenidos en esta investigación.

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Agradecimientos

Jesús Alberto Coba Ramos agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías [CONAHCYT] por el apoyo otorgado para la realización de sus estudios de doctorado. Asimismo, los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la UNACAR por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

Abreviaturas

FBG	Rejilla de Bragg en Fibra [Fiber Bragg Grating]
TEM	Modo Transversal Eléctrico [Transverse Electric Mode]
WDM	Multiplexor por División en Longitud de Onda [Wavelength Division Multiplexer]
SRS	Esparcimiento Raman Estimulado [Stimulated Raman Scattering]
OSA	Analizador de Espectro Óptico [Optical Spectrum Analyzer]
PM	Medidor de Potencia [Power Meter]
FWHM	Ancho Completo a Media Altura [Full Width at Half Maximum]
TCS	Sistema de Control de Temperatura [Temperature Control System]

Referencias

Antecedentes.

- [Feng, 2017] Feng, Y. [Ed.]. [2017]. *Raman Fiber Lasers*. Springer Series in Optical Sciences, Vol. 207. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-65276-4.
- [Agrawal, 2013] Agrawal, G. P. [2013]. *Nonlinear Fiber Optics [5th ed.]*. Academic Press. ISBN: 978-0-12-397023-7, pp. 295–303.
- [Islam, 2002] Islam, M. N. [Ed.]. [2002]. *Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles*. Springer.
- [De la Cruz-May et al., 2023] De la Cruz-May, L., Mejia-Beltran, E., Benavides, O., Flores-Gil, A., Pages-Pacheco, A. Y., & Alvarez-Chavez, J. A. [2023]. *Maximum pump power coupled in Raman resonator for maximum power delivered at 1115 and 1175 nm*. *Photonics*, 10[5], 531. MDPI.
- [Islam, 2004] Islam, M. N. [Ed.]. [2004]. *Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-Systems and Systems*. Springer.
- [Agrawal, 2010] Agrawal, G. P. [2010]. *Fiber-Optic Communication Systems [4th ed.]*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [Pages-Pacheco et al., 2023] Pages-Pacheco, A. Y., De la Cruz-May, L., Mejía-Beltrán, E., & Flores-Gil, A. [2023]. *Modelización de un láser Raman de fibra óptica en cascada*. *Engineering and Applied Sciences. Handbooks-TI-©ECORFAN-México*, Ciudad de México, 6[9], 18–34.
- [Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. *Fiber Optic Sensors [2nd ed.]*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4
- [Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. *Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement*. *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings](#) [2nd ed.]. Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

Básicos

[Feng, 2017] Feng, Y. [Ed.]. [2017]. [Raman Fiber Lasers](#). Springer Series in Optical Sciences, Vol. 207. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-65276-4.

[Agrawal, 2013] Agrawal, G. P. [2013]. [Nonlinear Fiber Optics](#) [5th ed.]. Academic Press. ISBN: 978-0-12-397023-7, pp. 295–303.

[Islam, 2002] Islam, M. N. [Ed.]. [2002]. [Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles](#). Springer.

[De la Cruz-May et al., 2023] De la Cruz-May, L., Mejia-Beltran, E., Benavides, O., Flores-Gil, A., Pages-Pacheco, A. Y., & Alvarez-Chavez, J. A. [2023]. [Maximum pump power coupled in Raman resonator for maximum power delivered at 1115 and 1175 nm](#). *Photonics*, 10[5], 531. MDPI.

[Islam, 2004] Islam, M. N. [Ed.]. [2004]. [Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-Systems and Systems](#). Springer.

[Agrawal, 2010] Agrawal, G. P. [2010]. [Fiber-Optic Communication Systems](#) [4th ed.]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[Pages-Pacheco et al., 2023] Pages-Pacheco, A. Y., De la Cruz-May, L., Mejía-Beltrán, E., & Flores-Gil, A. [2023]. [Modelización de un láser Raman de fibra óptica en cascada](#). *Engineering and Applied Sciences. Handbooks-TI-©ECORFAN-México*, Ciudad de México, 6[9], 18–34.

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. [Fiber Optic Sensors](#) [2nd ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings](#) [2nd ed.]. Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

Soporte

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. [Fiber Optic Sensors](#) [2nd ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings \[2nd ed.\]](#). Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augousti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.

[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.

[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.

Diferencias

[Yin, Ruffin & Yu, 2008] Yin, S., Ruffin, P. B., & Yu, F. T. S. [Eds.]. [2008]. *Fiber Optic Sensors [2nd ed.]*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5365-4

[Bhaskar, Pal & Pattnaik, 2021] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., & Pattnaik, P. K. [2021]. [Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement](#). *Results in Optics*, 5, 100130.

[Triana-Infante, Varón-Durán & Pastor-Abellán, 2014] Triana-Infante, C. A., Varón-Durán, M., & Pastor-Abellán, D. [2014]. [Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg \[FBGs\] para deformación y temperatura](#). *Iteckne*, 11[2], 172–182.

[Maini, 2013] Maini, A. K. [2013]. [Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications](#). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-118-45887-7.

[Kashyap, 2009] Kashyap, R. [2009]. [Fiber Bragg Gratings \[2nd ed.\]](#). Boston: Elsevier. ISBN: 978-0-12-372579-0.

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augusti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.

[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.

[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.

Discusiones

[Mandal et al., 2005] Mandal, J., Shen, Y., Pal, S., Sun, T., Grattan, K. T., & Augusti, A. T. [2005]. [Bragg grating tuned fiber laser system for measurement of wider range temperature and strain](#). *Optics Communications*, 244[1–6], 111–121.

[Díaz & López-Amo, 2016] Díaz, S., & López-Amo, M. [2016]. [Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements](#). *Optics & Laser Technology*, 78, 134–138.

[Fukano & Ooshima, 2024] Fukano, H., & Ooshima, K. [2024]. [Fabry–Perot interference temperature sensor integrated high-power-laser optical fiber probe for laser ablation](#). *Japanese Journal of Applied Physics*, 63[5], 05SP01.

[Li et al., 2024] Li, H., Wang, W., Sun, H., Wu, H., Wang, X., Zheng, A., Liang, L., Lu, L., Zhu, J., Yu, Q., et al. [2024]. [Temperature-compensated high-sensitivity refractive index, liquid level and pH sensing realization enabled by a small-period microfiber long period grating cascaded with microfiber Bragg grating](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115402.





[Tung et al., 2024] Tung, H. J., Ibrahim, R. K. R., Azmi, A. I., Husein, N. A., Vargas-Rodriguez, E., Alresheedi, M. T., Ng, E. K., & Mahdi, M. A. [2024]. [Fiber laser tuning by means of nonthermal plasma as a temperature regulator](#). *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34297.





[Coba-Ramos et al., 2025] Coba-Ramos, J. A., de la Cruz-May, L., Pages-Pacheco, A. Y., Mejía-Beltrán, E., Jauregui-Vazquez, D., May-Alarcon, M., Sanchez-Lara, R., & Alvarez Chavez, J. A. [2025]. [Optimized dual-Stokes Raman laser for 1.1 \$\mu\text{m}\$ emission and temperature sensing](#). *Photonics*, 12[5], 470. MDPI.





Viabilidad energética y sustentabilidad ambiental de la energía solar en el sector agroalimentario: caso de rastros municipales




Energy viability and environmental sustainability of solar energy in the agri-food sector: the case of municipal slaughterhouses

Meza-Cruz, Onésimo * ^a, Sierra-Grajeda, Juan ^b, Pérez-Montejo, Salatiel ^c y Flores-Gil, Aarón ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LTD-0198-2024 •  0000-0002-0875-6852 •  488085

^b  Universidad Autónoma del Carmen, •  LSK-8588-2024 •  0000-0002-0565-6450 •  219284

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  LYO-9195-2024 •  0000-0002-1750-0154 •  594590

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  0000-0002-2302-2056 •  121166

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.19.26>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería energética

Subdisciplina: Energía solar

Key Handbooks

El aporte es que se demuestra la viabilidad técnica de la aplicación de sistemas termosolares en rastros municipales. Para el caso específico del presente trabajo es necesario tener bases teóricas y prácticas sobre la energía termosolar; se concluye que la implementación de sistemas termosolares en rastros municipales es viable técnica, económica y ambientalmente. Ningún autor tiene becas del SECIHTI, ni beca PRODEP. Se cuenta con 72 citas en el último año. Todos los autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son Rastro municipal, sistema termosolar.

Área: Incidencia y atención a los problemas nacionales.

Citación: Meza-Cruz, Onésimo, Sierra-Grajeda, Juan, Pérez-Montejo, Salatiel y Flores-Gil, Aarón. 2025. Viabilidad energética y sustentabilidad ambiental de la energía solar en el sector agroalimentario: caso de rastros municipales. 19-26. ECORFAN.

* ✉ [\[omeza@pampano.unacar.mx\]](mailto:omeza@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



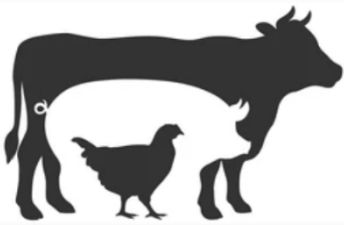

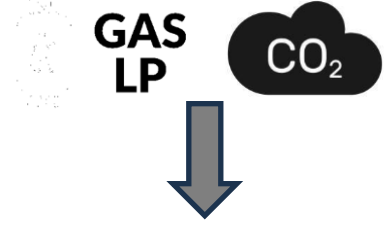
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee **MARVID**[®]- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

In Mexico, there are 859 municipal slaughterhouses that use hot water for the animal scalding process. Water heating is achieved by burning fossil fuels. Therefore, a proposal for solar water heating in municipal slaughterhouses is being made. The municipal slaughterhouse in Ciudad del Carmen, Campeche, is being considered as the study site. Of the total number of slaughterhouses nationwide, 20% are similar to the slaughterhouse under study. The proposed water heating system with flat-panel solar collectors achieves energy savings of up to 70%. It is also determined that approximately 1,872 tons of CO₂ would not be released into the atmosphere by implementing solar thermal systems in just 20% of all municipal slaughterhouses in Mexico.

Energy viability and environmental sustainability of solar energy in the agri-food sector: the case of municipal slaughterhouses		
Objetives	Methodology	Contribution
 <p>Propose solar thermal systems in municipal slaughterhouses</p>	 <p>Sizing of solar thermal system using the F-Chart method</p>	 <p>Saving fossil fuels at municipal slaughterhouses and reducing CO₂ emissions</p>

Municipal slaughterhouse, Solar thermal, Implementation

Resumen

En México existen 859 rastros municipales, estos utilizan agua caliente para el proceso de escaldado de animales. El calentamiento de agua es a través de quema de combustibles fósiles, por tal motivo se realiza una propuesta de calentamiento de agua con energía solar en rastros municipales, para ello se toma como lugar de estudio el rastro municipal de Cd del Carmen Campeche. Del total de rastros a nivel nacional, un 20% son similares al rastro en estudio. Con el sistema de calentamiento de agua con captadores solares planos propuesto se llega a obtener un ahorro energético de hasta un 70%, así también se determina que aproximadamente 1872 ton de CO₂ no irían a la atmosfera con tan solo implementar sistemas termosolares en el 20% del total de los rastros municipales en México.

Viabilidad energética y sustentabilidad ambiental de la energía solar en el sector agroalimentario: caso de rastros municipales		
Objetivos	Metodología	Contribución
 <p>Proponer sistemas termosolares en rastros municipales</p>	 <p>Dimensionamiento de sistema termosolar por el Método F-Chart</p>	 <p>Ahorro de combustible fósil en rastros municipales y disminuir emisión de CO₂</p>

Rastro municipal, Termosolar, Implementación

Introducción

La energía solar puede contribuir a alcanzar los objetivos planteados por México en materia de cambio climático con respecto al acuerdo de París de 2015 [Buirra, y otros, 2021]. Además, puede ser un factor clave para incrementar la competitividad del sector industrial al reemplazar o reducir el consumo de combustibles fósiles costosos. En el año 2023 el consumo de la energía total en México se distribuyó de la siguiente manera: transporte 44.6%, Industria 26.2%, vivienda 16.7 %, y el resto del porcentaje total en otros consumos [IEA, 2023].

Del 31% de la energía que se usa en la Industria, un 33% se requiere en forma de electricidad y el restante 67% en forma de calor [Payback, 2025]. En procesos agroindustriales, el agua y el aire caliente se emplean para la producción, tratamiento y/o manejo de bebidas y alimentos, entre otros usos. Así también se puede usar para la higiene o confort en los procesos de crianza, matanza y engorda de aves y ganado. Para el caso específico de matanza de animales para consumo humano, se utilizan rastros municipales. De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas [DENUE] en México se tienen 859 rastros municipales [INEGI, 2025], destacando el estado de Jalisco con 107 rastros municipales, tal como se puede ver en la Figura 1.

Box 1

Distribución de rastros municipales

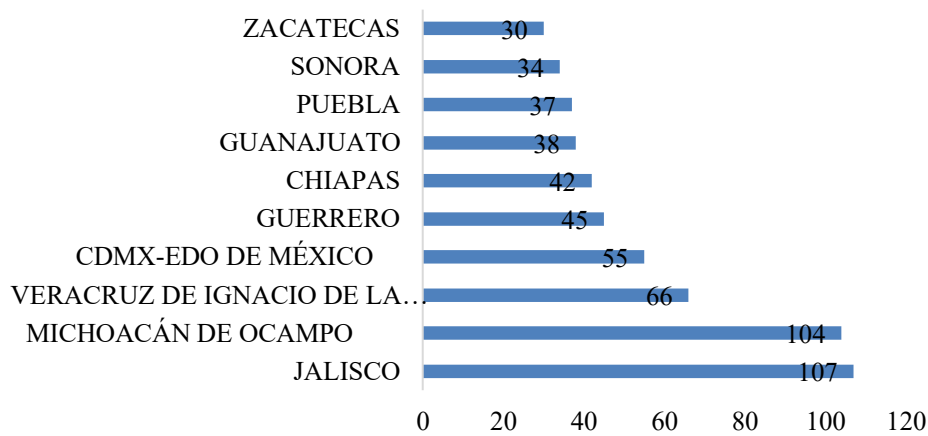


Figura 1

Estados de México con mayor número de rastros municipales

Elaboración propia con información de DENUE 2025.

El DENUE clasifica a los rastros municipales por el número de personas o trabajadores. Cabe señalar que el 56% de rastros municipales entran en la categoría de 0-5 personas laborando y que el 94% del total son rastros municipales con hasta 30 personas laborando, tal como se observa en la Figura 2.

Box 2

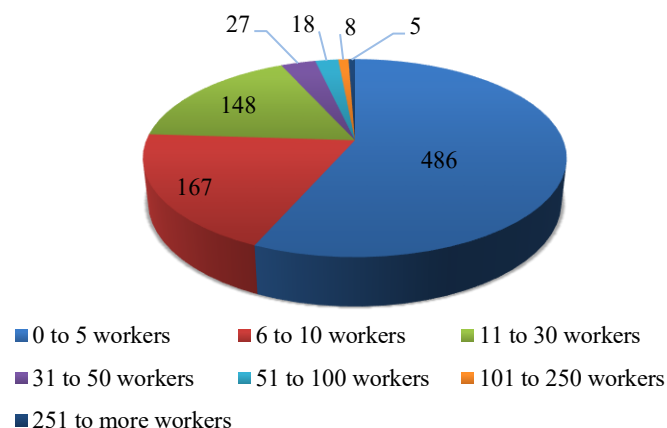


Figura 2

Clasificación de los rastros municipales por número de trabajadores.

Fuente: Elaboración propia con información de DENUE 2025.

Una de las actividades que se realizan en un rastro municipal el proceso de escaldado de cerdos y aves, siendo un procedimiento mediante el cual los animales sacrificados son introducidos en agua caliente con el fin de facilitar el depilado o el desplumado, según la especie de que se trate. Estos procesos necesitan temperaturas de calentamiento del agua en el orden de 40 a 70 °C por lo que tecnologías solares maduras tales como calentadores solares de placa plana o de tubos evacuados pueden ser utilizadas para el proceso de escaldado.

En Malasia presentan el primer caso de integración de energía solar térmica en la industria avícola [Ah Khaliludin, y otros, 2020], específicamente en la empresa PPNJ Poultry & Meat Sdn. Bhd., donde se emplea para el proceso de escaldado de pollos. Este proceso requiere mantener agua a temperaturas de 60–70 °C para facilitar la remoción de plumas, y tradicionalmente dependía de calderas eléctricas, obtienen una fracción solar del 88%. En Jordania realizan un estudio sobre uso de calor solar térmico [sistemas planos] para procesos de una planta avícola, obteniendo con energía solar térmica aproximadamente un 72% de la demanda requerida [Jaradat, Al-Manasreh, Juaidi, & Manzano-Agugliaro, 2024], también realizaron un análisis económico y la reducción de CO₂. En México el Fideicomiso de Riesgo

Compartido [FIRCO] ha instalado 110 sistemas solares térmicos en rastros tipo inspección federal [TIF] [Ortega, 2025]. Ejemplo de ello es la empresa Avicarnes, es uno de los rastros más grandes de América Latina en su tipo. Realiza un sacrificio de 9 000 aves por hora durante un turno [lo que sería un equivalente a 72 000 aves al día], con capacidad de procesar 3 millones de aves cada mes [100 000 aves al día], para ello utiliza un sistema de 40 captadores de 30 tubos evacuados y un termo tanque de 10,000 litros.

México se encuentra entre las latitudes 15° y 35 ° y tiene un recurso solar promedio 5.5 kWh/m² [Payback, 2025], por lo que estas condiciones energéticas son favorables para el aprovechamiento para el uso de calor solar en procesos agroindustriales tales como el escaldado de animales. Es por ello que en el presente trabajo se presenta la viabilidad técnica y ambiental del uso de la energía solar térmica para el escaldado de animales, tomando como lugar de estudio el rastro municipal de Ciudad del Carmen, Campeche, México.

Metodología

Para la viabilidad térmica y ambiental de la instalación de un sistema de calentamiento solar para el escaldado de animales, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Determinar la demanda diaria y mensual del consumo de agua caliente
2. Dimensionar el sistema térmico por el método F-Chart
3. Determinar la reducción de CO₂ por el uso de energía solar térmica.

1. Demanda de consumo de agua caliente en el rastro municipal

Las cargas caloríficas determinan la cantidad de calor necesaria mensual para calentar el agua destinada al consumo del rastro municipal, siendo un rastro catalogado de 6-10 trabajadores, calculándose mediante la ecuación [1]:

$$Q = m * N * C_p * \Delta T \quad [1]$$

donde:

Q: Energía calorífica [MJ/mes]

m: Masa del agua [kg]

N: días del mes

C_p: Calor específico del agua [J/kg * °C]

ΔT: Cambio de temperatura del agua [°C] [Temperatura de referencia-temperatura del agua de la red]

La estimación del consumo de agua [Q] es de gran relevancia a la hora del diseño de la instalación puesto que puede ocasionar un sobredimensionado de la instalación con los costes que esto conlleva. En este caso el volumen de agua se determinó realizando las mediciones correspondientes de caldera de agua del rastro municipal teniendo una capacidad de 1,753.8 litros.

2. Dimensionar el sistema térmico por el método F-Chart

Para el dimensionado de las instalaciones de energía solar térmica se sugiere el método de las curvas f [F-Chart], que permite realizar el cálculo de la cobertura de un sistema solar, es decir, de su contribución a la aportación de calor total necesario para cubrir las cargas térmicas. Es un método ampliamente aceptado como un proceso de cálculo suficientemente exacto para largas estimaciones, no ha de aplicarse para estimaciones de tipo semanal o diario.

Para desarrollarlo se utilizan datos mensuales medios meteorológicos, y es perfectamente válido para determinar el rendimiento o factor de cobertura solar en instalaciones de calentamiento, en todo tipo de edificios, mediante captadores solares planos. Su aplicación sistemática consiste en identificar las variables adimensionales del sistema de calentamiento solar y utilizar la simulación de funcionamiento mediante ordenador, para dimensionar las correlaciones entre estas variables y el rendimiento medio del sistema para un dilatado período de tiempo (Duffie & Beckman, 2013) (Rayón-Alcudia, Meza-Cruz, & Mandujano-Ramírez, 2024).

La ecuación [2] utilizada en este método se presenta a continuación

$$f = 1.029 X - 0.065 Y - 0.245 X^2 - 0.0018 Y^2 + 0.0215 X^3 \quad [2]$$

La secuencia que suele seguirse en el cálculo es la siguiente:

1. Valoración de las cargas caloríficas para el calentamiento de agua destinada a la producción de A.C.S. o calefacción
2. Valoración de la radiación solar incidente en la superficie inclinada del captador o captadores.
3. Eficiencia del captador
4. Cálculo del parámetro X
5. Cálculo del parámetro Y
6. Determinación de la gráfica f
7. Valoración de la cobertura solar mensual

3. Determinar la reducción de CO2 por el uso de energía solar térmica en rastro municipal

Una vez que se ha calculado la energía anual entregada por el sistema termosolar, se debe calcular el combustible equivalente que se requeriría para poder cubrir esta energía entregada por el sistema solar, para lo cual se requiere utilizar la ecuación [3]:

$$Combustible_{eq} = \frac{Q_{solar}}{\eta_{respaldo} C_p Combustible} \quad [3]$$

Donde $\eta_{respaldo}$ es la eficiencia en las condiciones de uso del sistema de respaldo convencional que se utiliza [este sistema, puede ser una caldera, una bomba de calor, etc., normalmente tiene una placa donde especifica su eficiencia instantánea a nivel del mar] y $C_p Combustible$ es el poder calorífico del combustible utilizado en este sistema de respaldo [gas LP, gas natural, diésel, electricidad, etc.], para este estudio se utilizó el del gas LP [47.92 MJ/Kg].

Una vez obtenida la cantidad de combustible equivalente anual requerido para aportar la energía dada por el sistema solar, se puede calcular las emisiones equivalentes de CO2 evitadas a la atmosfera de la siguiente manera:

$$CO_2 = Combustible_{eq} \times F_{combustible-CO_2} \quad [4]$$

Donde $F_{combustible-CO_2}$ es una constante que representa la cantidad de CO2 emitida a la atmosfera por cada unidad de combustible utilizado [factor de emisión], para este estudio se utilizó el valor de 3.0 kgCO2/kg de gas LP.

Resultados

La demanda térmica que requiere el rastro municipal en estudio fue de 100185.984 MJ/año, esta es la energía requerida para elevar la temperatura del agua de temperatura ambiente (Sea Temperature, s.f.) a la temperatura de referencia que para nuestro estudio se fijó en 65°C. Los meses con mayor demanda energética son los meses de diciembre y enero tal como se muestra en la Tabla 1.

Box 3

Tabla 1

Demanda térmica Q			
Mes	ΔT [°C]	N [días/mes]	Q [MJ/mes]
Enero	40.59	31	9239.82
Febrero	39.99	28	8222.28
Marzo	38.89	31	8852.84
Abril	37.29	30	8214.79
Mayo	35.99	31	8192.69
Junio	35.55	30	7831.48
Julio	35.89	31	8169.92
Agosto	35.49	31	8078.87
Septiembre	35.19	30	7752.17
Octubre	36.09	31	8215.45
Noviembre	37.99	30	8369.00
Diciembre	39.69	31	9034.95

Fuente: elaboración propia.

Para la propuesta de instalación se elige conformar el sistema de calentamiento solar de agua con colectores solares planos, ya que es una tecnología madura y de fácil acceso en el mercado mexicano, considerando un sistema de respaldo funcionando con gas LP. El modelo elegido es de la marca comercial Modulo Solar modelo MS 2.5 UE, que tiene una eficiencia del 77%, coeficiente de pérdida de calor $K1 = 3.596 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y una apertura bruta de 2.51 m^2 . Se realiza la simulación con datos meteorológicos de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche y se determina que se deben instalar 12 captadores solares térmicos, obteniendo 71630.208 MJ de energía útil anual o energía solar térmica disponible [Qu], así como una fracción solar anual [f] de 0.7149, la energía suministrada por gas es la diferencia entre Q y Qu tal como se muestra en la Tabla 2.

Box 4

Tabla 2

Resultados de energía con la propuesta de 12 captadores solares planos				
Mes	Q [MJ/mes]	Qu [MJ/mes]	Energía con gas LP	f
Enero	9239.904	4157.964	5081.94	0.45000078
Febrero	8222.364	6660.108	1562.256	0.80999917
Marzo	8853.012	7525.044	1327.968	0.84999817
Abril	8215.02	6818.472	1396.548	0.83000066
Mayo	8193.024	5325.48	2867.544	0.65000176
Junio	7840.62	4390.74	3449.88	0.55999908
Julio	8170.236	6045.984	2124.252	0.74000115
Agosto	8079.228	6948.144	1131.084	0.86000098
Septiembre	7752.528	6202.008	1550.52	0.79999814
Octubre	8215.776	5915.376	2300.4	0.72000021
Noviembre	8369.208	5858.46	2510.748	0.70000172
Diciembre	9035.064	5782.428	3252.636	0.63999857

Fuente: elaboración propia

Con el resultado de la energía útil anual Q_u , se determinó la cantidad de CO_2 equivalente [kg] considerando tres casos de la eficiencia del sistema de calentamiento por gas LP, por lo que se puede apreciar en la Tabla 3, que si el sistema de respaldo tiene una eficiencia alta las emisiones son menores.

Con estos valores y considerando que el rastro municipal en estudio está clasificado de 6-10 trabajadores, y sabiendo que en el país existen 167 rastros similares [Figura 2], se puede llegar a un estimado de 11890614.53 MJ/año y considerando que este número de rastros municipales representa solo el 19.55%; para el caso de las emisiones se considerando la eficiencia más baja en el sistema de respaldo [40%] se tendría 1872 ton de CO_2 que no irían a la atmósfera.

Haciendo una comparación con la referencia [Jaradat, Al-Manasreh, Juaidi, & Manzano-Agugliaro, 2024], ellos evitaron 885,252 kg CO_2 /año para una cantidad de calor útil anual de 6935025.6 MJ/año, esto tiene una relación cercana entre Q_u y CO_2 evitados entre los dos casos comparados.

Box 5

Tabla 3

Emisiones de CO_2 evitadas

Eficiencia del respaldo	Combustible equivalente [kg]	CO_2 equivalente [kg]
0.4	3737.7	11213.1
0.6	2491.8	7475.4
0.8	1868.9	5606.7

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Se concluye que con la fracción solar del 71% del sistema propuesto, representa una disminución en el gas LP y eso en el consecuente ahorro económico, así también se puede observar la cantidad de CO_2 que se evitaría con el sistema termosolar propuesto. Cabe señalar que solo se realizó una prospectiva básica sobre casi el 20% de los rastros municipales. Con los resultados obtenidos es evidente que este tipo de sistemas termosolares aplicados a rastros municipales es factible técnica, económica y ambiental en México.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Meza-Cruz, Onésimo: Contribuyó en la idea del proyecto, y asesoró en la parte fototérmica.

Sierra-Grajeda, Juan: Contribuyó en los cálculos térmicos y ambientales.

Pérez-Montejo, Salatiel: Contribuyó en el diseño de la propuesta del sistema termosolar.

Flores-Gil, Aarón: Revisión y análisis de los cálculos solares.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles a solicitud en el correo: omeza@pampano.unacar.mx

Agradecimientos

Al rastro municipal de Cda del Carmen Campeche, así como al Secretario general de Matarifes: Primo Salazar Góngora. A la Universidad Autónoma del Carmen por facilitar los datos meteorológicos a través del proyecto LENERSE

Abreviaturas

eq equivalente
u útil

Referencias

Antecedentes

Buira, D., Tovilla, J., Farbes, J., Jones, R., Haley, B., & Gastelum, D. [2021]. [A whole-economy Deep Decarbonization Pathway for Mexico](#). *Energy Strategy Reviews*, 16.

Ortega, E. [15 de 09 de 2025]. [GIZ: Energía solar térmica para procesos industriales en México](#).

Payback, S. [18 de 09 de 2025]. [Calor solar para Industria México](#).

Básicos

IEA. [10 de 08 de 2023]. [The International Energy Agency](#).

INEGI. [10 de 08 de 2025]. [Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas](#).

Sea Temperature. [s.f.]. [SEA TEMPERATURE INFO](#). Recuperado el 24 de 07 de 2023.

Soporte

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. [2013]. [Solar engineering of thermal processes](#). EU: John Wiley and Sons.

Rayón-Alcudia, C., Meza-Cruz, O., & Mandujano-Ramírez, H. [2024]. [Implementation of solar thermal and photovoltaic energy for the production process of corn tortillas](#). En S. Figueroa-Ramírez, J. Flores-Chan, C. Patiño-Carachure, & M. Abatal, *Handbook T-I Innovative Applications in Sustainable Energy and Environment* [pág. 116]. México: ECORFAN.

Diferencias

Ah Khaliludin, N., Hasim, N., Hashim, H., Ab Muis, Z., Yunus, N., & Ismail, M. [2020]. [A Framework of Solar Thermal Performance Study for Poultry Industry](#). *Chemical Engineering Transactions*, 78, 589–594.





Discusiones





Jaradat, M., Al-Manasreh, M., Juaidi, A., & Manzano-Agugliaro, F. [2024]. [Renewable process heat from solar thermal: Poultry slaughterhouse processes](#). *Results in Engineering*, 21.





Caracterización microestructural y electroquímica de la aleación Al-Cu 25 % peso en agua de mar sintética

Microstructural and electrochemical characterization of the 25% weight Al-Cu alloy in synthetic seawater

Flores-Chan, José Enrique ^{* a}, Calan-Canche, José Damián ^b, Martínez-Vargas, Sergio ^c y Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LXW-4586-2024 •  0000-0003-4714-686X •  175430

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  U-3760-2018 •  0000-0001-6688-4468 •  415663

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  AGW-0814-2022 •  0000-0002-2499-3970 •  10782

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  AIB-1429-2022 •  0000-0003-1368-1741 •  164797

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.27.35>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería química

Subdisciplina: Ciencia de los materiales

Key Handbooks

La aleación Al-Cu25%, un metal utilizado en diversas aplicaciones de ingeniería, es un material cuyas propiedades mecánicas se ven significativamente influenciadas por su microestructura. Los tratamientos térmicos son un método crucial para modificar esta microestructura, mejorando así el rendimiento de la aleación. El objetivo de estos tratamientos es controlar la formación de las diferentes fases y su disposición, lo que influye directamente en la resistencia, dureza y ductilidad de la aleación. Tratamientos térmicos como el temple, el envejecimiento o el recocido se utilizan para manipular la estructura interna de la aleación. En el caso del Al-Cu25%, la microestructura en estado bruto de fundición o de fabricación suele constar de una fase primaria rica en aluminio [α] y un compuesto intermetálico rico en cobre, a menudo denominado fase θ [CuAl_2]. Sin embargo, esta disposición puede no ofrecer propiedades mecánicas óptimas. Al someter la aleación a un tratamiento térmico en solución seguido de un proceso de temple, se puede formar una solución sólida sobresaturada. Este paso es crucial, ya que disuelve los átomos de cobre en la matriz de aluminio. Posteriormente, se realiza un proceso de envejecimiento [natural o artificial]. Este tratamiento provoca la precipitación de la fase θ fina dentro de la matriz de aluminio. El tamaño, la forma y la distribución de estos precipitados son cruciales. Una dispersión uniforme de los precipitados finos impide eficazmente el movimiento de las dislocaciones, que son defectos en la estructura cristalina, reforzando así la aleación. La microestructura final consiste en la matriz de aluminio con precipitados finamente dispersos, lo que proporciona propiedades mecánicas superiores en comparación con la aleación sin tratar. Por lo tanto, comprender y controlar el proceso de tratamiento térmico es esencial para adaptar el comportamiento mecánico de la aleación Al-Cu25% a aplicaciones específicas. El coautor Calan-Canche cuenta con una beca CONAHCYT, y los demás autores tienen un perfil PRODEP deseable y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Todos los autores son de la Universidad Autónoma del Carmen [una institución pública estatal].

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Flores-Chan, José Enrique, Calan-Canche, José Damián, Martínez-Vargas, Sergio y Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín. 2025. Caracterización microestructural y electroquímica de la aleación Al-Cu 25 % peso en agua de mar sintética. 27-35. ECORFAN.

* ✉ [\[jeflores@pampano.unacar.mx\]](mailto:jeflores@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



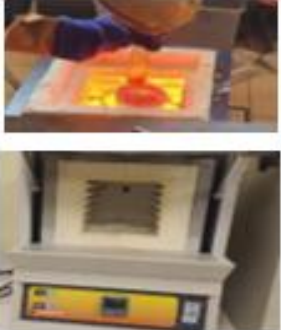
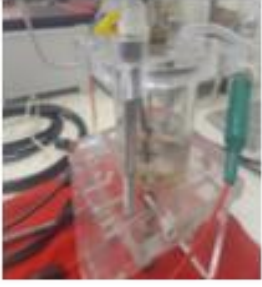
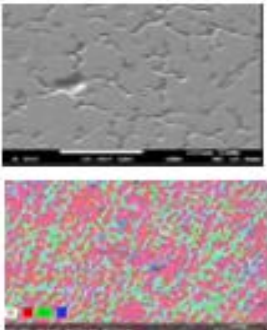
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract


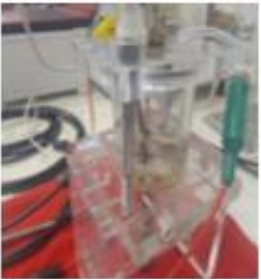
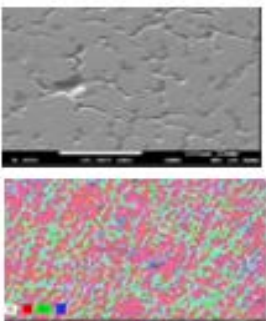
The Al-Cu25% alloy by weight was characterized, with and without heat treatment. The aim was to determine microstructural changes, phases present, and the influence of heat treatment on the alloy. To achieve this, two characterization techniques were used: optical microscopy and X-ray diffraction. The analysis of these techniques provides a comprehensive view of the influence of heat treatment on the Al-Cu25% alloy by weight. This is important for understanding how heat treatment affects the Al-Cu25% alloy by weight, evaluating its mechanical properties, and detecting possible defects or impurities. The results indicated that the Al-Cu25% by weight alloy can be used in hydrogen production processes, which could contribute to the advancement of technologies in the production of clean and sustainable energy. The knowledge gained through the characterization of the microstructure and the phases present is crucial for optimizing its performance in hydrogen production applications and could have a significant impact on the transition to cleaner energy sources.

Objective	Methodology	Contribution
<p>Aluminum and copper casting, muffle furnace for heat treatment</p> 	<p>Electrochemical cell; reference electrodes, counter electrodes, and working electrodes</p> 	<p>Microstructure Al-Cu 25% by weight, corrosion-free and heat treated at 530 °C</p> 

Heat treatment, hydrogen, microstructural changes

Resumen

Se caracterizó la aleación Al-Cu25% en peso, con y sin tratamiento térmico. Para determinar cambios microestructurales, fases presentes y la influencia del tratamiento térmico en la aleación. Para lograrlo, se utilizaron dos técnicas de caracterización: la microscopía óptica y la difracción de rayos X. El análisis de estas técnicas ofrece una visión completa de la influencia del tratamiento térmico en aleación Al-Cu25% peso. Esto es importante para comprender cómo el tratamiento térmico afecta a la aleación Al-Cu25% peso, evaluar sus propiedades mecánicas y detectar posibles defectos o impurezas. Los resultados indicaron que la aleación Al-Cu25% en peso, pueden ser utilizadas en procesos de producción de hidrógeno, lo que podría contribuir al avance de tecnologías en la producción de energía limpia y sostenible. El conocimiento obtenido a través de la caracterización de la microestructura y las fases presentes, es crucial para optimizar su rendimiento en aplicaciones de producción de hidrógeno y podría tener un impacto significativo en la transición hacia fuentes de energía más limpias.

Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Fundición de Al y Cu, mufla para tratamiento térmico</p> 	<p>Celda electroquímica; electrodos de referencia, contraelectrodos y electrodos de trabajo</p> 	<p>Microestructura Al-Cu 25% en peso, sin corrosión y tratado térmicamente a 530 °C</p> 

Tratamiento térmico, hidrógeno, cambios microestructurales

Introducción

En la búsqueda actual de alternativas energéticas sostenibles y limpias, la producción de hidrógeno mediante procesos electroquímicos se ha convertido en una solución prometedora. En este sentido, las aleaciones metálicas desempeñan un papel crucial debido a su potencial como materiales base en electrodos y componentes de celdas electroquímicas. Entre estas aleaciones, las que contienen aluminio [Al] y cobre [Cu] destacan por sus propiedades intrínsecas, como la resistencia mecánica, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión, entre otras, que pueden modificarse mediante tratamientos térmicos para optimizar su rendimiento en entornos corrosivos.

Las aleaciones de aluminio-cobre [Al-Cu] están expuestas a entornos agresivos y a diversos procesos corrosivos que afectan al entorno circundante, como la temperatura, la humedad, la exposición a gases agresivos y el pH ambiental. La temperatura, al igual que la velocidad de corrosión, influye en los mecanismos y la naturaleza de los procesos corrosivos. La corrosión electroquímica puede ser más predominante a altas temperaturas, lo que implica que las reacciones electroquímicas desempeñan un papel más importante en la corrosión [1].

La aleación Al-Cu, compuesta de aluminio y cobre, se ha utilizado ampliamente en diversas aplicaciones debido a sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión [2]. Sin embargo, en ciertos entornos, como los medios acuosos, esta aleación puede volverse susceptible a la corrosión, lo que provoca un proceso de fragilización por hidrógeno que puede comprometer su integridad estructural. Por lo tanto, es fundamental comprender cómo el tratamiento térmico afecta la microestructura de esta aleación y cómo esta modificación microestructural puede influir en su susceptibilidad a la corrosión, impulsando así el desarrollo de tecnologías más sostenibles y limpias.

En este artículo, exploraremos en detalle el proceso de fragilización por hidrógeno en aleaciones de Al-Cu al 25 % en peso, examinando cuidadosamente los principios fundamentales de los tratamientos térmicos y su influencia directa en la microestructura de la aleación. Además, profundizaremos en el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas electroquímicas realizadas, que incluyeron técnicas como curvas de polarización, potencial de circuito abierto frente a corriente y espectroscopia de impedancia electroquímica. Estas pruebas nos proporcionaron una visión detallada de la respuesta electroquímica de la aleación en condiciones simuladas de agua de mar sintética, ofreciendo información valiosa sobre su viabilidad para aplicaciones relacionadas con la producción de hidrógeno.

Una mejor comprensión de estos conceptos nos permitirá avanzar hacia soluciones más eficaces y sostenibles en la industria y la tecnología. Esta investigación no solo contribuirá al avance del conocimiento en los campos de los materiales y la electroquímica, sino que también nos acercará a un futuro más limpio y eficiente, donde la producción de hidrógeno desempeña un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más renovables y respetuosas con el medio ambiente.

Metodología experimental

Se utilizaron pellets de aluminio y placas de cobre, ambos con una pureza del 99,99 %, para obtener la aleación de Al-Cu al 25 %. Se realizaron cálculos estequiométricos con una relación Al-Cu del 25 % para una masa fundida de 2 kg. El proceso de fusión se llevó a cabo en un crisol de SiC alojado en un horno de inducción eléctrico PREFINSA HR C4/1200 calentado a 705 °C.

El material fundido se vertió en un molde rectangular de acero desmontable. 24 horas después, el molde fue desmontado. Se obtuvieron pequeñas barras de la aleación de Al-Cu al 25%, de las cuales se obtuvieron especímenes para la caracterización metalográfica y electroquímica. Para revelar la microestructura, se prepararon especímenes de la aleación de Al-Cu al 25% en peso con dimensiones de 15 mm x 15 mm x 5 mm y se lijaron con papeles CSi con un tamaño de grano de 220 a 1200 y se pulieron con alúminas de 0,3 μm hasta lograr un acabado especular [norma ASTM E3-11] [3]. Posteriormente, se realizó un ataque químico a temperatura ambiente con una solución KELLER [2 ml de HF, 3 ml de HCl, 5 ml de HNO₃, 190 ml de H₂O] [3,4]. La microestructura se observó con un microscopio óptico MICROSCOPE, modelo G1000, y un microscopio electrónico de barrido [MEB], JEOL JSM 7600F. Las fases estructurales de la muestra en estado bruto de colada, tratada térmicamente a 450 °C, 500 °C y 530 °C, se identificaron mediante difracción de rayos X [DRX] con un difractómetro ADP 2000. Los datos se obtuvieron en el rango 2θ de 5° a 80° con un paso de 0,0166.

Se realizaron curvas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica con un potenciostato/galvanostato de ACM Instruments. Se empleó una celda electroquímica acrílica convencional de tres electrodos [ASTM G-5], un electrodo auxiliar de grafito como contraelectrodo [CE], un electrodo de referencia de cloruro de plata [RE] y muestras de Al-Cu al 20 % en peso tratadas térmicamente a 450 °C, 500 °C y 530 °C como electrodos de trabajo. Se utilizó agua de mar sintética [SSA] como electrolito, preparada según la norma ASTM D1141.

Se realizó una prueba de potencial de circuito abierto [OCP] durante 2500 segundos frente a ECS. Se realizaron curvas de polarización potenciodinámica en el rango de -800 mV a 800 mV con respecto a E_{corr} a una velocidad de barrido de 0,5 mV/s. Ensayo de dureza Brinell. Esta prueba se realizó con un durómetro Starrett analógico de alta precisión.

Resultados

Caracterización microestructural

Las figuras 1, 2, 3, 4 muestran las diferentes condiciones metalúrgicas en el momento de la fundición, con tratamiento térmico a 450 °C, 500 °C y 530 °C.

Box 1

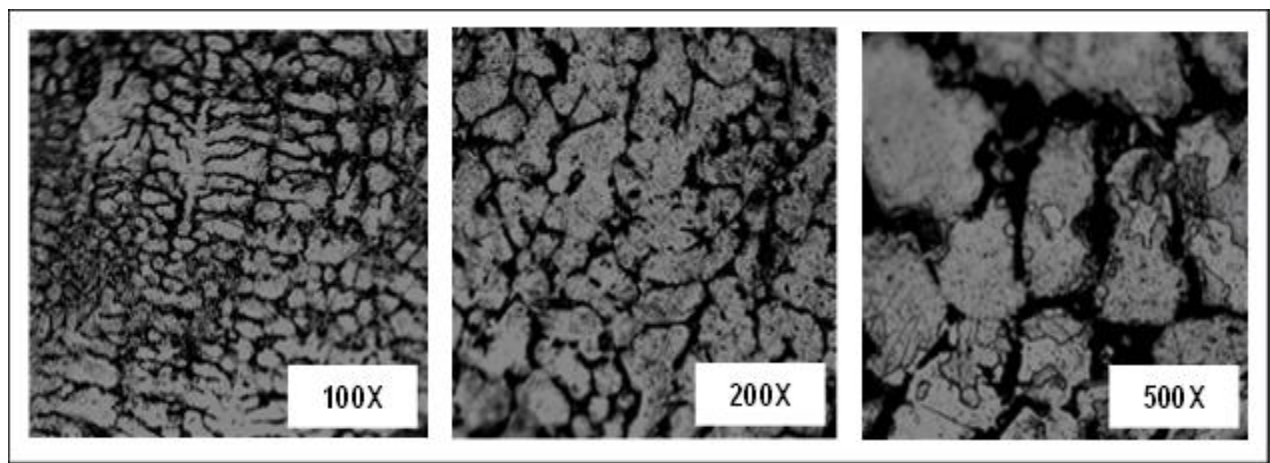


Figura 1

Microscopía óptica en condiciones de fundición con aumentos de 100X, 200X, 500X

Fuente: Elaboración propia.

Box 2

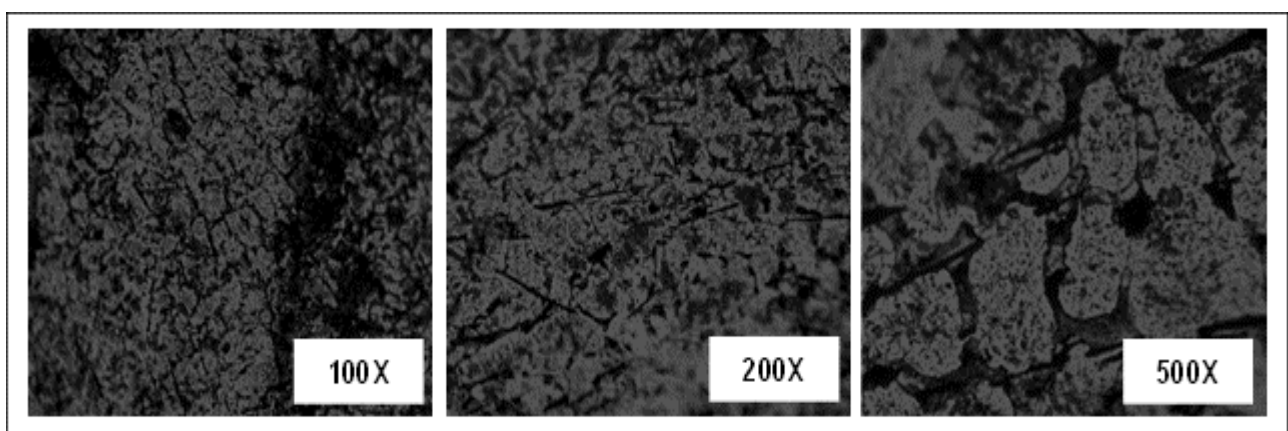
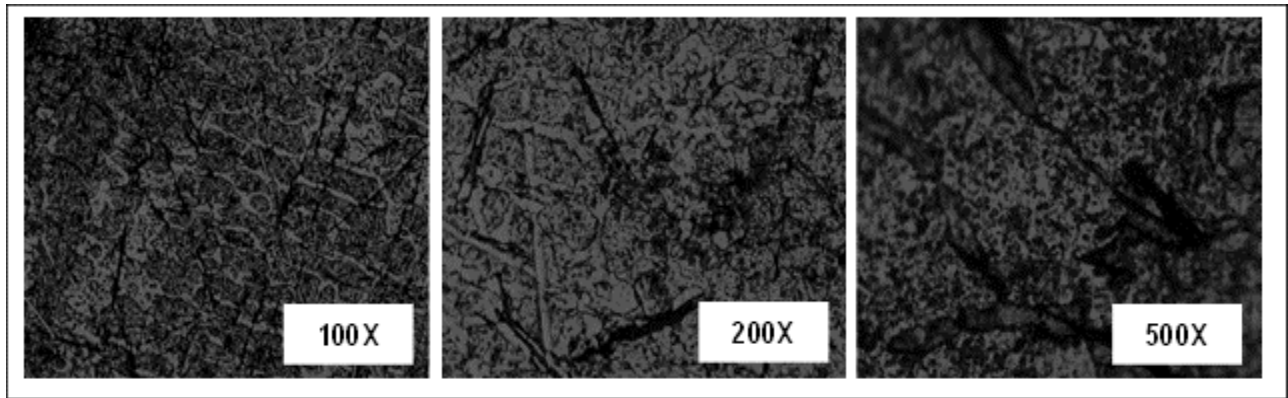


Figura 2

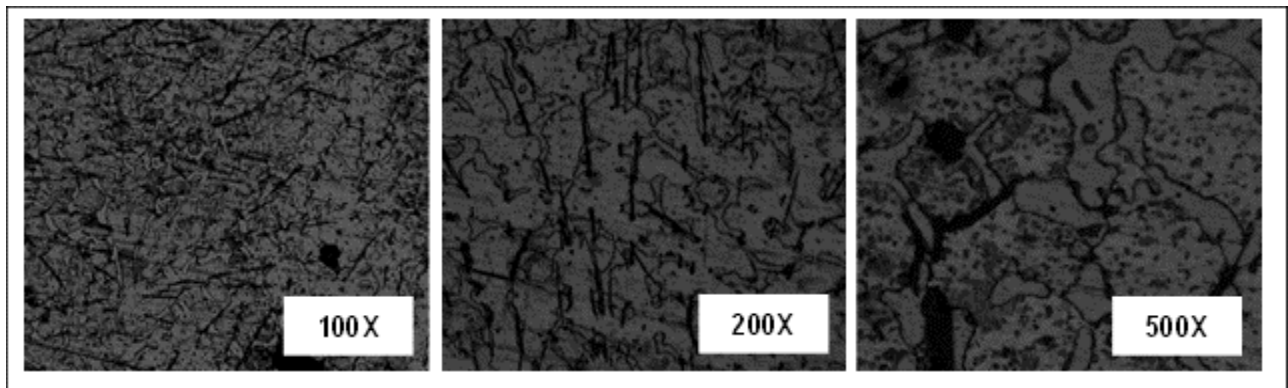
Microscopía óptica con TT a 450°C con aumentos de 100X, 200X, 500X

Fuente: Elaboración propia.

Box 3**Figura 3**

Microscopía óptica con TT a 500°C con aumentos de 100X, 200X, 500X

Fuente: Elaboración propia.

Box 4**Figura 4**

Microscopía óptica con TT a 530°C con aumentos de 100X, 200X, 500X

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 1 muestra la microestructura en estado de colada. Se observa una matriz dendrítica de la fase proeutéctica, que es una solución sólida de aluminio [α] [4]. Los espacios entre las dendritas están ocupados por la fase eutéctica [$\alpha+\theta$], donde la fase θ es el intermetálico Al_2Cu . A diferentes aumentos, se observa la morfología típica de la solidificación en desequilibrio. La microestructura es relativamente gruesa y la distribución de fases no es homogénea [5].

En la Figura 2, el tratamiento térmico a 450 °C se realiza por debajo de la temperatura de la solución sólida [548 °C]. La microestructura muestra que la estructura dendrítica original se ha esferoidizado o globularizado parcialmente. El eutéctico, que era laminar en estado de colada, comienza a descomponerse en partículas más esféricas y dispersas de la fase θ [Al_2Cu] dentro de la matriz de aluminio [α]. La homogeneización de la microestructura es evidente, lo que indica que la segregación de solutos está disminuyendo y que se está produciendo una redistribución de fases [6].

La Figura 3 muestra una microestructura con un aumento de la temperatura del tratamiento térmico a 500 °C. La difusión atómica es aún más rápida, acelerando el proceso de coalescencia y esferoidización. Las partículas de Al_2Cu [θ] son más grandes y esféricas que a 450 °C. La matriz α [Al] es más homogénea y la estructura dendrítica es prácticamente indistinguible. La coalescencia de las partículas de la segunda fase [θ] resulta en una reducción del área interfacial y una morfología de equilibrio más favorable. Este tipo de microestructura, con partículas secundarias globulares dispersas en una matriz, suele ser deseable para mejorar la tenacidad y la maquinabilidad, aunque puede reducir la dureza en comparación con una estructura más fina y dispersa [7]. En la Figura 4, la microestructura de la aleación de Al-Cu al 25 % se ha sometido a un proceso de solubilización. Esta temperatura es cercana, pero ligeramente inferior, al punto de fusión eutéctico [~ 548 °C], lo que permite que una gran cantidad de la fase Al_2Cu [θ] se disuelva en la matriz de aluminio [α].

La microestructura muestra las partículas originales de las fases eutéctica [laminar] y proeutéctica, pero la morfología ha cambiado significativamente. La difusión atómica a esta temperatura ha permitido que los límites de la fase Al_2Cu se disuelvan parcialmente en la matriz [8].

Se observan reminiscencias de una estructura de colada, pero los límites de fase están menos definidos y las partículas son más irregulares. La red eutéctica original ya no es continua. En su lugar, partículas aisladas de la fase Al_2Cu permanecen dentro de la matriz de aluminio, que no se han disuelto completamente. El objetivo de este tratamiento térmico es disolver la mayor cantidad posible de cobre en la matriz de aluminio para preparar la aleación para el posterior endurecimiento por precipitación [envejecimiento]. El aspecto poroso y fragmentado de la fase Al_2Cu es un claro indicador de que se encuentra en un estado de homogeneización avanzada [9]

Comportamiento electroquímico de aleaciones de Al_2Cu en estado bruto de fundición y tratadas térmicamente a 450 °C, 500 °C y 530 °C.

La Figura 5 muestra el comportamiento electroquímico en una solución de agua de mar sintética de una muestra sin tratar con 25% de Al_2Cu [S/TT] y tres muestras tratadas térmicamente [TT] a diferentes temperaturas: 450 °C, 500 °C y 530 °C, sumergidas en una solución de agua de mar sintética. El análisis de estas curvas de polarización permite interpretar el comportamiento electroquímico, centrándose en su resistencia a la corrosión.

Box 5

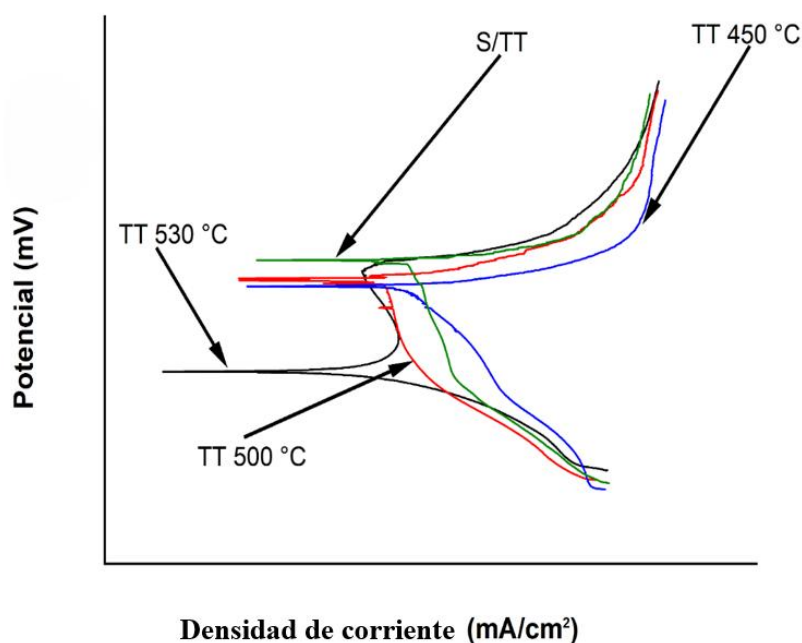


Figura 5

Comportamiento electroquímico de la aleación $AlCu25\%$ y las tres condiciones termodinámicas analizadas

Fuente: Elaboración propia.

En general, se puede observar un comportamiento pasivo/corrosivo en agua de mar sintética. La curva de la muestra sin calentar [S/TT] muestra un comportamiento similar al de la aleación tratada a 450 °C [TT 450 °C], lo que sugiere una resistencia a la corrosión comparable. TT 450 °C presenta una zona de pasivación más estrecha y un menor potencial de picaduras que el material S/TT. Esto significa que TT 450 °C es más susceptible a la corrosión por picaduras en estas condiciones. El tratamiento a 450 °C probablemente causa la formación de una fase intermetálica de Al_2Cu con mayor actividad electroquímica que la matriz de aluminio puro, lo que aumenta la corrosión [10].

La curva TT 500 °C a 500 °C muestra el comportamiento más favorable. Bajo esta condición, la aleación exhibe la mayor resistencia a la corrosión, el mayor potencial de corrosión y la menor densidad de corriente de corrosión.

Esto sugiere que el tratamiento térmico a 500 °C optimiza la microestructura de la aleación, reduciendo la cantidad o distribución de fases susceptibles a la corrosión y formando una capa pasiva más estable. La curva TT 530 °C a 530 °C muestra el peor comportamiento a la corrosión. Presenta el menor potencial de corrosión y una densidad de corriente de corrosión muy alta, lo que indica que la aleación se corroe rápidamente. A esta temperatura, las fases intermetálicas de Al₂Cu pueden disolverse o distribuirse de manera que crean una red continua de sitios activos en el material, lo que facilita la corrosión [11].

Comportamiento de la microdureza en diferentes condiciones metalúrgicas

Box 6

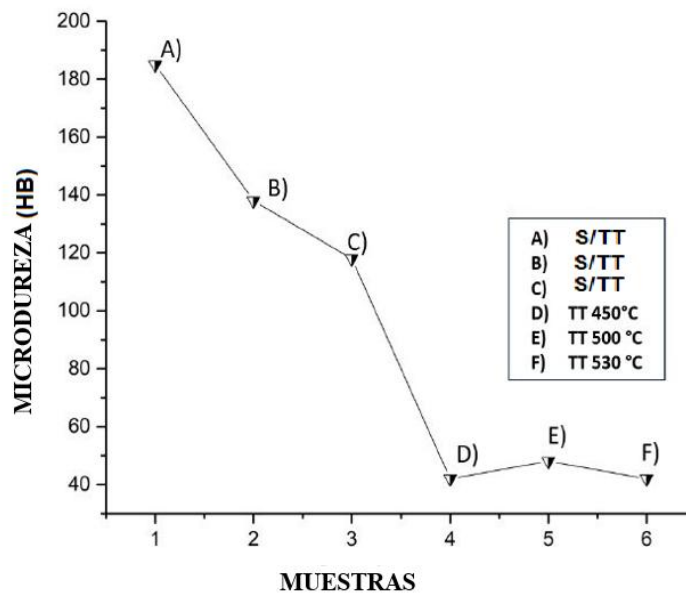


Figura 6

Comportamiento de la microdureza para diferentes condiciones metalúrgicas

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra que la microdureza de la aleación de aluminio y cobre [Al-Cu 25 % en peso] disminuye drásticamente con el tratamiento térmico. La dureza inicial de la muestra fundida es alta, mientras que después del tratamiento térmico a diferentes temperaturas [450 °C, 500 °C y 530 °C], la dureza es significativamente menor y prácticamente constante.

La aleación en estado de colada presenta una dureza alta, con valores que oscilan entre 118 y 185 HB [dureza Brinell]. Esto se debe a la rápida solidificación, que da lugar a una estructura de grano fino y a la formación de fases intermetálicas duras, como CuAl₂, distribuidas por toda la matriz de aluminio. La variación entre las muestras [A, B y C] puede deberse a la heterogeneidad en la estructura interna de la muestra, como la segregación de elementos o las variaciones en el tamaño de grano [12].

Conclusiones

La aleación de Al-Cu al 25 % en peso disminuye su microdureza al someterse a un tratamiento térmico en solución a temperaturas de 450 °C, 500 °C y 530 °C durante 3 horas, seguido de un revenido a temperatura ambiente de 20 °C y un envejecimiento a 200 °C durante 10 horas.

La aleación de Al-Cu al 25 % en peso presenta una fase intermetálica durante los tratamientos térmicos a 500 °C y 530 °C, lo que resulta en una disminución de la dureza de la aleación debido a la precipitación de la fase secundaria de Al₂Cu. Esto, en términos de corrosión, afecta la susceptibilidad a la corrosión y la estabilidad microestructural.

Las pruebas electroquímicas proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento de la aleación frente a la corrosión en un entorno simulado de agua de mar. Se observaron variaciones en las velocidades de corrosión y la resistencia a la corrosión con respecto a los diferentes tratamientos térmicos. El análisis SEM permitió una caracterización detallada de las muestras, revelando diferencias notables en la morfología y la estructura superficial. Se observa la influencia de los tratamientos térmicos.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses económicos ni relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Calan-Canche, Damian: Análisis de resultados

Martínez-Vargas, Sergio: Revisión de la metodología de investigación.

Figuroa-Ramírez, Sandra Jazmín: Contribución al tema de investigación, revisión de metodología y análisis de resultados.

Flores-Chan, J.E.: Autor principal del tema de investigación, contribución a la metodología y análisis de resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos y materiales utilizados en este estudio están disponibles.

Sin financiación

Referencias

Antecedentes

1 Shuo Zhang, Jinghui He, Dongfu Wang, Yueming Wang, Lunbo Duan. [2026]. [Dynamic corrosion mechanisms and electrochemical correction factors in solid waste incineration environments](#). Chemical Engineering Science 319, 122231.

2 Rafał Babilasa, Anna Bajorek, Monika Spilka, Adrian Radońc, Wojciech Łońska. [2020]. [Structure and corrosion resistance of Al–Cu–Fe alloys](#). Progress in Natural Science: Materials International. 30, 393-401.

Básicos

3 Book of Standards Volume: 03.01 [2017]. ASTM E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 10.1520/E0003-11

Soporte

4 Ildiko Peter, Mirela Agapie and Bela Varga. [2018]. [Dendritic Segregation of Zn-Al Eutectoid Alloys](#). Metals 2018, 8, 924.

5 Samuel A. Awe. [2021]. Solidification and microstructural formation of a ternary eutectic Al-Cu-Si cast alloy. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 33, 569-580.

6 Mrówka-Nowotnik Grażyna, Kamil Gancarczyk, Andrzej Nowotnik, Kamil Dychton and Grzegorz Boczkal [2021]. [Microstructure and Properties of As-Cast and Heat-Treated 2017A Aluminium Alloy Obtained from Scrap Recycling](#). Materials 2021, 14, 89.

7 Bruna Callegari, Tiago Nunes Lima and Rodrigo Santiago Coelho. [2023]. [The Influence of Alloying Elements on the Microstructure and Properties of Al-Si-Based Casting Alloys: A Review](#). Metals 2023, 13, 1174.

8 Ka Gao, Zan Zhang, Junliang Zhao, Dejian Sun and Fu Wang. [2020]. [Orientation and Microstructure Evolution of Al-Al₂Cu Regular Eutectic Lamellar Bifurcating in an Abruptly Changing Velocity under Directional Solidification](#). *Materials* 2020, 13, 1004.

9 Zihan Songa, Oxana V. Magdysyuk, Tay Sparks, Yu-Lung Chiua, Biao Cai. [2022]. [Revealing growth mechanisms of faceted Al₂Cu intermetallic compounds via high-speed Synchrotron X-ray tomography](#). *Acta Materialia*, 231, 117903.

Diferencias

10 He Zhu, Jingfei Li. [2024]. [Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment](#). *International Journal Electrochemical Science*. 19, 100487.

Discusiones





11 Weitao Zhou, Fei Xue and Moucheng Li. [2025]. [Corrosion Behavior of Al-Mg Alloys with Different Alloying Element Contents in 3.5% NaCl Solution](#). *Metals* 2025, 15, 327.





12 Pooya Parvizi, Milad Jalilian, Pedram Sorouri Mirazizi, Mohammad Reza Zangeneh, Alireza Mohammadi Amidi. [2025]. [Mechanical and physical properties of aluminum and its alloys for electrical conductors: A review](#). *Next Materials*. 9, 101090.




Caracterización Espectroscópica y Fitoquímica del extracto metanólico provenientes de hojas de la planta *Terminalia cattapa*





Spectroscopic and phytochemical characterization of the methanolic extract from the leaves of the *Terminalia cattapa* plant

Sánchez-Martínez, Víctor Alberto ^a, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín *^b, Flores Gil, Aarón ^c y Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LSL-3116-2024 •  0000-0003-0487-8323 •  1088487

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  AIB-1429-2022 •  0000-0003-1368-1741 •  164797

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  0000-0002-2302-2056 •  121166

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  LSK-8588-2024 •  0000-0002-0565-6450 •  219284

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.36.43>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería química

Subdisciplina: Química orgánica

Key Handbooks

En este trabajo se presenta la obtención y caracterización del extracto metanólico proveniente de las hojas de la *Terminalia cattapa*. El objetivo es estudiar los espectros FTIR, UV-Vis, y Raman para conocer los grupos funcionales, compuestos y fuerzas vibracionales del extracto metanólico, asimismo, se identifican los compuestos orgánicos mediante pruebas fitoquímicas. Es importante mencionar que el extracto será evaluado posteriormente como inhibidores de corrosión, con el fin de contar un método eficaz, económico y amigable para el medio ambiente para inhibir la corrosión de metales. Los compuestos orgánicos de la planta son los responsables de reducir la velocidad de corrosión de los metales, por lo que su identificación es crucial para su posterior evaluación. Los autores por orden en este capítulo de libro cuentan con la siguiente cantidad de citas 0, 4, 3 y 0. El autor Sánchez-Martínez cuenta con beca CONAHCYT y el resto de los autores cuentan con perfil deseable PRODEP y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Todos los autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son: espectroscopía, pruebas fitoquímicas y *Terminalia cattapa*.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Sánchez-Martínez, Víctor Alberto, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores Gil, Aarón y Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo. 2025. Caracterización Espectroscópica y Fitoquímica del extracto metanólico provenientes de hojas de la planta *Terminalia cattapa*. 36-43. ECORFAN.

* ✉ [\[sfigueroa@pampano.unacar.mx\]](mailto:sfigueroa@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



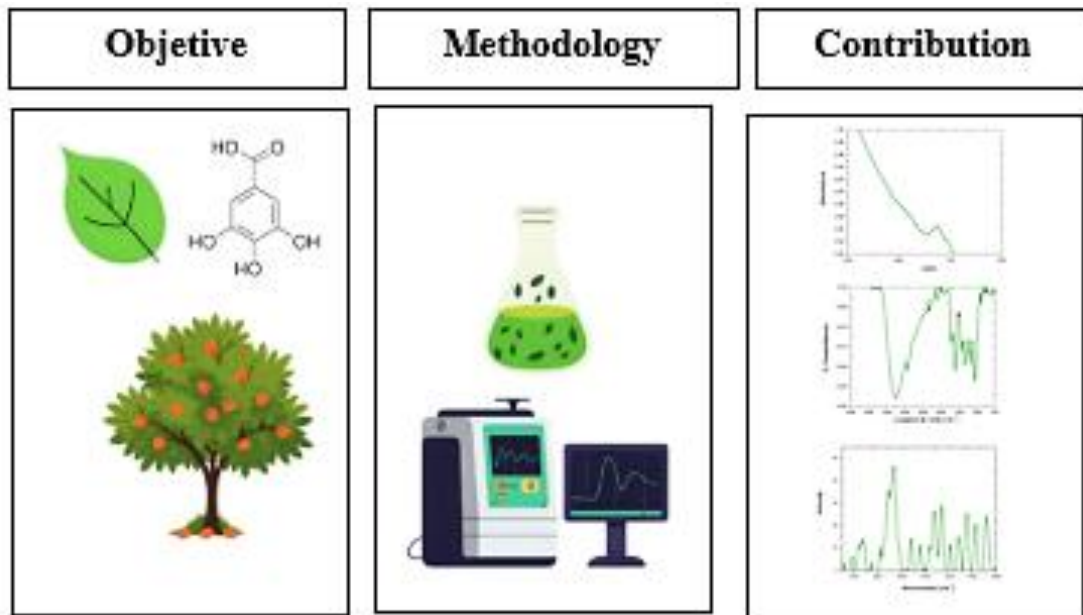
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

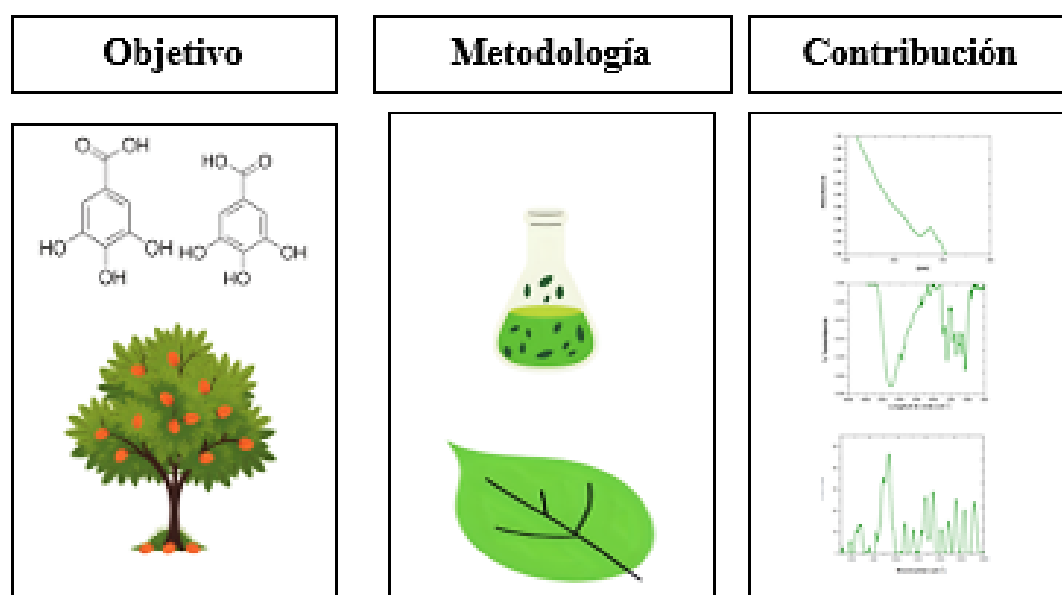
In the present work, the methanolic extract of *Terminalia catappa* leaves were obtained and characterized. The extract was prepared through a maceration process and subsequently analyzed using spectroscopic techniques [UV-Vis, FTIR, and Raman spectroscopy] and phytochemical tests. The spectroscopic techniques revealed the presence of anthocyanins, phenolic compounds, and aromatic compounds, while the phytochemical tests confirmed the presence of flavones, saponins, and tannins.



Spectroscopy, Phytochemical Test, *Terminalia cattapa*

Resumen

Los metales sufren corrosión debido a la presencia de diferentes medios corrosivos. Una forma de prevenirla es desarrollando y empleando inhibidores de corrosión que sean eficaces y amigables con el ambiente. Los extractos de plantas son buenos candidatos debido a que no contienen sustancias tóxicas. En el presente trabajo se obtuvo y caracterizó el extracto metanólico de hojas de la *Terminalia cattapa*. La obtención del extracto se realizó mediante el proceso de maceración y se caracterizó mediante técnicas espectroscópicas [Espectroscopia UV-Vis, FTIR, Raman] y pruebas fitoquímicas. Las técnicas espectroscópicas mostraron la presencia de antocianinas y compuestos fenólicos y compuestos aromáticos, mientras que las pruebas fitoquímicas confirmaron la presencia de flavonas, saponinas y taninos.



Espectroscopía, Pruebas Fitoquímicas, *Terminalia cattapa*

Introducción

Los compuestos bioactivos de las plantas son de gran interés científico debido a que poseen una amplia variedad de propiedades benéficas tanto en el área médica como industrial. En este contexto, la planta *Terminalia cattapa* conocida comúnmente como almendro tropical [López-Hernández et al., 2001], se destaca por la riqueza fitoquímica en sus hojas, las cuales contienen flavonoides como taninos, terpenoides, kaempferol y otros compuestos fenólicos, reconocidos por su alta capacidad antioxidantes. Estos metabolitos secundarios han demostrado poseer propiedades antibacterianas, antifúngicas y parasiticidas [Giang et al., 2023], lo que convierte a esta especie en una fuente valiosa de compuestos con un gran potencial para diferentes aplicaciones.

La *Terminalia cattapa* se distribuye globalmente desde Indonesia hasta Australia y en México crece en el sureste y se encuentra principalmente en ambientes tropicales [Mohale et al., 2009]. El almendro tropical es un árbol grande y extenso que se utiliza principalmente con fines ornamentales; sin embargo, su utilidad se ha extendido hacia aplicaciones ambientales, como biosorbente, en la síntesis de nanopartículas y como inhibidor de corrosión, entre otros usos [Ramanan S et al., 2025].

El interés en su aprovechamiento como inhibidor verde radica en que sus componentes bioactivos no generan contaminación ambiental significativa, a diferencia de los inhibidores inorgánicos, los cuales suelen contener compuestos tóxicos, tales como derivados de sulfuro de rabeprazol, acetilcumarina, y bromoacetilcumarina [KM et al., 2024]. Esta situación ha impulsado a la búsqueda de alternativas más ecológicas, considerando que la corrosión representa un problema crítico para diferentes industrias que emplean materiales metálicos y aleaciones expuestos a diferentes medios agresivos, incluyendo soluciones ácidas [H₂SO₄], básicos [CaCO₃, NaOH, NaHCO₃], gases [NH₄, H₂S, CH₂O], sales [NaCl] y sustancias químicas.

Para mitigar este fenómeno, se han desarrollado diferentes métodos, entre los que destacan los recubrimientos protectores, la protección catódica y anódica, así como los inhibidores de corrosión. En este sentido, el presente trabajo tiene como propósito la obtención y caracterización del extracto metanólico proveniente de las hojas de *Terminalia cattapa*, con el fin de identificar los compuestos bioactivos que actuaran en el proceso de inhibición de la corrosión.

Metodología

Preparación y obtención del polvo de las hojas

Las hojas de la *Terminalia cattapa* se recolectaron en el Parque Héroes de Nacozari, ubicado en Ciudad del Carmen, Campeche, México [ver **Figura 1**]. Posteriormente, se lavaron con agua de la llave y después con agua destilada, dejándose escurrir durante 1 hora a temperatura ambiente. Inmediatamente, después se sometieron a un proceso de secado empleando un deshidratador comercial a 60°C durante 12 horas. Una vez completado el tiempo, las hojas secas se trituraron en un molino de la serie Y y el material obtenido se tamizó utilizando un tamiz N° 60.

Box 1



Figura 1

Árbol de la *Terminalia cattapa* ubicado en el Parque Héroes de Nacozari de Ciudad del Carmen, Campeche, México.

Preparación del extracto metanólico

El extracto metanólico de las hojas de la *Terminalia cattapa* se obtuvo mediante el proceso de maceración, el cual consistió en colocar en un matraz 25 g de polvo de las hojas en 250 mL de metanol, la solución se dejó en agitación durante 72 horas [Royani et al., 2024].

Transcurrido este periodo, la mezcla se filtró y el extracto obtenido se concentró en un rotavapor a 60°C y 40 rpm. Posteriormente, el concentrado se sometió a un proceso de secado en un horno de convección a 60°C durante 72 horas. Finalmente, el extracto seco se utilizó para la preparación de la solución patrón en 250 mL.

Caracterización espectroscópica

- Espectroscopía UV-VIS: El extracto metanólico se diluyó en agua al 10% [v/v] y se analizó en un espectrofotómetro UV-Vis [marca HACH, modelo DR500]. Las mediciones se realizaron en el intervalo de 200 a 800 nm.
- Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier [FTIR]: El extracto se analizó en un espectrofotómetro FTIR [Tensor II marca Bruker], empleando un accesorio de reflexión total atenuada [ATR] con punta de diamante. Los espectros se adquirieron con una resolución de 4 cm⁻¹, mediante 32 escaneos en el rango de 4000 a 500 cm⁻¹.
- Espectroscopía Raman: Los espectros Raman se obtuvieron empleando un equipo Ocean Optic acoplado a una fuente láser de longitud de onda es cercana al infrarrojo. La potencia aplicada fue de 300 unidades arbitrarias que equivalen a 1 mW. Los espectros fueron procesados mediante el software especializado de la misma marca.

Caracterización fisicoquímica

Se emplearon las metodologías propuestas por los autores [Shaibu Auwal et al., 2014], [C & Mala Nair, 2013], que permiten identificar flavonoides, saponinas y taninos presentes en el extracto. Las pruebas fitoquímicas empleadas fueron: reacción Shinoda y reacción con 10% NaOH [flavonoides], reacción con cloruro férrico, reacción con grenetina y reacción de acetato de plomo [taninos] y la prueba de espuma [saponinas].

Resultados

Con el propósito de determinar el porcentaje de extracción de los compuestos orgánicos presentes en las hojas de la planta de la *Terminalia cattapa*, se calculó el porcentaje de rendimiento [% R] del extracto metanólico, mediante la siguiente ecuación:

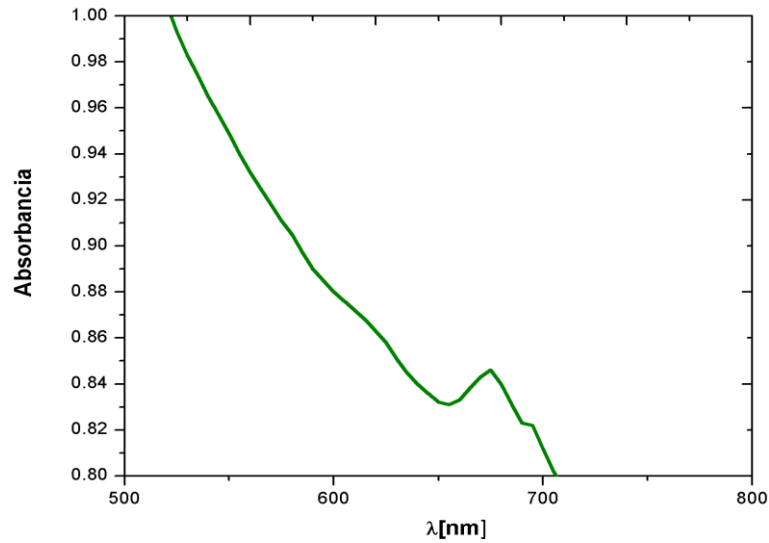
$$\% R = \frac{P_s}{P_i} \times 100 \quad [1]$$

Dónde: P_s es el peso de extracto seco de las hojas de la *Terminalia cattapa* [g] y P_i es el peso inicial de las hojas [g], [Benítez-Benítez et al., 2020].

En este estudio, el peso de extracto seco fue de 12.9 g, lo cual corresponde a un rendimiento del 51.6 %. Esto quiere decir, que un poco más de la masa de las hojas estaba compuesta por compuestos solubles en metanol [polifenoles, flavonoides, taninos, etc.], el resto corresponde a componentes que no son extraíbles [celulosa, lignina, etc.]. El 51.6 % se considera un porcentaje alto de extracción; por lo tanto, se refleja una buena eficiencia del solvente para extraer los compuestos orgánicos de las hojas de la *Terminalia cattapa*.

Para poder identificar los compuestos orgánicos presentes en las hojas de la *Terminalia cattapa*, a continuación, se presentan la caracterización espectroscópica y fitoquímica del extracto metanólico.

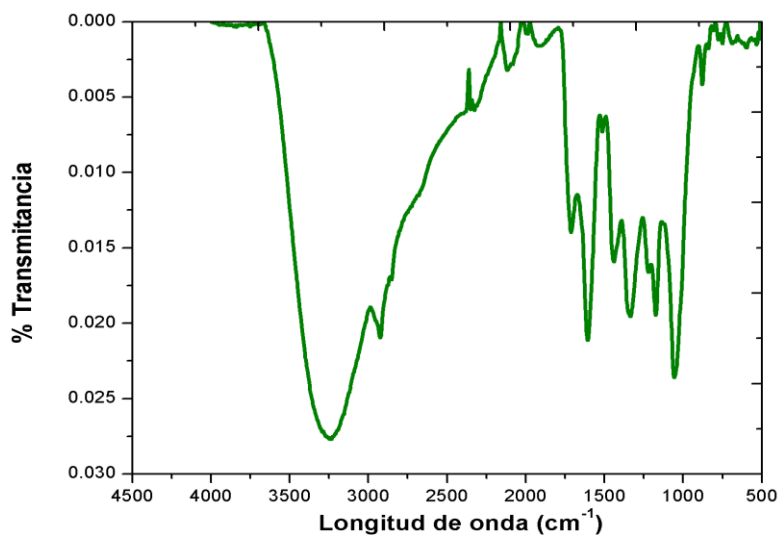
En la **Figura 2** se muestra el espectro UV-Vis obtenido del extracto metanólico de las hojas de la *Terminalia cattapa* en el intervalo de 200 a 800 nm. Se identifica un pico en 673 nm asociados a antocianinas, las cuales pertenecen al grupo de los flavonoides y otorgan el pigmento a las hojas, flores o frutos de las plantas [Singla et al., 2022][Mabasa et al., 2021][Pal et al., 2019].

Box 2**Figura 2**

Espectros UV-Vis obtenidos del extracto metanólico de las hojas de *Terminalia cattapa*.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 3** se tiene el espectro FTIR del extracto de metanol de la *Terminalia cattapa*, donde se observan 5 picos característicos, los cuales hacen alusión a los enlaces O-H [3250 cm^{-1}], C-H [2800 cm^{-1}], C=O [1750 cm^{-1}], C-H [1600 cm^{-1}] y O-C [1100 cm^{-1}], con lo cual el autor [Mwangi et al., 2024] menciona que, debido a estos picos, se puede esperar en el extracto saponinas, ácidos carboxílicos, compuestos fenólicos o alcohol. Además, el autor [Purnama et al., 2019] menciona que también se pueden formar enlaces dobles de carbono.

Box 3**Figura 3**

Espectro FTIR obtenido del extracto metanólico de las hojas de *Terminalia cattapa*.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 4** se muestra el espectro Raman del extracto metanólico, en el cual los picos que se tiene en 1650 cm^{-1} , 1750 cm^{-1} , pertenece a las saponinas, los picos observados en 1000 cm^{-1} y 1400 cm^{-1} , pertenecen al metanol empleado en la preparación del extracto [Emin et al., 2020]. Los picos localizados en 650 cm^{-1} , 1350 cm^{-1} , pertenece a los taninos [Khodabakhshian, 2019]. El pico en 600 cm^{-1} pertenece a las saponinas, al igual que los picos en 850 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , igual pertenecen a las saponinas [Krysa et al., 2022].

Box 4

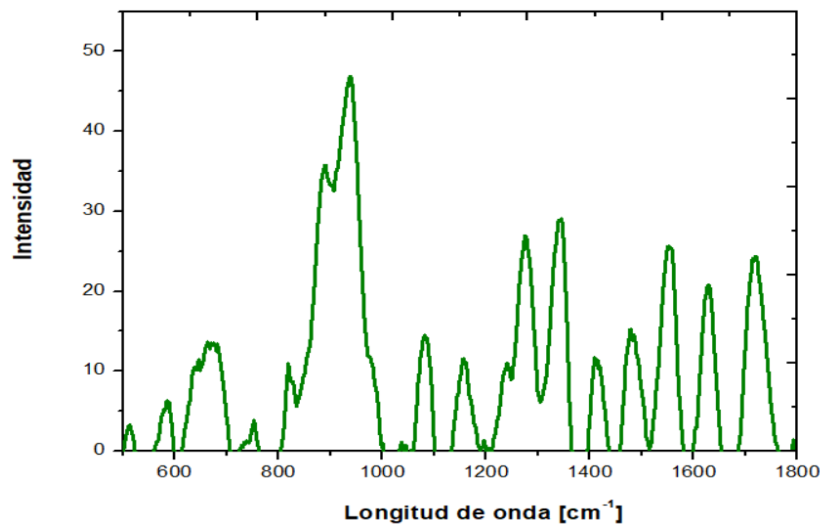


Figura 4

Espectro Raman obtenido del extracto metanólico de las hojas de *Terminalia cattapa*.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque en la actualidad existen técnicas avanzadas para determinar la naturaleza química de los metabolitos de las plantas, los ensayos fitoquímicos tradicionales aún constituyen una forma confiable de realizar un análisis cualitativo de los extractos, ya que arrojan información preliminar acerca de su composición [Suleiman et al., 2024].

En la **Tabla 1** se muestran los resultados obtenidos de las pruebas fitoquímicas utilizadas para el extracto. Se puede observar en ambos extractos la presencia de taninos, saponinas y flavonas.

Box 5

Tabla 1

Resultados de las pruebas fitoquímicas obtenidas del extracto metanólico de las hojas de *Terminalia cattapa*.

Fitoquímicos	Coloración	Metanol
Flavonoides	Precipitado amarillo	+
Taninos	Amarillo claro	+
Saponinas	N/A	+
Flavonas	Verde claro	+
Taninos Catecol	Verde oscuro	+

Conclusiones

El metanol mostró un buen desempeño como solvente para la extracción de fitoquímicos de las hojas *Terminalia cattapa*. La caracterización del extracto metanólico mediante técnicas espectroscópicas y pruebas fitoquímicas permitió confirmar la presencia de diversos compuestos bioactivos. La técnica de espectroscopia UV-Vis evidenció la presencia de antocianinas; con los espectros de FTIR se identificaron enlaces de carbono, hidrogeno y oxígeno; mientras que la espectroscopía Raman permitió determinar las fuerzas vibracionales asociadas a estos fitoquímicos. Los resultados obtenidos en las pruebas fitoquímicas comprueban lo antes mencionado. Como trabajo a futuro, se realizarán la evaluación electroquímica del extracto metanólico para determinar su eficiencia como inhibidor de corrosión en un acero ASISI 1018 en medio ácido.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Sánchez-Martínez, Víctor Alberto: Apoyó en el desarrollo experimental y redacción del documento.

Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín: Contribuyó en el análisis de los resultados.

Flores-Gil, Aarón: Revisión del trabajo.

Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo: Contribuyó en la revisión de los resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles a solicitud en el correo: sfigueroa@pampano.unacar.mx

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Abreviaturas

UV-Vis	Ultravioleta-visible
FTIR	Infrarrojo con Transformada de Fourier
ATR	Reflectancia Total Atenuada

Agradecimientos

Victor Alberto Sánchez Martínez agradece a CONAHCYT por la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado. Los autores externan su gratitud a la Dra. Beatriz Escobar Morales y M.C. Martín Bass López del Centro de Investigación Científica de Yucatán [CICY] por su apoyo con las técnicas espectroscópicas a través del proyecto de infraestructura 2015-253986 y 2018-294697. Asimismo, al M.C. César Cima Mukul del Centro de Excelencia de Investigación en Servicios Petroleros y protección Ambiental [CEISPPA]-Facultad de Ingeniería de la UNACAR por brindar los medios para realización de la síntesis del extracto.

Referencias

Antecedentes

L. V Giang, D. V Duong, D. T. T. Hang, L. T. H. Tuyet, L. N. Hai, and T. Tran, “[Terminalia catappa leaf solution: an eco-friendly approach to managing color, algae, and microbial activity in aquaculture systems](#),” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1267, no. 1, p. 012072, Dec. 2023.

S. KM, B. M. Praveen, and B. K. Devendra, “[A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment](#),” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, p. 100258, Aug. 2024.

D. S. Mohale, A. P. Dewani, A. V Chandewar, C. D. Khadse, A. S. Tripathi, and S. S. Agrawal, “[BRIEF REVIEW ON MEDICINAL POTENTIAL OF TERMINALIA CATAPPA](#),” *Journal of Herbal Medicine and Toxicology*, vol. 3, no. 1, pp. 7–11, 2009.

E. López-Hernández, E. Ponce-Alquicira, F. Cruz-Sosa, and I. Guerrero-Legarreta, “Characterization and Stability of Pigments Extracted from *Terminalia Catappa* Leaves,” *J Food Sci*, vol. 66, no. 6, pp. 832–836, Aug. 2001.

Básicos

A. Royani, M. Hanafi, R. Haldhar, and A. Manaf, “Evaluation of *Morinda citrifolia* extract as sustainable inhibitor for mild steel in saline environment,” *Journal of Engineering Research [Kuwait]*, Sep. 2024.

M. Shaibu Auwal *et al.*, “Preliminary phytochemical and elemental analysis of aqueous and fractionated pod extracts of *Acacia nilotica* [Thorn mimosa],” 2014.

R. U. C and V. Mala Nair, “Phytochemical analysis of successive reextracts of the leaves of *moringa oleifera lam.*,” 2013.

Ramanan S, S., Arunachalam, A., Singh, R., & Verdiya, A. [2025]. Tropical almond [*Terminalia catappa*]: A holistic review. *Heliyon*, 11[1], e41115.

Soporte

R. Benítez-Benítez, R. A. Sarria-Villa, J. A. Gallo-Corredor, N. O. Pérez Pacheco, J. H. Álvarez Sandoval, and C. I. Giraldo Aristizabal, “Obtención y rendimiento del extracto etanólico de dos plantas medicinales,” *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 15, no. 1, pp. 31–40, Mar. 2020.

S. Singla, A. Jana, R. Thakur, C. Kumari, S. Goyal, and J. Pradhan, “Green synthesis of silver nanoparticles using *Oxalis griffithii* extract and assessing their antimicrobial activity,” *OpenNano*, vol. 7, p. 100047, Jul. 2022.

X. E. Mabasa, L. M. Mathomu, N. E. Madala, E. M. Musie, and M. T. Sigidi, “Molecular Spectroscopic [FTIR and UV-Vis] and Hyphenated Chromatographic [UHPLC-qTOF-MS] Analysis and In Vitro Bioactivities of the *Momordica balsamina* Leaf Extract,” *Biochem Res Int*, vol. 2021, pp. 1–12, Sep. 2021.

S. Pal, H. Lgaz, P. Tiwari, I.-M. Chung, G. Ji, and R. Prakash, “Experimental and theoretical investigation of aqueous and methanolic extracts of *Prunus dulcis* peels as green corrosion inhibitors of mild steel in aggressive chloride media,” *J Mol Liq*, vol. 276, pp. 347–361, Feb. 2019.

W. C. Mwangi, W. Waudu, M. E. Shigwenya, and J. Gichuki, “Phytochemical characterization, antimicrobial and antioxidant activities of *Terminalia catappa* methanol and aqueous extracts,” *BMC Complement Med Ther*, vol. 24, no. 1, p. 137, Apr. 2024.

H. Purnama, W. Eriani, and N. Hidayati, “Natural dye extraction from tropical almond [*Terminalia catappa* Linn] leaves and its characterization,” 2019, p. 050026.

A. Emin, A. Hushur, and T. Mamtimin, “Raman study of mixed solutions of methanol and ethanol,” *AIP Adv*, vol. 10, no. 6, Jun. 2020.

R. Khodabakhshian, “Feasibility of using Raman spectroscopy for detection of tannin changes in pomegranate fruits during maturity,” *Sci Hortic*, vol. 257, p. 108670, Nov. 2019,





M. Krysa, M. Szymańska-Chargot, and A. Zdunek, “FT-IR and FT-Raman fingerprints of flavonoids – A review,” *Food Chem*, vol. 393, p. 133430, Nov. 2022.


I. Y. Suleiman, K. Mu’azu, O. A. Dinobi, E. V. Sochima, And N. R. Ekwuonwu, “Sustainability approach to corrosion mitigation using eco-friendly inhibitor for oil and gas applications,” *Revue Roumaine de Chimie*, vol. 69, no. 3–4, pp. 171–182, Mar. 2024.





Análisis comparativo del desempeño de electrolizadores PEM: Efecto de la geometría del campo de flujo

Comparative performance analysis of PEM electrolyzers: Effect of flow field geometry

Sierra-Grajeda, Juan * ^a, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín ^b, Flores-Chan, José Enrique ^c y Mandujano-Ramírez, Humberto ^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LSK-8588-2024 •  0000-0002-0565-6450 •  219284

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  AIB-1429-2022 •  0000-0003-1368-1741 •  164797

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  LXW-4586-2024 •  0000-0003-4714-686X •  175430

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  LTC-9972-2024 •  0000-0003-3714-5564 •  266189

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.44.52>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería energética

Subdisciplina: Energía solar

Key Handbooks

Este trabajo consiste en el análisis comparativo del desempeño de dos diseños de electrolizadores de membrana de intercambio protónico [PEM], con geometrías de campo de flujo basadas en pines cuadrados y circulares, contrastados con un modelo comercial. El objetivo principal es evaluar su capacidad de producción de hidrógeno y optimizar el diseño de los canales para minimizar la acumulación de burbujas, mejorando así la eficiencia del sistema. Se demuestra experimentalmente cómo la geometría del campo de flujo influye críticamente en el transporte de masa y el rendimiento del electrolizador. Los autores por orden en este capítulo de libro cuentan con la siguiente cantidad de citas 57, 47, 14 y 9. Todos los autores cuentan con perfil deseable PRODEP y los tres primeros autores pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Todos los autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son: Campo de flujo, electrolizadores y PEM.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Sierra-Grajeda, Juan, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores-Chan, José Enrique y Mandujano-Ramírez, Humberto. 2025. Análisis comparativo del desempeño de electrolizadores PEM: Efecto de la geometría del campo de flujo. 44-52. ECORFAN.

* ✉ [\[jsierra@pampano.unacar.mx\]](mailto:jsierra@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



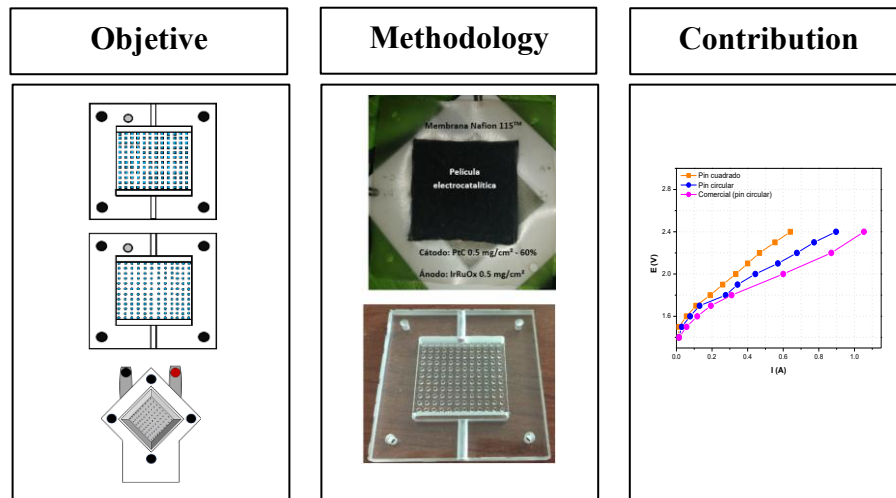
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

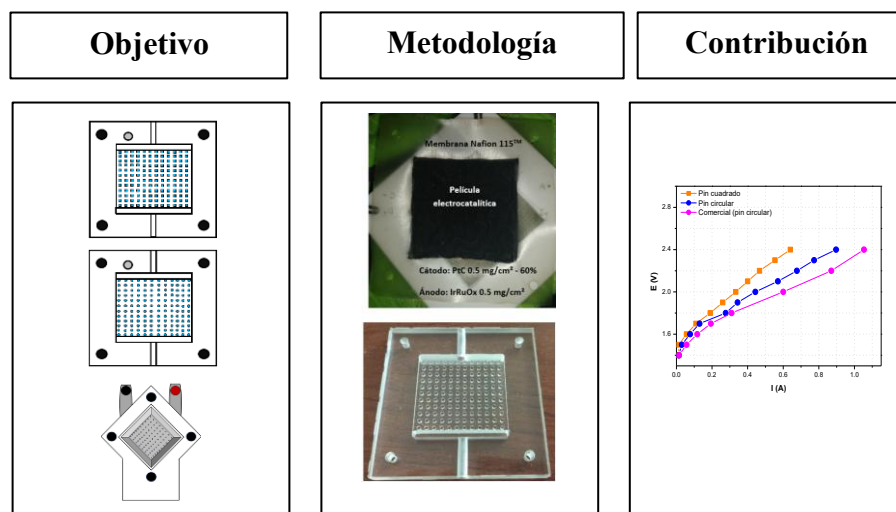
This work presents a comparative performance analysis of two proton exchange membrane [PEM] electrolyzer prototypes featuring different flow fields. A square pin-type design is compared with a circular pin-type design and a commercial design, with the objective of determining their capacity to produce hydrogen and to optimize their design to prevent bubble accumulation in the channels. The results showed that the conditioning of the membrane electrode assembly [MEA] considerably impacts its performance. The circular pin-type design achieved superior performance, producing a greater amount of hydrogen [546 mL at 2.4 V] compared to the square pin-type design [372 mL] and a commercial electrolyzer [300 mL]. This configuration improves mass transport by preventing bubble accumulation in the channels, demonstrating the critical importance of flow field geometry for process efficiency.



Electrolyzer, PEM, Flow field

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis comparativo del desempeño de dos prototipos de electrolizadores de membrana de intercambio protónico [PEM] con diferentes campos de flujo. Se compara un diseño de pines cuadrados con uno de pines circulares y un diseño comercial con el objetivo de determinar su capacidad para producir hidrógeno y optimizar su diseño para evitar la acumulación de burbujas en los canales. Los resultados mostraron que el acondicionamiento del ensamble membrana/electrodos [MEA] impacta considerablemente en su desempeño. El diseño con pines circulares obtuvo un rendimiento superior, produciendo una mayor cantidad de hidrógeno [546 mL a 2.4 V] en comparación con el de pines cuadrados [372 mL] y un electrolizador comercial [300 mL]. Esta configuración mejora el transporte de masa al evitar la acumulación de burbujas en los canales, lo que demuestra la importancia crítica de la geometría del campo de flujo para la eficiencia del proceso.



Electrolizador, PEM, campo de flujo

Introducción

La matriz energética mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles, cuyo consumo acelerado ha reducido las reservas no renovables y ha incrementado la emisión de gases contaminantes a la atmósfera [1]. Actualmente, cerca del 79% de la electricidad global aún se genera a partir de estas fuentes, lo que subraya la urgencia de transitar hacia un modelo energético sustentable [2]. En este contexto, las energías renovables y las tecnologías del hidrógeno surgen como alternativas viables. El hidrógeno es un portador de energía ideal para un sistema sustentable, ya que su uso en celdas de combustible solo produce agua como subproducto, eliminando emisiones de efecto invernadero.

Aunque puede obtenerse de combustibles fósiles, su producción mediante electrólisis del agua alimentada por energías renovables es fundamental para una economía del hidrógeno limpia [3]. Entre las tecnologías de electrólisis, los electrolizadores [Figura 1] de membrana de intercambio protónico [PEM] son especialmente ventajosos por su diseño compacto, alta eficiencia, fácil mantenimiento y capacidad para operar a altas densidades de corriente [4]. No obstante, un desafío técnico que limita su rendimiento es el estancamiento de las burbujas de hidrógeno y oxígeno en los canales del dispositivo. Esta acumulación obstruye las zonas activas de los electrodos, dificulta el transporte de masa y reduce la eficiencia de la conversión electroquímica [5]. Por esta razón, el diseño de los componentes internos, especialmente los campos de flujo, es un área de investigación crucial para el desarrollo de estos dispositivos a gran escala. Este trabajo aborda esta problemática evaluando el desempeño de dos prototipos de electrolizador PEM con campos de flujo de geometrías distintas: uno con pines cuadrados y otro con pines circulares.

El objetivo es comparar su eficiencia entre sí y con un electrolizador comercial para determinar qué diseño mejora el transporte de productos y optimiza la producción de hidrógeno.

Box 1

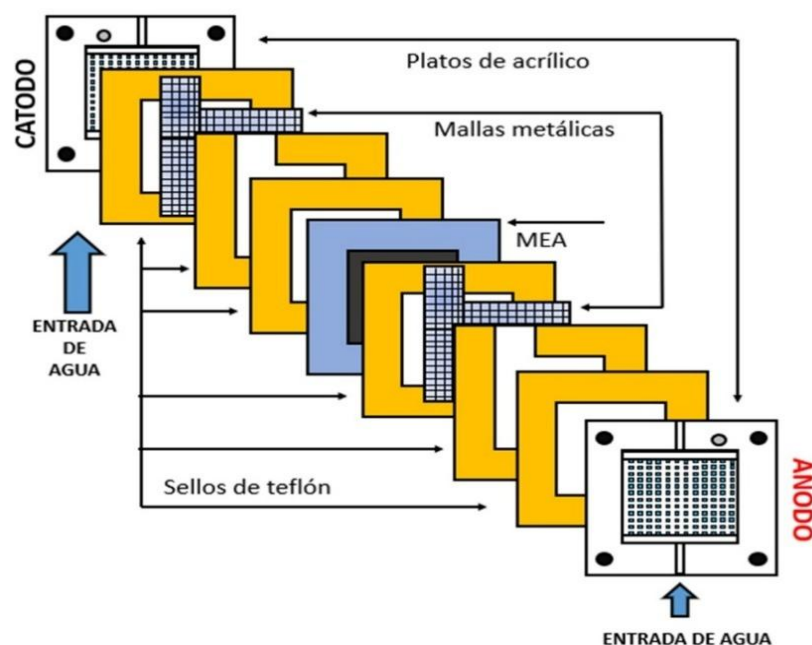


Figura 1

Componentes de un electrolizador tipo PEM.

Fuente: Elaboración propia

Metodología

La metodología experimental se centró en el ensamble, caracterización y evaluación del desempeño de dos prototipos de electrolizadores tipo PEM con diferentes campos de flujo. Los diseños maquinados en placas de acrílico [carcasas] fueron propuestos por el grupo de investigación en tecnologías del hidrógeno de la UNACAR [Figura 2].

Box 2

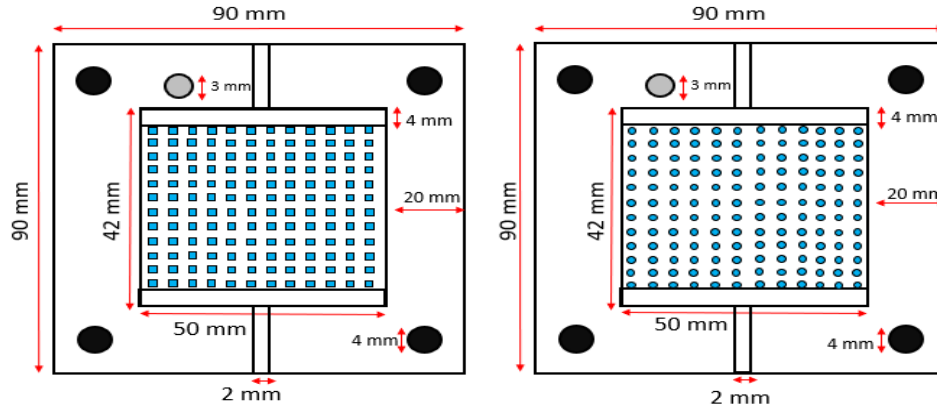


Figura 2

Diseño de los electrolizadores tipo PEM con diferentes campos de flujo

Fuente: Elaboración propia

El proceso de ensamble de los prototipos comenzó con la preparación de los componentes cuyas características de detallan en la **Tabla 1**, estos incluyen una malla de titanio, un ensamble membrana-electrodos [MEA] por cada electrolizador, cuatro sellos de teflón y dos placas de acrílico con su respectivo campo de flujo.

Box 3

Table 1 Características principales de los materiales.

Materiales	Características
Mallas de titanio	4.8 cm × 4.8 cm.
Ensamblés membrana/electrodos comerciales de la marca Fuel Cell Store ®.	Membrana [Nafion 115®] con catalizadores de iridio [ánodo] y platino [cátodo].
Sellos de teflón	7 µm de espesor.
Placas de acrílico [carcasas]	90 mm × 90 mm.

El primer paso, fue recortar las mallas de titanio a un tamaño de 4.8 x 4.8 cm y se sometieron a un tratamiento de activación, el cual consistió en sumergir las mallas en una solución de ácido clorhídrico a una temperatura de 65 °C durante 20 minutos, posteriormente, se enjuagaron con agua desionizada y se secaron a temperatura ambiente. A continuación, se recortaron los sellos de teflón a un tamaño de 9 x 9 cm, con un corte central de las mismas dimensiones que las mallas de titanio y el área activa del ensamble membrana-electrodos, además de dos sellos más con un corte superior de 2 cm para dejar expuesta una sección de ambas mallas y usarlas como contactos eléctricos, los materiales se muestran en la **Figura 3**.

Box 4

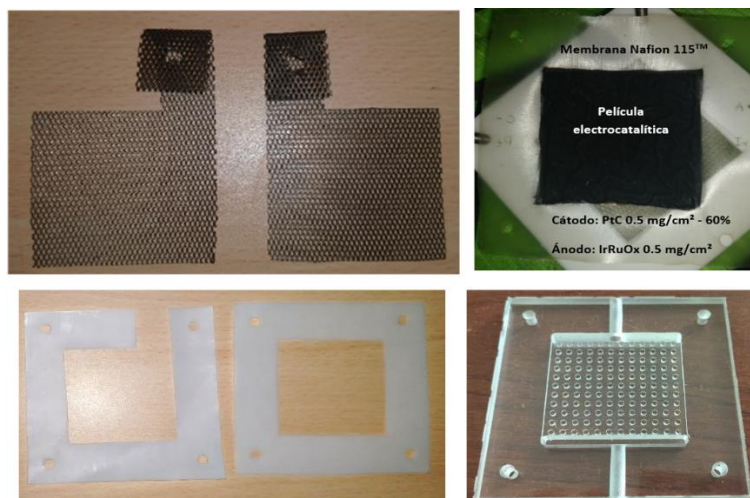


Figura 3

Materiales usados para ensamblar los electrolizadores tipo PEM.

El proceso de ensamble fue una operación minuciosa, cuyas etapas principales se muestran en la **Figura 4**. Este proceso incluyó la colocación secuencial de una placa de acrílico, un sello de teflón, la malla de titanio, la membrana, y los componentes restantes en orden, verificando que todos los componentes estén alineados correctamente y continuando con el ajuste de los tornillos a un torque de 6 lb-in para asegurar una unión homogénea y hermética. Finalmente, el electrolizador se llena con agua desionizada y se procedió con la revisión de fugas.

Box 5

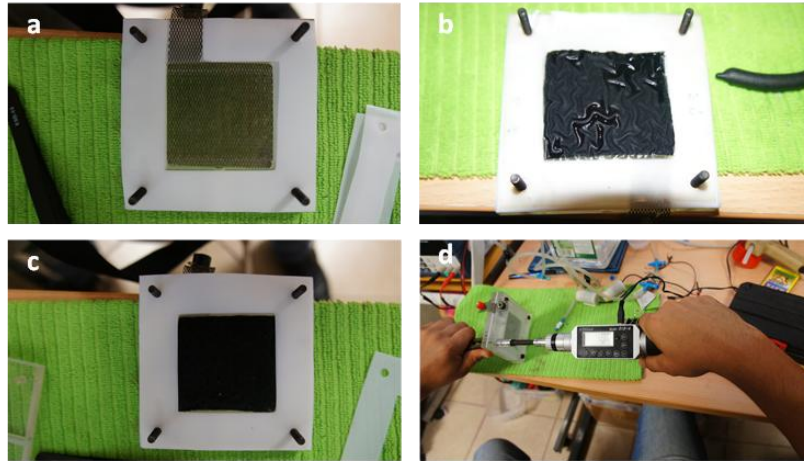


Figura 4

Materiales usados para ensamblar los electrolizadores tipo PEM.

Fuente: Elaboración propia

Una vez ensamblados, los prototipos se integraron en un arreglo experimental diseñado para la generación de hidrógeno, como se muestra en el esquema de la **Figura 5**. Este sistema constaba del electrolizador, tanques de almacenamiento para la cuantificación de gases por desplazamiento volumétrico, una minibomba para la recirculación de agua y una fuente de alimentación. Previo a la caracterización de los prototipos, se llevó a cabo el acondicionamiento del ensamble membrana/electrodos, el cual consistió en hidratar la membrana y los catalizadores.

Esto se realizó llenando los campos de flujo del ánodo y cátodo con agua desionizada y manteniéndola en reposo por 24 hrs. Posteriormente se aplicó un potencial de 2.0 V durante 15 min para promover las reacciones electroquímicas e iniciara el proceso de electrólisis. Finalmente, se procedió con la evaluación de los prototipos y a través de la obtención de curvas de polarización, medición de la producción de hidrógeno, y comparación de su desempeño con un electrolizador comercial.

Box 6

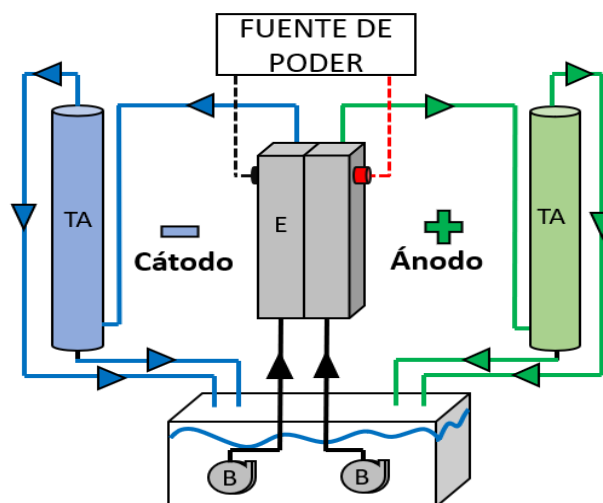


Figura 5

Esquema de arreglo experimental para la generación y cuantificación de hidrógeno/oxígeno, formado por el electrolizador [E], tanques de almacenamiento [TA], mini bombas de agua [B] y fuente de poder.

Resultados

Caracterización del electrolizador comercial

Con la finalidad de tener datos de referencia para validar los resultados de la evaluación del desempeño de los prototipos de electrolizadores, se llevó a cabo la caracterización de un electrolizador comercial de marca genérica y se comparó con los datos proporcionados por el proveedor. Como se puede ver en la **Figura 6**, el valor más alto de corriente fue obtenido en el en el intervalo de potencial de 1.7 a 2.4 V. Estos valores de corriente pueden variar por las condiciones de operación.

Box 7

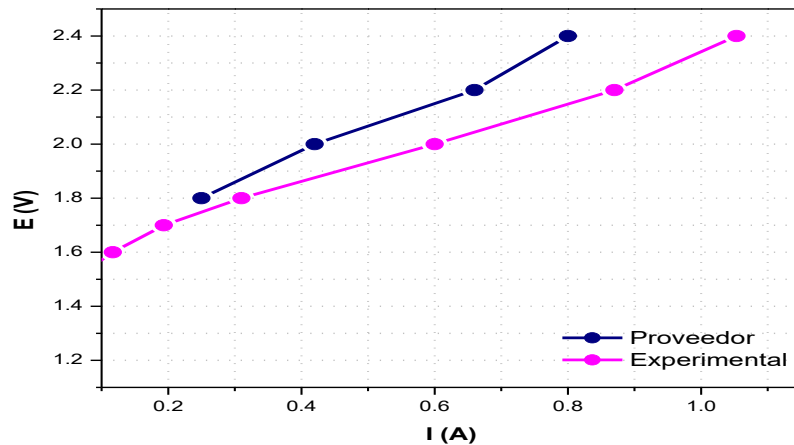


Figura 6

Comparación de las curvas de polarización del electrolizador comercial.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, es importante mencionar que el acondicionamiento de la MEA, descrito anteriormente fue fundamental para obtener un mejor desempeño del electrolizador. Por esta razón, en la **Figura 7** se muestra la curva de polarización del prototipo de pin cuadrado antes y después de su acondicionamiento. El potencial teórico necesario para romper la molécula del agua es 1.23 V; sin embargo, experimentalmente esto no ocurre, debido a contribuciones por pérdidas de activación, óhmica y de concentración. Como se puede observar en el intervalo de 1.4 V a 1.7 V se muestra la contribución de las pérdidas de activación asociadas con las energías de activación de formación para las reacciones de hidrógeno y oxígeno sobre la superficie de los electrodos. De 1.7 V a 2.4 V se observa la contribución de pérdidas óhmicas que relaciona la suma de la resistencia eléctrica de algunos componentes como electrodos, transferencia iónica en el electrolito, resistividad de la membrana y a la resistencia por el transporte relacionada con las burbujas de gas.

Box 8

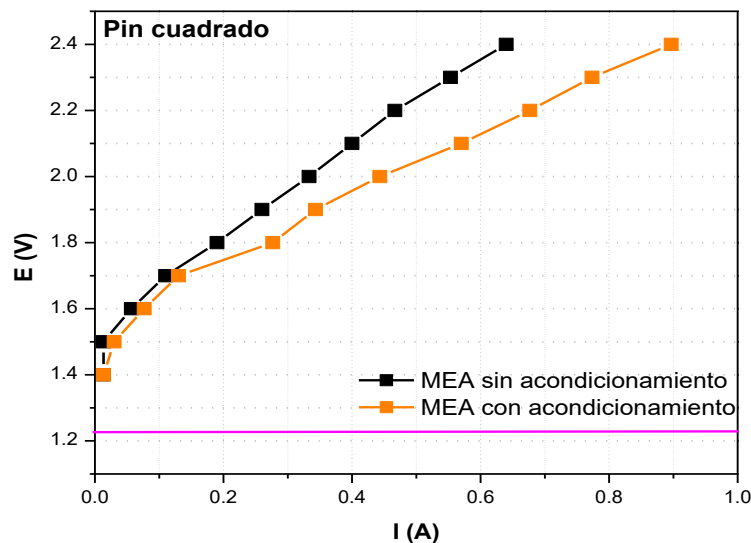


Figura 7

Comparación de las curvas de polarización con y sin acondicionamiento.

Como se puede apreciar, la curva de polarización con acondicionamiento de la MEA mostró un mejor desempeño, para 2.4 V se obtuvo 0.89 A, mientras que la densidad de corriente obtenida para el electrolizador o MEA sin acondicionamiento fue de 0.64 A, bajo el mismo potencial de 2.4 V. Esto demuestra la importancia del acondicionamiento, ya que a mayores densidades de corriente se produce una mayor cantidad de hidrógeno.

En la **Figura 8** se muestra la comparación de las curvas de polarización de los dos prototipos de electrolizador y un electrolizador comercial con pines circulares. Comparando el prototipo con campo de flujo de pines circulares con el electrolizador comercial, se aprecian comportamientos similares, sin embargo, el electrolizador comercial muestra un mejor desempeño, debido a que las características fisicoquímicas del ensamble membrana/electrodos son de otro fabricante. Es importante mencionar que las pruebas se realizaron por triplicado.

Box 9

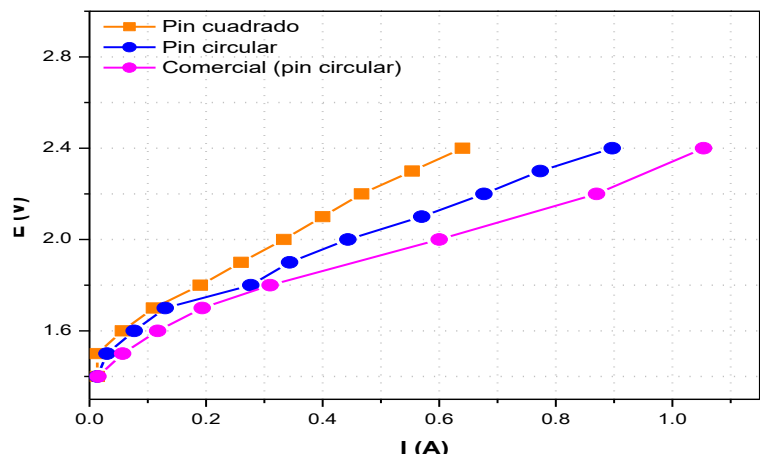


Figura 8

Comparación de las curvas de polarización de los prototipos con el electrolizador comercial.

Asimismo, en la **Figura 9** se presenta la comparación de producción de hidrógeno de los prototipos con el electrolizador comercial. En todos los potenciales aplicados, se observa una mayor producción de H₂ con el prototipo de pines circulares, ya que desde un potencial de 1.7 V comenzó a generar casi 3 veces más hidrógeno que el diseño comercial y 2 veces más que el diseño con pines cuadrados. Para potenciales por encima de los 2 V el electrolizador comercial y el prototipo de pines cuadrados comenzaron a generar más hidrógeno; sin embargo, el prototipo con pines circulares continuó produciendo más hidrógeno que los otros dos diseños. Las diferencias entre el desempeño del prototipo de pines circulares con el electrolizador comercial pueden atribuirse a que este último no cuenta con un campo de flujo de pines ni emplea mallas de titanio, sino que contiene láminas de titanio con perforaciones circulares y además la MEA es de otro fabricante.

Box 10

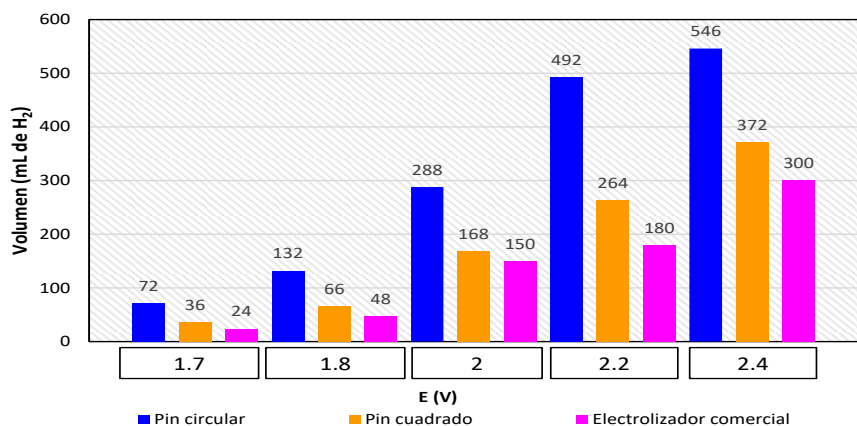


Figura 9

Producción de hidrógeno de los prototipos y el electrolizador comercial a diferentes potenciales durante un tiempo de 10 minutos.

Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo el ensamble, caracterización y evaluación del desempeño de dos prototipos de electrolizadores de membrana de intercambio protónico con distinto campo de flujo y se realizó una comparación con un electrolizador comercial. A partir de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- El acondicionamiento del ensamble membrana/electrodos es un procedimiento fundamental para alcanzar la máxima eficiencia de producción de hidrógeno de un electrolizador tipo PEM.
- El prototipo de electrolizador con campo de flujo de pines circulares mostró un mejor desempeño y una mayor cantidad de mililitros de H₂ producidos [546 mL] que el prototipo con campo de flujo de pines cuadrados [372 mL]. Esto ocurrió debido a que la forma circular de los pines ayudó a evitar la acumulación de burbujas debajo de los mismos y la obstrucción de zonas activas que impedían la conversión electroquímica de especies; por lo tanto, se logró producir mayor cantidad de hidrógeno por unidad de área.
- Al comparar los desempeños de los prototipos con el electrolizador comercial se observó un mejor desempeño para los primeros; sin embargo, para validar la comparación de campos de flujo es necesario que los ensambles membrana/electrodos sean del mismo fabricante, y en el caso del electrolizador comercial se desconocen sus características.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Sierra-Grajeda, Juan Manuel: Contribuyó en el planteamiento de la propuesta, aportación de materiales y redacción del documento.

Figuroa-Ramírez, Sandra Jazmín: Contribuyó en el desarrollo experimental, análisis y discusión de los resultados, revisión del documento.

Flores-Chan, José Enrique: Contribuyó en la revisión del desarrollo experimental y revisión de metodología experimental.

Mandujano-Ramírez, Humberto Julián: Contribuyó en la revisión del desarrollo experimental y revisión de resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles a solicitud en el correo: jsierra@pampano.unacar.mx

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios y materiales adquiridos a través del Proyecto “Integración de Redes Temáticas de Colaboración Académica Convocatoria 2015” de PRODEP.

Abreviaturas

MEA	Ensamble membrana/electrodos, por sus siglas en inglés
PEM	Membrana de Intercambio Protónico, por sus siglas en inglés

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo otorgado por PRODEP a través del Proyecto “Integración de Redes Temáticas de Colaboración Académica Convocatoria 2015” por los materiales adquiridos con en este proyecto.

Referencias

Antecedentes

[1] International Energy Agency. [2021]. [Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector](#). IEA.

[2] Energy Institute. [2023]. [Statistical Review of World Energy 2023](#).

Básicos

[3] Zhang, L., Qi, F., Ren, R., Gu, Y., Gao, J., Liang, Y., Wang, Y., Zhu, H., Kong, X., Zhang, Q., Zhang, J., & Wu, L. [2025]. [Recent advances in green hydrogen production by electrolyzing water with anion-exchange membrane](#). Research, 8, Article 0677.

Soporte.




[4] Keçebaş, A., Kayfeci, M., & Bayat, M. [2019]. [Electrochemical hydrogen generation](#). En Hydrogen Production [pp. 299-315]. Elsevier Inc.




[5] Zerrougui, I., Li, Z., & Hissel, D. [2025]. [Investigating bubble impacts on PEM electrolysis performance through enhanced multiphysics modeling](#). International Journal of Hydrogen Energy, 98, 626–638.




Estudio de uña humana in vivo empleando espectroscopia Raman Confocal




In vivo study of human nail using confocal Raman spectroscopy

Urrieta-Almeida, Edgar *^a, Flores-Gil, Aarón^b, De la Cruz-May, Lelio^c y Patiño-Carachure, Cristóbal^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen, •  0000-0003-1668-1966, •  785442

^b  Universidad Autónoma del Carmen, •  0000-0002-2302-2056 •  121166

^c  Universidad Autónoma del Carmen, •  0000-0003-3918-0582 •  75160

^d  Universidad Autónoma del Carmen, •  0000-0002-1436-1258 •  226327

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.53.61>

Área: Física-Matemáticas y Ciencias de la Tierra.

Campo: Física.

Disciplina: Ciencia y Tecnología de los Materiales.

Subdisciplina: Propiedades de los Materiales

Key Handbooks

La técnica de Espectroscopia Raman tiene la versatilidad para estudiar muestras in-vivo, por ejemplo, la piel y uña del dedo índice humano. Dado que los seres humanos tienen la misma conformación molecular, pero a distintas concentraciones. Lo que define que un espectro Raman es intrínseco de cada individuo, como una huella dactilar, aunque a simple vista sean muy semejantes. El Equipo para espectroscopía Raman Confocal ERC tiene la característica de permitir tomar una muestra en 25 segundos, sin provocar dolor y sin ocasionar efectos adversos a la piel. El objetivo es medir la uña del dedo índice humano y también medir debajo de la uña para establecer que es posible hacer mediciones a través de la uña humana, en el tejido subyacente.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Urrieta-Almeida, Edgar, Flores-Gil, Aarón, De la Cruz-May, Lelio y Patiño-Carachure, Cristóbal. 2025. Estudio de uña humana in vivo empleando espectroscopia Raman Confocal. 53-61. ECORFAN.

* ✉ [\[990615@mail.unacar.mx\]](mailto:990615@mail.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



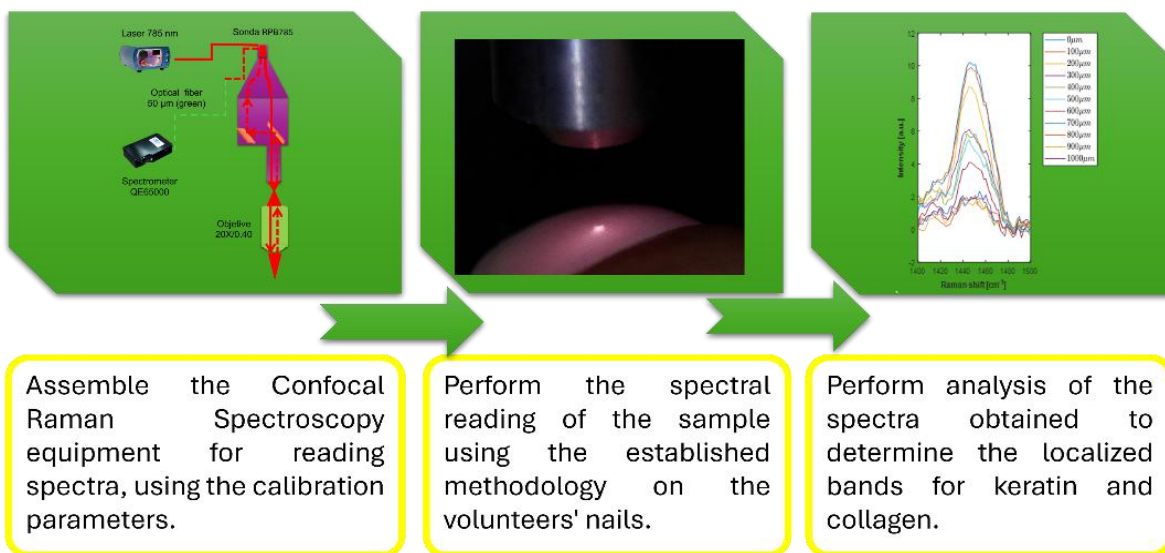
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee **MARVID**[®]- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

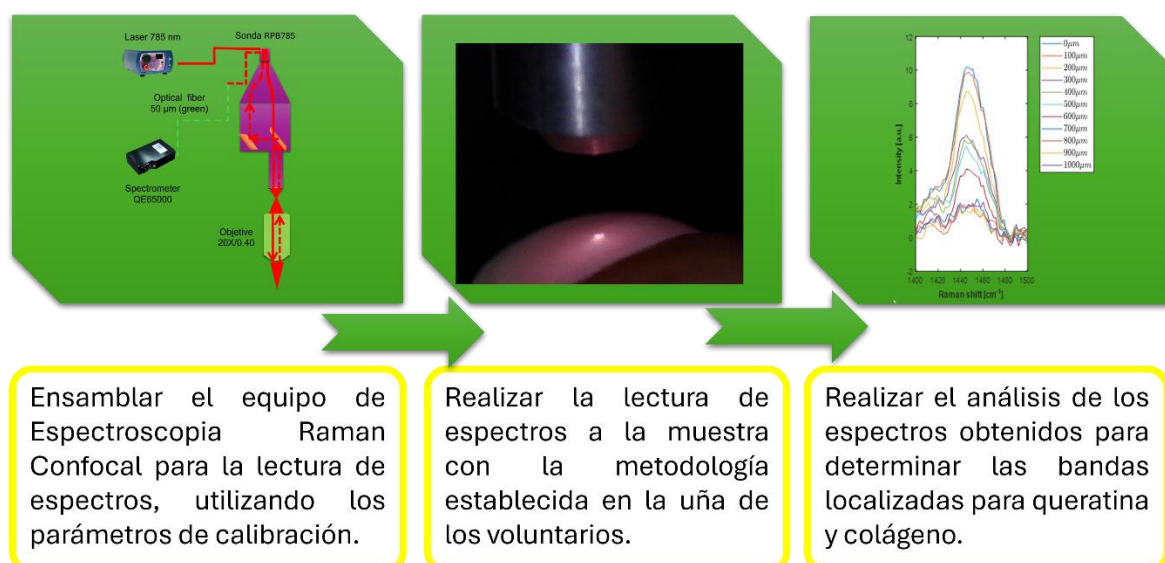
Biomarkers in research are important for detecting abnormalities in the human body's biochemical processes, in the case of diseases such as diabetes, obesity, cancer, among others. Confocal Raman spectroscopy [CRS] technology allows readings to be taken through translucent materials, which is why measurements were taken on the human fingernail. CRS allows for the study of biomarkers in biological samples in vivo, contactlessly, painlessly, and in real time. The CRS consists of a 785 nm Raman laser, an Ocean-Optics QE65000 spectrometer, a microscope mount, and a 50-micron pinhole optical fiber. Spectral sampling was performed at different depths, up to 1000 microns, on the fingerprint and nail of the index finger of a human volunteer. Data was obtained from the underlying tissue of the human index fingernail.



Confocal Raman spectroscopy, biomarkers, index finger, in vivo samples, human nail

Resumen

Los biomarcadores en el ámbito de la investigación son importantes para la detección anomalías en los procesos bioquímicos del cuerpo humano, para el caso de enfermedades como la diabetes, la obesidad, el cáncer, entre otras. La Tecnología de espectroscopía Raman Confocal [ERC] permite tomar lecturas a través de materiales translucidos lo que motivo a medir sobre la uña humana. La ERC permite estudiar biomarcadores en muestras biológicas in-vivo, sin contacto, sin dolor, y en tiempo real. El ERC, consta de un equipo láser Raman a 785 nm, un espectrómetro QE65000 de Ocean-Optics, una montura tipo microscopio, y una fibra óptica como pin-hole de 50 micras. El muestreo espectral se realizó a diferentes profundidades, hasta 1000 micras, en la huella y uña del dedo índice de un voluntario humano. Se obtuvieron datos del tejido subyacente de la uña del dedo índice humano.



Espectroscopía Raman Confocal, biomarcadores, dedo índice, muestras in-vivo, uña humana

Introducción

La piel y la uña humanas se conforman principalmente de queratina y de colágeno respectivamente, igualmente el cabello está conformado por 90% de queratina, así como la capa externa de la piel hasta en un 80 %. La capa interna de la piel es la dermis, que se constituye además de colágeno, de elastina que es otra cadena peptídica que le proporcionan la elasticidad y estructura. La melanina es otra proteína presente en la epidermis que es responsable de la pigmentación de la piel [Wortsman, 2018]. En el presente trabajo se expone un análisis espectral cualitativo para la distribución y concentración de colágeno y queratina, en la uña del dedo índice.

Las proteínas tienen cierta estructura características, debido a los enlaces químicos entre las cadenas peptídicas que las conforman, estos son del tipo, puentes de hidrógeno, puente sulfuro, también el tipo de enlace que conecta los aminoácidos se denominan grupos Amida, que el grupo amida tipo I aplica para la queratina y el colágeno, entre otras proteínas que se encuentran en la piel. Por tanto, no es viable identificar las proteínas con puentes tipo Amida I, dado que la señal Raman está superpuesta por el origen común del rango espectral. Sin embargo, para este estudio se analizan las bandas espectrales de 935 cm^{-1} que corresponde a el enlace estructural carbón-carbón C-C, que son característicos del colágeno [Martinez et al., 2019] y la banda 1450 cm^{-1} que corresponde a los enlaces $-\text{CH}_2$, característicos de la queratina [Essendoubi et al., 2019]. Los espectros Raman de la queratina y colágeno tiene muchas más bandas espectrales, incluso que son compartidas como el grupo amida I, que se sabe también es común en otros tipos de proteínas. La melanina comparte las bandas espectrales descritas anteriormente, no así el tipo amida I, sin embargo, esta proteína solo está presente en la epidermis y su banda características son 1368 cm^{-1} y 1572 cm^{-1} [Huang et al., 2004], que no influyen en las bandas estudiadas.

La Espectroscopia Raman [ER] en general se emplea para el estudio de muestras in-vivo, como in-vitro y ex-vivo. Con el fin de interpretar el comportamiento bioquímico del sistema humano, como es el caso del análisis de lunares in-vivo mediante el análisis de la melanina [Huang et al., 2004]. El análisis de células bronquiales sanas y con diagnóstico de cáncer para analizar concentraciones de glucosa y fructuosa, en células in-vitro, . Estudio de la degradación del cartílago utilizando muestras ex-vivo, con el fin de contribuir al diagnóstico de la osteoartritis [Gaifulina et al., 2021]. También en un trabajo previo para la determinación de glucosa en muestras in vivo [Flores et al., 2015].

La metodología Raman, abre un panorama extenso para el diagnóstico de enfermedades, así también para la caracterización de materiales inertes, es una herramienta versátil, para la obtención de datos, no es invasivo ni destructivo, y requiere de segundos para la toma de espectros. Con un análisis cualitativo es posible dar una interpretación temprana, con el debido conocimiento de la muestra que se está estudiando.

La Espectroscopia Raman [ER] es una técnica que permite obtener información molecular de un material, en estado sólido, líquido o gas, ya sea orgánico o inorgánico. Realizar un análisis ER significa hacer incidir un haz de luz monocromático sobre una muestra, recolectar la luz dispersada con el espectrómetro. El haz de luz interactúa con la estructura molecular que constituyen la muestra, provocando cambios del estado vibracional que conlleva a cambios en la frecuencia de la luz dispersadas. La sección de haz de luz dispersada que contiene la información Raman se conoce como dispersión inelástica. La importancia para analizar materiales o sustancias es que los pequeños cambios de frecuencia son propios e individuales para cada material [Smith & Dent, 2005].

Espectroscopía Raman

El haz de luz monocromática incide sobre la muestra, dependiendo del estado de la muestra pueden existir reflexión, transmisión, absorción y dispersión. La dispersión puede ser elástica o inelástica. Es la dispersión inelástica la que contiene la información para ER.

Un haz de luz es un conjunto de fotones, los fotones tienen energía de acuerdo con el valor de su frecuencia $E = h\nu$ [donde h es la constante de Plank], los fotones interactúan con la estructura molecular de la muestra provocando cambios vibraciones, la energía de un fotón absorbido suministra dicha energía para pasar a un nivel mayor energético que se denomina excitación [Drake, 2023]. Al perder la excitación la molécula desprende un fotón con una frecuencia relativamente diferente a del haz de luz incidente.

Estando una molécula en su estado base, un fotón incide y es absorbido, lo que excita la molécula en forma inelástica a un nivel mayor de energía virtual. Posteriormente, retrocede a un nivel de energía entre el nivel virtual y al estado base, lo que se conoce a Raman Stokes, liberando un fotón con frecuencia y energía ligeramente diferente al haz incidente. Si retorna del nivel virtual al estado base, se denomina dispersión Rayleigh. En cambio, si inicialmente la molécula no se encuentra en el estado base, al pasar al estado excitado y retorna al estado base se denomina dispersión Anti-stokes.

Los cambios en Raman dependen de la frecuencia natural de vibración. La frecuencia depende de la masa de la molécula. Para molécula pesada, tiene longitud de onda largo, baja frecuencia y energía. Para molécula ligera, tiene longitud de onda corta, frecuencia y energía elevada. Las Moléculas complejas tienen mayor número de modos de vibración. Cada molécula tiene su propia frecuencia natural. El espectro Raman es una huella digital de las moléculas [Smith & Dent, 2005].

Anatomía de uña y piel

Las muestras de espectro se realizan sobre la huella y sobre la uña del dedo índice. La epidermis es un estrato celular compacto que mide 120-200 μm , con diferencias regionales según función de la piel. La dermis es entre 15 a 40 veces más gruesa que la epidermis. La uña tiene un grosor entre 500 y 600 μm . En el presente trabajo se están haciendo lecturas desde la superficie hasta 10 pasos internos de 127 μm , es decir hasta 1270 μm al interior de la huella y uña [Conejo-Mir et al., 2018]. Ver figura 1 y 2.

Box 1

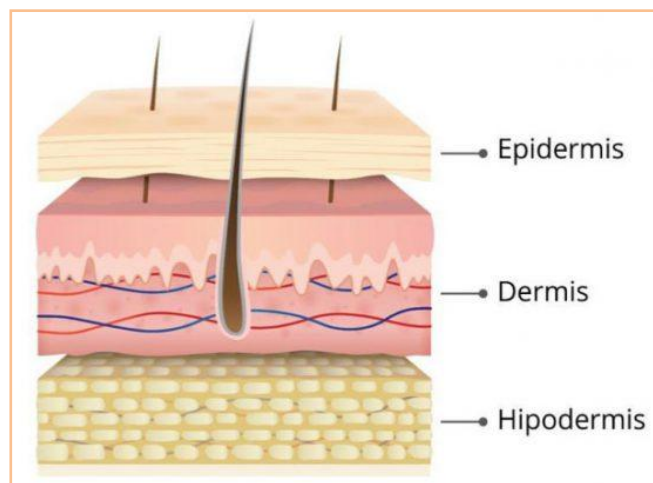


Figura 1

Anatomía de la piel.

Fuente [Manual de Dermatología, ISBN: 978-84-7885-627-5]

Box 2

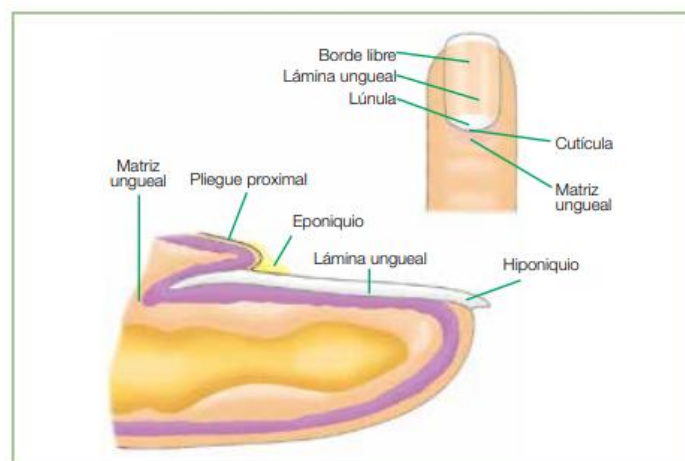


Figura 2

Anatomía de la uña

Fuente [Manual de Dermatología, ISBN: 978-84-7885-627-5]

Resultados

La calidad de los espectros se interpreta cualitativamente, analizando la tendencia de las bandas a un decaimiento exponencial de la intensidad conforme la profundidad de muestreo aumenta. El voluntario debe permanecer inmóvil para que las lecturas sean consistentes y conserven la tendencia de atenuación suave. Un punto importante en la calidad de los espectros, debido a las distintas capas de la piel o de la uña que se comporta como un medio, no homogéneo y por ende con distintos índices de refracción en el camino óptico de los fotones con información Raman que viajan desde la muestra en dirección al detector.

Los espectros obtenidos son consistentes y reproducibles lo que permite tener una base sólida para realizar un primer análisis cualitativo, así como una base de datos confiable. En la Figura 3, se presentan los espectros obtenidos para uña del voluntario V1 Figura 3a y del voluntario V2D Figura 3b, que tiene diagnóstico de diabetes tipo 2 controlado.

Los espectros de uña permiten realizar un análisis rápido, que con los espectros de huella no es posible, debido a la fluorescencia por la humectación de la piel. Los espectros de uña se recortan en las bandas características para la queratina y colágeno. En este sentido los espectros de uña son más claros dado que la uña está conformada por queratina en un 80%, lo que al tomar lecturas a profundidad más allá del grosor de la uña permite tomar lecturas del colágeno que conforma la piel por debajo de la uña. El ensamble óptico utilizado que está publicado en el trabajo previo, [Urrieta et al., 2025], en el cual se detallan las características del ensamble del equipo y la metodología para la toma de muestras.

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos respecto a las bandas de queratina y colágeno las proteínas constituyentes mas importantes de la uña y de la piel humana.

Box 3

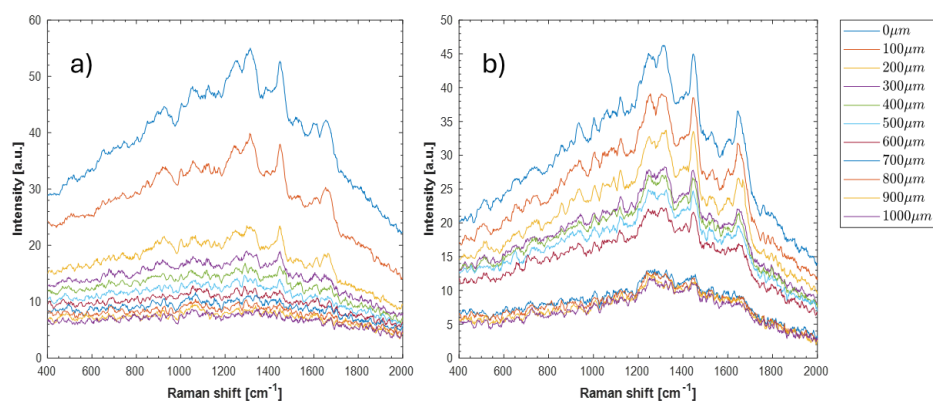


Figura 3

Espectros obtenidos de dos voluntarios, sin procesar, a) espectros de uña de voluntario V1 b) espectros de uña de voluntario V2D.

La banda de 1450 cm^{-1} para la queratina, se analizó cualitativamente a través de la determinación de los puntos máximos, para determinar su evolución conforme la profundidad de lectura aumenta. En la Figura 4, en la uña se tiene espectros más definidos en la banda de 1450 cm^{-1} . Los máximos si están muy definidos y son coincidentes para realizar el análisis, que con el espectro de huella no es posible.

Box 4

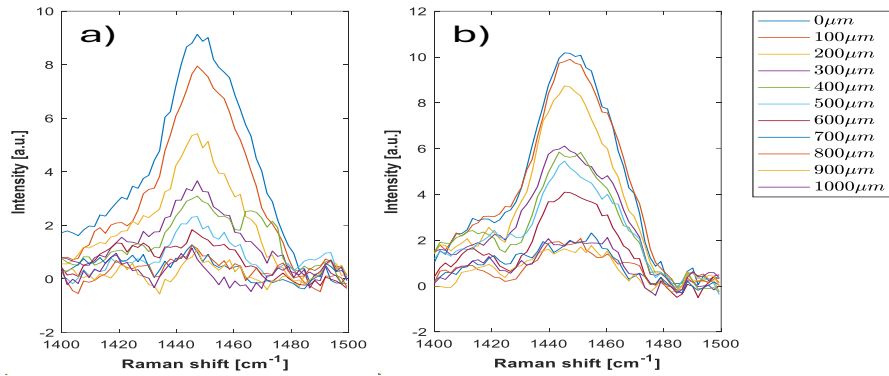


Figura 4

Banda 1450 cm^{-1} de los espectros obtenidos de dos voluntarios a) espectros de uña de voluntario V1 b) espectros de uña de voluntario V2D.

La banda de 935 cm^{-1} , para el colágeno, se analizó cualitativamente a través de la determinación de los puntos máximos, para determinar su evolución conforme la profundidad de lectura aumenta. En la Figura 5, en la uña del voluntario V1 se tiene espectros definidos. Para el caso de la figura V2D, los espectros se observan con un poco de ruido, sin embargo, es posible realizar el análisis de atenuación.

Esto se puede deber a que la uña diabética tiene pérdidas en su estructura debido a la descalcificación.

Box 5

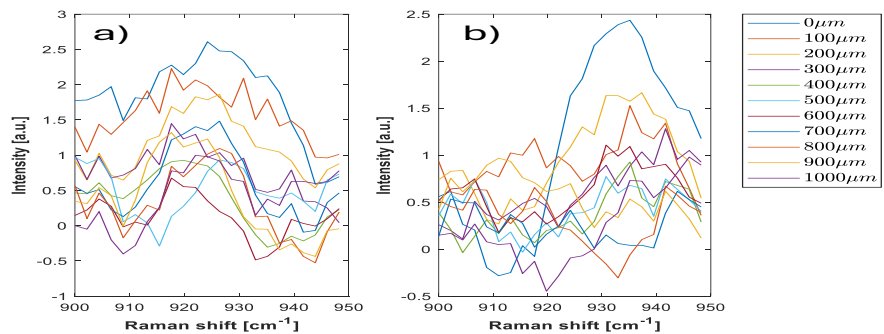


Figura 5

Banda 935 cm^{-1} de los espectros obtenidos de dos voluntarios a) espectros de uña de voluntario V1 b) espectros de uña de voluntario V2D.

Fuente [Autoría propia]

Análisis

En el análisis de atenuación, se generaron 2 gráficas donde se muestra la intensidad de las bandas conforme la profundidad de lectura aumenta, por tanto, se espera de una caída de intensidad debido al camino óptico de los fotones hacia el detector, perdiendo intensidad debido al recorrido a través de la piel y de la uña. Para la banda de 1450 cm^{-1} , en la Figura 6a, hay puntos de inflexión a 400 y 800 micras, lo que sugiere que son las transiciones de las capas de la uña para el caso de V2D, en cambio para la uña V1 las transiciones son las mismas, pero sin el aumento de intensidades intermedias. Aproximadamente el grosor de la uña es de 400 micras. Se puede inferir que la calidad de la uña diabética es baja y eso permite que la señal Raman no pierda intensidad, por eso es observable un aparente aumento de intensidad entre transiciones. Para la uña V1 la atenuación es uniforme.

En la banda 935 cm^{-1} , en la Figura 6b, se observa que las intensidades son mucho menores, sin embargo, hay una tendencia rápida en la caída de intensidad hasta los 500 a 600 micras, dado que esta banda es característica del colágeno que la uña no tiene, se observa un aumento de intensidad a partir de ese punto de inflexión. Para el caso de la uña diabética el aumento es menor, pero es posible visualizar las transiciones.

Box 6

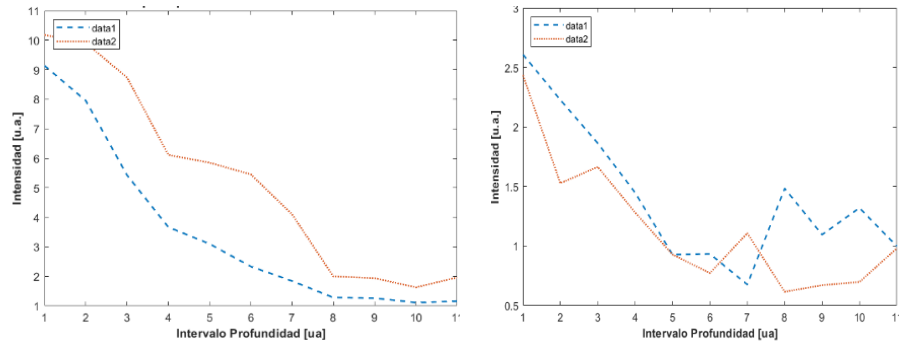


Figura 6

Graficas de atenuación de los espectros obtenidos de dos voluntarios a] para la banda de 1450 cm^{-1} , característica de queratina b] para la banda de 935 cm^{-1} , característica de colágeno.

Fuente [Autoría propia]

Conclusiones

La espectroscopia Raman confocal permite obtener los espectros para distintas profundidades, donde es claro que existe información, que es posible analizar con simple análisis cualitativo. Lo cual es útil para el estudio de biomarcadores.

El conjunto de espectros Raman obtenidos, son consistentes, reproducibles e intrínsecos, por tanto, es viable obtener las correlaciones de la diversidad de componentes moleculares [biomarcadores], con las condiciones fisiológicas y patológicas humanas.

El análisis de atenuación permite correlacionar los puntos de transición con el grosor de las distintas capas de la uña y de la piel.

Se reduce el tiempo de integración y potencia a través del sistema confocal, que con sistemas de espectroscopia Raman estándar. Permitiendo con ello potencias muy por debajo de la norma internacional ANSI [100 mW]. En nuestro caso, con potencia de 25 mW, y tiempos de integración de 25 segundos se obtienen espectros de buena calidad espectral.

Para el caso de los espectros de la uña se pudo observar deconvolución de las bandas de 1450 cm^{-1} , y 935 cm^{-1} , que es de suma importancia, dado que se obtiene información directamente del muestreo sin necesidad de realizar aproximaciones mediante análisis numérico. Lo cual permite realizar análisis para trabajos futuros sobre otras bandas importantes de la uña y de la piel humanas para identificación de biomarcadores.

Declaraciones

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses. No tiene intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el artículo del que se informa en este capítulo.

Contribución de los autores

Urrieta-Almeida, Edgar: Elaboración del presente documento

Flores-Gil, Aarón: Apoyo en el desarrollo del proyecto y en la redacción del documento.

De La Cruz-May, Lelio: Apoyo en el desarrollo del proyecto y en la redacción del documento.

Patiño-Carachure, Cristóbal: Apoyo en el desarrollo del proyecto y en la redacción del documento.

Disponibilidad de datos y materiales

La información contenida en este documento está disponible previa solicitud expresa del autor principal.

Financiación

Programa de Becas SECIHTI, para el alumno de doctorado Edgar Urrieta Almeida. Los profesores, Aarón Flores Gil, Lelio de La Cruz May, Cristóbal Patiño Carachure, los cuales cuentan con apoyo PRODEP, docentes de la Universidad Autónoma del Carmen.

Agradecimientos

Se agradece al programa de Doctorado en ciencias de la ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen y los profesores Aarón Flores Gil, Lelio de La Cruz May, Cristóbal Patiño Carachure, por la asesoría para el desarrollo del proyecto.

Referencias

Antecedentes

Aarón Flores, Magdalena Bandala, Manuel May Olena Benavides, Lelio de la Cruz May, Jorge Luis Díaz López. [2015]. Aplicación de la espectroscopía Raman para determinar la presencia de glucosa en muestras in vivo. SOMI.

Conejo-Mir, J., Jiménez, J. C. M., & Martínez, F. M. C. [2018]. [Manual de dermatología](#). Grupo Aula Médica S.L.

Drake, G. W. F. [Ed.]. [2023]. [Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics](#). Springer International Publishing.

Essendoubi, M., Meunier, M., Scandolera, A., Gobinet, C., Manfait, M., Lambert, C., Auriol, D., Reynaud, R., & Piot, O. [2019]. [Conformation changes in human hair keratin observed using confocal Raman spectroscopy after active ingredient application](#). *International Journal of Cosmetic Science*, 41[3], 203-212.

Gaifulina, R., Nunn, A. D. G., Draper, E. R. C., Strachan, R. K., Blake, N., Firth, S., Thomas, G. M. H., McMillan, P. F., & Dudhia, J. [2021]. [Intra-operative Raman spectroscopy and ex vivo Raman mapping for assessment of cartilage degradation](#). *Clinical Spectroscopy*, 3, 100012.

Huang, Z., Lui, H., Chen, X. K., Alajlan, A., McLean, D. I., & Zeng, H. [2004]. [Raman spectroscopy of in vivo cutaneous melanin](#). *Journal of Biomedical Optics*, 9[6], 1198.

Kolesov, B. A. [2017]. [Raman spectra of crystalline secondary amides](#). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 179, 216-220.

Kopec, M., & Beton-Mysur, K. [2024]. [The role of glucose and fructose on lipid droplet metabolism in human normal bronchial and cancer lung cells by Raman spectroscopy](#). *Chemistry and Physics of Lipids*, 259, 105375.

Martinez, M. G., Bullock, Anthony J., MacNeil, Sheila, & Rehman, I. U. [2019]. [Characterisation of structural changes in collagen with Raman spectroscopy](#). *Applied Spectroscopy Reviews*, 54[6], 509-542.

Smith, E., & Dent, G. [2005]. *Modern Raman spectroscopy: A practical approach*. J. Wiley.
Urrieta Almeida, E., de la Cruz May, L., Benavides, O., Bandala Garces, M., & Flores Gil, A. [2025]. [Design for Assembly of a Confocal System Applied to Depth Profiling in Biological Tissue Using Raman Spectroscopy](#). Technologies.

Wortsman, X. [2018]. [Atlas of Dermatologic Ultrasound](#). Springer International Publishing.

Básicos

American National Standards Institute [1993]. American National Standards Institute Committee for Safe Use of Lasers Z136.1, New York, United States of America.

INEGI, Estadística de defunciones registradas. Comunicado de prensa núm. 29/23. De enero a junio de 2022. INEGI [2023]

INSP. Instituto Nacional de Salud Pública. Programa Anual de Trabajo 2021. México: INSP; 2023. La prevención, tratamiento y control de la diabetes mellitus. Norma oficial mexicana NOM-015-SSA2-2010. Diario oficial, Secretaría de Salud, 23 noviembre 2010.

Soporte

Wu, D., Kukk, A. F., & Roth, B. [2023]. [Detection of melanin influence on skin samples based on Raman spectroscopy and optical coherence tomography dual-modal approach](#). *Journal of Biophotonics*, 16[8], e202300080.

Firdous, S., Nawaz, M., Ahmed, M. et al. [Measurement of diabetic sugar concentration in human blood using Raman spectroscopy](#). *Laser Phys.* 22, 1090–1094 [2012].

González-Solís, J.L., Villafan-Bernal, J.R., Martínez-Zérega, B.E. et al. [Type 2 diabetes detection based on serum sample Raman spectroscopy](#). *Lasers Med Sci* 33, 1791–1797 [2018].

González-Viveros, N., Castro-Ramos, J., Gómez-Gil, P. et al. [Quantification of glycated hemoglobin and glucose in vivo using Raman spectroscopy and artificial neural networks](#). *Lasers Med Sci* 37, 3537–3549 [2022].

Shao, J., Lin, M., Li, Y., Li, X., Liu, J., Liang, J. & Yao, H. [2012]. [In Vivo Blood Glucose Quantification Using Raman Spectroscopy](#). *PLoS ONE* 7[10]: e48127, October 25.





Discusiones





N. González-Viveros. Tesis de Doctorado, Cuantificación de hemoglobina glicosilada y glucosa in vivo usando espectroscopia Raman y redes neuronales artificiales. Tesis de Doctorado. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica [2021].





Adsorción de CO₂ en fullereno C₃₀ dopado con fósforo. Estudio DFT





CO₂ adsorption on phosphorus doped C₃₀ fullerene. DFT study

Toxqui-De La Torre, Ana Paulina ^a, Mandujano-Ramírez, Humberto Julián ^b, Flores-Chan, José Enrique^c y Martínez-Vargas, Sergio ^{* d}

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LSL-3839-2024 •  0009-0002-1103-2406 •  1322390

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  LTC-9972-2024 •  0000-0003-3714-5564 •  266189

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  LXW-4586-2024 •  0000-0003-4714-866X •  175430

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  AGW-0814-2022 •  0000-0002-2499-3970 •  100782

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.62.70>

Área: Ingeniería

Campo: Ciencias tecnológicas

Disciplina: Tecnología de materiales

Subdisciplina: Propiedades de los materiales

Key Handbooks

- Estudio computacional mediante la DFT del fullereno C₃₀ y C₂₉P dopado con fósforo utilizando el funcional PBE con el conjunto de bases 6-31G[d,p]
- Cálculo de la energía total mínima del fullereno C₃₀ y C₂₉P
- Determinación de la energía de adsorción del CO₂ en fullereno C₃₀ y C₂₉P
- Cálculo de la superficie del potencial electrostático del fullereno C₃₀ y C₂₉P
- Determinación de los orbitales moleculares de frontera LUMO y HOMO del fullereno C₃₀ y C₂₉P y su interacción con el CO₂
- Cálculo de la superficie del potencial electrostático del fullereno C₃₀ y C₂₉P en presencia del CO₂

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Toxqui-De La Torre, Ana Paulina, Mandujano-Ramírez, Humberto Julián, Flores-Chan, José Enrique y Martínez-Vargas, Sergio. 2025. Adsorción de CO₂ en fullereno C₃₀ dopado con fósforo. Estudio DFT. 62-70. ECORFAN.

* ✉ [\[smartinez@pampano.unacar.mx\]](mailto:smartinez@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

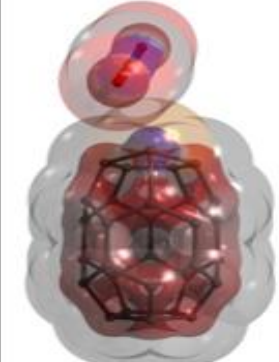
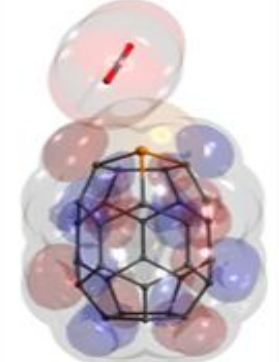

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

Fullerenes are allotropes of carbon that have hollow and closed molecular structures, such as spheres, ellipsoids or cylinders formed by carbon atoms. arranged in pentagonal and hexagonal rings. In this work we present a study of CO₂ adsorption on phosphorus-doped C₃₀ fullerene using density functional theory [DFT]. This research seeks to delve deeper into the properties of little-explored carbon structures, in addition to contributing to the understanding of the forces of intermolecular interaction between the C₂₉P and CO₂, to propose a novel alternative that could solve a highly significant environmental problem, such as the accumulation of CO₂ in the atmosphere due to the greenhouse effect.

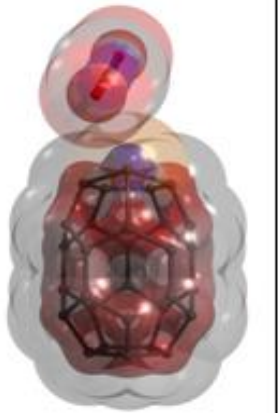
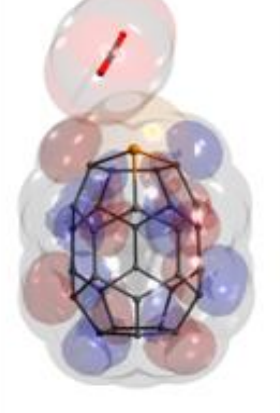
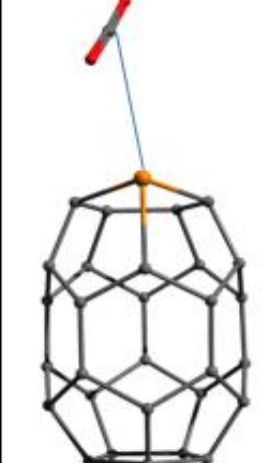
Doped Fullerene, Adsorption energy, Greenhouse gases

Objective	Methodology	Contribution
CO ₂ adsorption on C ₂₉ P for environmental applications 	DFT optimization of C ₂₉ P and CO ₂ molecular structures. Calculation of adsorption energy 	Study interactions between C ₂₉ P and CO ₂ 

Doped fullerene, Adsorption energy, Greenhouse gases

Resumen

Los fullerenos son alótopos del carbono que poseen estructuras moleculares huecas y cerradas, como esferas, elipsoides o cilindros formadas por átomos de carbono dispuestos en anillos pentagonales y hexagonales. En este trabajo se presenta un estudio de la adsorción de CO₂ en el fullereno C₃₀ dopado con fósforo [C₂₉P] usando la teoría funcional de la densidad [DFT]. Esta investigación busca profundizar en las propiedades de estructuras de carbono poco exploradas, así como a contribuir en la comprensión de las fuerzas de interacción intermolecular entre el C₂₉P y el CO₂, para proponer una alternativa novedosa que pueda resolver un problema ambiental de gran relevancia, como la acumulación de CO₂ en la atmósfera debida al efecto invernadero.

Objetivo	Metodología	Contribución
Adsorción de CO ₂ en C ₂₉ P para aplicaciones ambientales 	Optimización DFT de las estructuras moleculares de C ₂₉ P y CO ₂ . Cálculo de la energía de adsorción 	Estudio de las interacciones entre el C ₂₉ P y el CO ₂ 

Fullereno dopado, Energía de adsorción, Gases de efecto invernadero

Introducción

Los fullerenos no se limitan únicamente a la forma esférica más conocida del C_{60} ; en realidad, constituyen una amplia familia de estructuras moleculares cerradas exclusivamente por átomos de carbono. Existen numerosos tamaños y formas de fullerenos, que van desde el más pequeño C_{20} hasta mucho más grandes como C_{100} , C_{180} , C_{320} e incluso estructuras gigantes como C_{540} o C_{700} [Adhikari, 2011].

Estas variaciones en el tamaño y la forma de los fullerenos no solo enriquecen su diversidad estructural, sino que también permiten la exploración de múltiples formas de modificación, a través de diferentes tipos de dopaje. Este enfoque puede llevarse a cabo mediante el dopaje por heteroátomos, en el cual uno o más átomos de carbono de la estructura son sustituidos por otro elemento. Los fullerenos, descubiertos en la década de 1980, aún juegan un rol importante para ser aplicados en el campo de los sensores. Algunos estudios computacionales han demostrado que la actividad de los sensores depende de las interacciones entre el fullereno y el material sensor; aunque, hay muy pocos reportes al respecto y es necesario realizar más estudios [Shetti, 2021].

El uso de fullereno dopado en la adsorción de gases aún se encuentra en desarrollo [Agrawal, 2023]. El dopaje aplicado al fullereno influye directamente en sus propiedades, resultando ventajoso para su aprovechamiento en el desarrollo de nuevas tecnologías. Fullerenos C_{20} dopados han sido estudiados usando la Teoría del Funcional de la Densidad [DFT, por sus siglas en inglés] para calcular sus propiedades electrónicas y ópticas [Dheivamalar, 2015]. Un estudio realizado por simulaciones con la DFT de la geometría y de la energía de adsorción del fullereno C_{60} dopado con fósforo sugiere que es un adsorbente ideal para la remoción de CO_2 [Khan, 2020]. Paul y colaboradores han realizado estudios teóricos a cerca del fullereno C_{30} y sus análogos dopados con boro, aluminio, nitrógeno, fósforo y arsénico para determinar el efecto de estos elementos dopantes de sus diversas propiedades [Paul, 2020].

Sin embargo, existen muy pocos trabajos a cerca del fullereno C_{30} . Es por ello, que este trabajo consiste en el estudio estructural del fullereno C_{30} dopado por sustitución heteroatómica de fósforo y su interacción con el CO_2 , empleando el enfoque de la DFT, para determinar su capacidad para remover el CO_2 , el cual es un gas de efecto invernadero que retiene el calor en la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global. La geometría y la energía mínima de los fullerenos C_{30} y $C_{29}P$ en presencia y ausencia del CO_2 es optimizada a través de la DFT para determinar la energía de adsorción de CO_2 en C_{30} y en $C_{29}P$. La DFT es un método de química cuántica que consiste en calcular la estructura electrónica de sistemas moleculares, utilizando la densidad electrónica en vez de la función de onda completa del sistema.

Se basa en el concepto de que la energía de un sistema puede determinarse a partir de su densidad electrónica. Esta teoría logra un nivel de precisión alto a un costo computacional relativamente bajo. Sin embargo, a menudo requiere aproximaciones y calibraciones. Adicionalmente, el momento dipolar, la superficie de potencial electrostático, los orbitales moleculares de frontera HOMO-LUMO y la brecha energética entre ellos, fueron calculados para comprender más a fondo la interacción intermolecular [adsorción] del CO_2 con el $C_{29}P$ y el C_{30} .

Metodología

Diseño y construcción de diferentes estructuras moleculares. Las estructuras de fullerenos se diseñaron mediante la construcción de un barril compuesto por átomos de carbono con enlaces simples y dobles. A diferencia de un fullereno común, que es esférico, el C_{30} está compuesto por 12 pentágonos y 5 hexágonos. El diseño se logró a través de la construcción de las estructuras de fullerenos C_{30} y la sustitución de un átomo de carbono por uno de fósforo para formar la estructura $C_{29}P$, también se construyó la molécula de CO_2 y se optimizaron con el funcional PBE, con el conjunto de bases 6-31G[d,p] con corrección de dispersión D3BJ. Los cálculos se realizaron con ORCA [Neese, 2012] paquete de programas de química cuántica *ab initio* desarrollado por el grupo de investigación de Frank Neese del Instituto Max-Planck, Ruhr, Alemania. La optimización de la estructura en presencia de CO_2 usando la DFT se realizó con ORCA 4.2.1 [Neese, 2022; Neese, 2025]. Inicialmente, se optimizó la estructura diseñada de C_{30} y $C_{29}P$ para determinar la energía mínima de las geometrías más estables. También se determinó el error asociado a la superposición de conjuntos de base [BSSE, por sus siglas en inglés].

Posteriormente, se calculó la energía mínima de interacción de los fullerenos con CO₂ y, finalmente, la energía de adsorción del CO₂ sobre las estructuras C₃₀ y C₂₉P se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación [Khan, 2020]:

$$E_{ad} = E_{C_{30}-CO_2} - [E_{C_{30}} + E_{CO_2}] + BSSE$$

Donde E_{ad} es la energía de adsorción, $E_{C_{30}-CO_2}$ es la energía mínima del C₃₀ o C₂₉P en presencia del CO₂, $E_{C_{30}}$ es la energía mínima del C₃₀ o C₂₉P y E_{CO_2} es la energía mínima de la molécula del CO₂. Además de determinar la geometría de las estructuras moleculares más estables de C₃₀, C₂₉P, CO₂ y los sistemas C₃₀-CO₂ y C₂₉P-CO₂, se determinó el momento dipolar, la superficie de potencial electrostático, el orbital molecular desocupado más bajo [LUMO, por sus siglas en inglés], el orbital molecular ocupado más alto [HOMO, por sus siglas en inglés] y la brecha energética entre los orbitales moleculares de frontera HOMO-LUMO de cada una de las estructuras.

Resultados

Las energías totales resultantes del C₃₀ y el C₂₉P fueron de -31.1 y -39.3 keV respectivamente.

La figura 1 muestra la geometría y el momento dipolar del C₃₀ [izquierda], la magnitud del momento dipolar es 0.04 Debye, debido a su simetría y estructura elipsoidal, lo que significa que la carga eléctrica está distribuida uniformemente en todo el C₃₀. Asimismo, en la figura 1 se muestra la geometría y el momento dipolar del C₂₉P [derecha], la magnitud del momento dipolar es 1.46 Debye, significativamente mayor que la del C₃₀, debido a su menor simetría y a que su estructura elipsoidal está ligeramente distorsionada por la presencia del heteroátomo dopante de fósforo.

Box 1

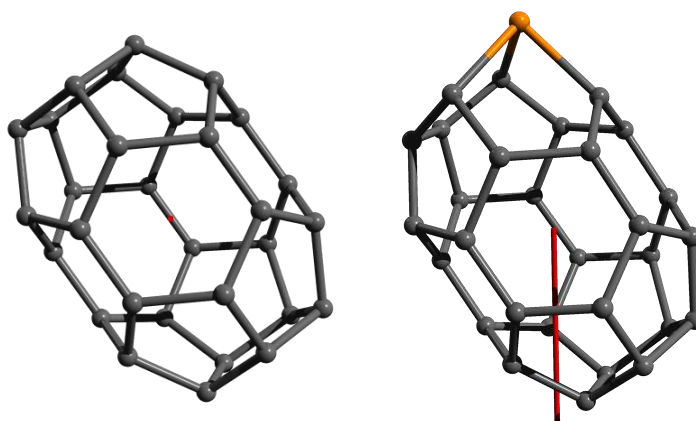


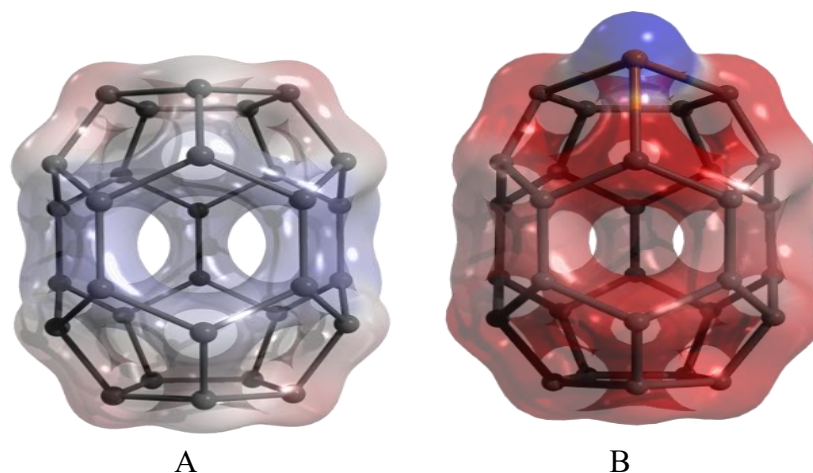
Figura 1

Geometría y momento dipolar del C₃₀ [izquierda] y del C₂₉P [derecha]

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2A se muestra el potencial electrostático de la estructura elipsoidal del C₃₀, que presenta una ligera polarización; alrededor del eje ecuatorial se encuentra cargada positivamente [color azul] y en los polos superior e inferior de la estructura se encuentra cargada negativamente [color rojo]. La figura 2B muestra la geometría elipsoidal y el potencial electrostático del C₂₉P, donde el átomo de fósforo se encuentra rodeado de tres anillos pentagonales, ubicado en uno de los polos de la estructura elipsoidal.

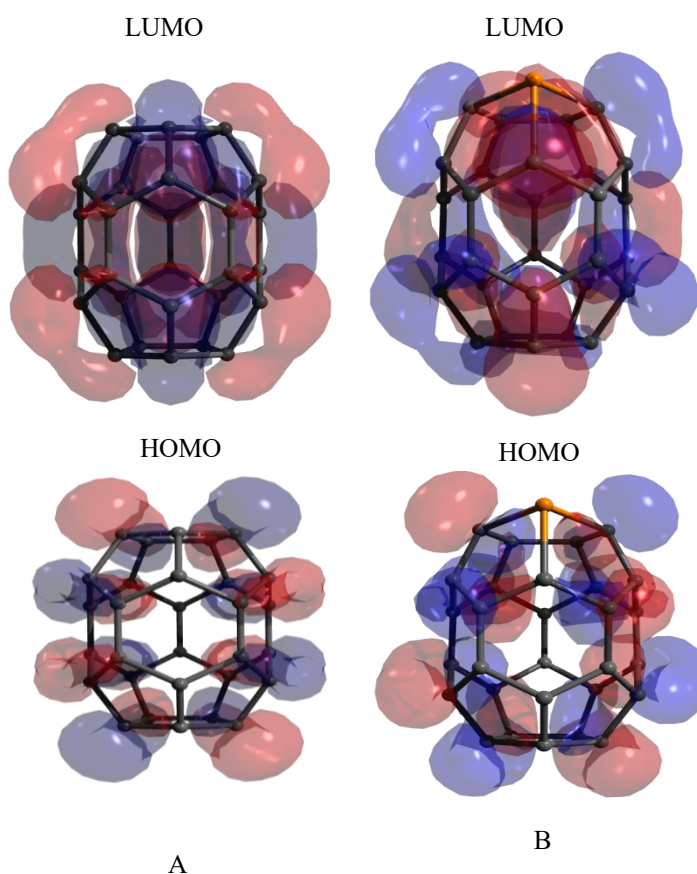
Se observa una distorsión en la geometría con respecto al fullereno prístino C₃₀ y una polarización con carga positiva [color azul] en el átomo de fósforo, mientras que los átomos de carbono presentan una densidad electrónica con carga negativa [color rojo], debido a que la electronegatividad del fósforo es ligeramente menor a la del carbono [2.19 y 2.55 en la escala de Pauling, respectivamente].

Box 2

Figura 2

Geometría y potencial electrostático de C₃₀ [A] y C₂₉P [B]

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3A muestra el LUMO del C₃₀, que son los orbitales moleculares de menor energía vacíos, es decir, que no están ocupados por electrones y pueden aceptar electrones, y presenta una energía de -4.20 eV. También, la figura 3A muestra el HOMO del C₃₀, que representa a los orbitales moleculares de mayor energía que contiene electrones; implicando la capacidad del fullereno C₃₀ para donar electrones y su energía de -4.64 eV es de gran importancia para predecir el comportamiento en la interacción con el CO₂. Los orbitales de frontera LUMO y HOMO definen la brecha energética entre los orbitales con electrones [HOMO] y los orbitales vacíos [LUMO], que indica la mínima energía necesaria para excitar un electrón y es crucial para predecir sus propiedades electrónicas, ópticas o magnéticas, así como su reactividad química o su excitabilidad electrónica.

Box 3

Figura 3

LUMO y HOMO del C₃₀ [A] y del C₂₉P [B]

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3B muestra los LUMO del $C_{29}P$, cuya energía es -0.04 eV, observándose una notable diferencia con el C_{30} , debido a la presencia del átomo de fósforo ubicada en uno de los polos de la estructura elipsoidal del $C_{29}P$. También, la figura 3B muestra los HOMO del $C_{29}P$ con una energía de -0.50 eV, revelando una significativa diferencia con el C_{30} , debido a la presencia del átomo de fósforo ubicada en uno de los polos de la estructura elipsoidal del $C_{29}P$. La brecha energética entre los LUMO y HOMO del C_{30} y $C_{29}P$ es 0.44 y 0.46 eV respectivamente, resultando una brecha energética ligeramente menor para el C_{30} , lo que puede significar que es ligeramente más conductor.

Interacción intermolecular entre el CO_2 y los fullerenos C_{30} y $C_{29}P$.

Las energías mínimas totales de los sistemas $C_{30}-CO_2$ y $C_{29}P-CO_2$ fueron de -36.2 y -44.4 keV respectivamente. Mientras que la energía de adsorción del CO_2 en C_{30} y en $C_{29}P$ resultante fue de -0.07 y -0.15 eV respectivamente; lo que demuestra que el fullereno dopado con fósforo $C_{29}P$ es más adsorbente del CO_2 por tener la energía de adsorción más negativa [termodinámicamente más estable] que la energía de adsorción del fullereno prístino C_{30} . Comparativamente, la adsorción de CO_2 en fullereno C_{60} reportado por Khan y colaboradores es de -0.05 eV [Khan, 2020].

La figura 4A muestra la geometría y el momento dipolar del C_{30} en presencia de una molécula de CO_2 , la magnitud del momento dipolar es 0.27 Debye, debido a su simetría y estructura elipsoidal la carga eléctrica se encuentra distribuida uniformemente en todo el sistema $C_{30}-CO_2$. Asimismo, en la figura 4B se muestra la geometría y el momento dipolar del $C_{29}P$ en presencia de una molécula de CO_2 , la magnitud del momento dipolar es 6.76 Debye, considerablemente mayor que el del sistema $C_{30}-CO_2$, aunque era de esperarse que fuera mayor debido a su menor simetría y a que su estructura elipsoidal está ligeramente distorsionada por la presencia del heteroátomo dopante de fósforo.

Box 4

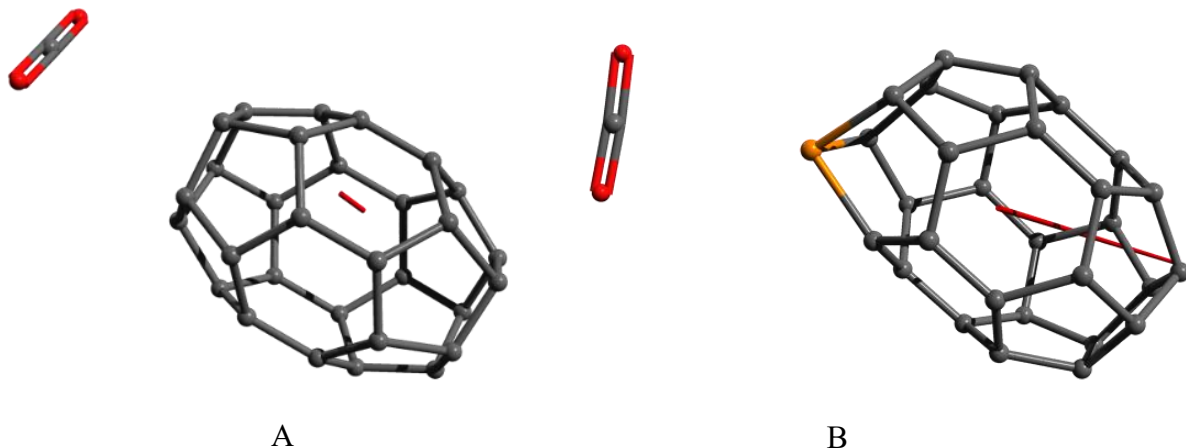


Figura 4

Geometría y momento dipolar del C_{30} [A] y del $C_{29}P$ [B] en presencia de CO_2

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5A muestra la geometría, el potencial electrostático y la superficie electrónica de Van der Waals de la estructura elipsoidal del C_{30} y el CO_2 ; se observa la interacción intermolecular entre el CO_2 y el C_{30} es débil, de tipo Van der Waals, cuya distancia entre el carbono del CO_2 y el carbono del C_{30} más cercano es de 3.2 Å.

La superficie del potencial electrostático del C_{30} está ligeramente polarizado en los polos de la estructura elipsoidal con carga negativa [color rojo] y la zona ecuatorial de la estructura elipsoidal del C_{30} presenta una carga ligeramente positiva [color azul], mientras que la molécula del CO_2 está polarizada; con carga negativa [color rojo] en los oxígenos y carga positiva en el carbono [color azul].

La figura 5B muestra la geometría, el potencial electrostático y la superficie electrónica de Van der Waals de la estructura elipsoidal del $C_{29}P$ y el CO_2 ; se observa la interacción intermolecular entre el CO_2 y el $C_{29}P$ es débil, de tipo Van der Waals, cuya distancia entre el carbono del CO_2 y el carbono del C_{30} más cercano es de 3.3 Å.

La superficie del potencial electrostático del $C_{29}P$ está polarizado en el átomo de fósforo ubicado en uno de los polos de la estructura elipsoidal con carga positiva [color azul] y la zona ecuatorial de la estructura elipsoidal del $C_{29}P$ presenta una carga negativa [color rojo], mientras que la molécula del CO_2 que se encuentra interaccionando con el átomo de fósforo del $C_{29}P$ está polarizada; con carga negativa [color rojo] en los oxígenos y carga positiva [color azul] en el carbono [color azul].

Box 5

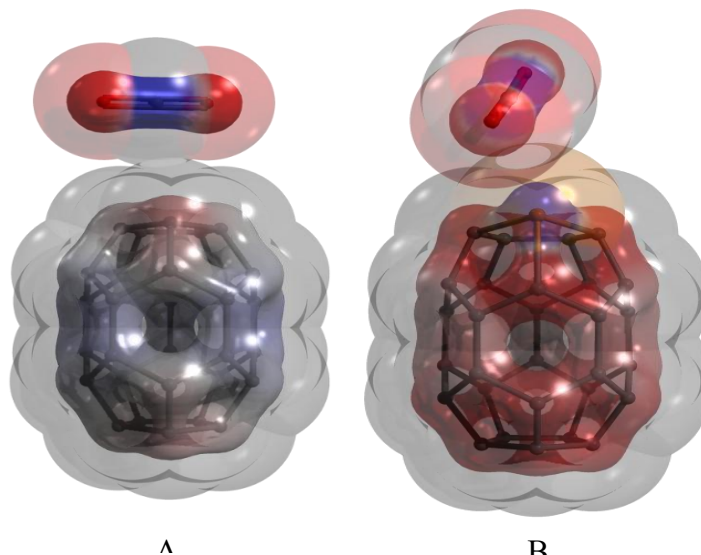


Figura 5

Geometría y potencial electrostático de C_{30} [A] y $C_{29}P$ [B] en presencia de CO_2

Fuente: Elaboración propia.

La figura 6A muestra los LUMO y HOMO del C_{30} en presencia de una molécula de CO_2 , y ostenta una energía de -4.25 y -4.68 eV respectivamente, con una brecha energética de 0.43 eV, sustancialmente similar a la del C_{30} en ausencia de la molécula de CO_2 . La figura 6B muestra los LUMO y HOMO del $C_{29}P$ en presencia de una molécula de CO_2 , con una energía de -0.12 y -0.58 eV respectivamente, lo cual advierte una diferencia relevante con respecto a la energía resultante del C_{30} , porque el átomo de fósforo se encuentra ubicado en uno de los polos de la estructura elipsoidal del $C_{29}P$.

Resultado muy parecido en esencia al $C_{29}P$ en ausencia de la molécula de CO_2 . La brecha energética entre los LUMO y HOMO del fullereno $C_{29}P$ en presencia de CO_2 es 0.46 eV, ligeramente mayor que el fullereno prístino C_{30} , lo que probablemente resulte en un comportamiento menos conductor.

Box 6

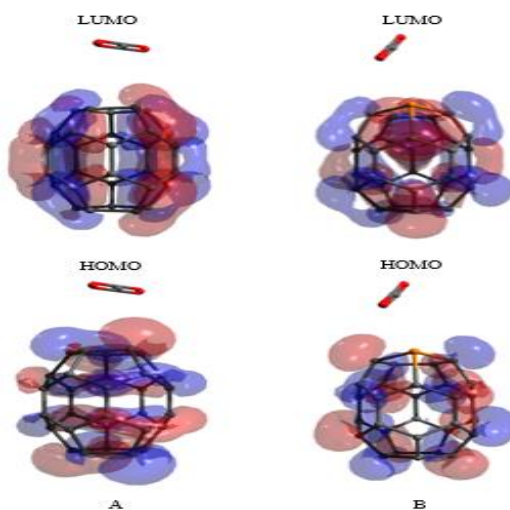


Figura 6

LUMO y HOMO del C_{30} [A] y del $C_{29}P$ [B] en presencia de CO_2 .

Conclusiones

El propósito de este trabajo fue estudiar, bajo el enfoque de la DFT, la capacidad de adsorción del CO₂ [cuyo aumento en la atmósfera es una de las causas del calentamiento global] en el fullereno C₃₀ dopado por sustitución heteroatómica de fósforo [C₂₉P] y compararla con el fullereno prístino C₃₀. Se calculó la energía de equilibrio mínima total del C₃₀ y C₂₉P en su interacción con el CO₂, correspondiente a sus geometrías más estables, para determinar la energía de adsorción de CO₂ en C₃₀ y en C₂₉P.

Encontrando que la adsorción del CO₂ en C₂₉P es sustancialmente mayor que en C₃₀, comprobando así la atribución del dopaje en el incremento de la adsorción del CO₂ en fullereno. Adicionalmente, se determinó el momento dipolar, el potencial electrostático, los orbitales moleculares de frontera LUMO y HOMO y la brecha energética entre ellos, para conocer mejor la interacción intermolecular entre el CO₂ y los fullerenos C₂₉P y C₃₀.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Toxqui-De La Torre, Ana Paulina: Estudiante de posgrado contribuyó a los cálculos.

Mandujano-Ramírez, Humberto Julián: Contribuyó a la idea del proyecto, el método y la técnica de investigación.

Flores-Chan, José Enrique: Contribuyó al método y la técnica de investigación.

Martínez-Vargas, Sergio: Contribuyó a la idea del proyecto, el desarrollo de la metodología, la técnica de investigación y la discusión de los resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles a solicitud en el correo: smartinez@pampano.unacar.mx

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Abreviaturas

BSSE	Error asociado a la superposición de conjuntos de base [BSSE, por sus siglas en inglés]
DFT	Teoría del Funcional de la Densidad [DFT, por sus siglas en inglés]
HOMO	Orbital Molecular de Mayor Energía Ocupado [HOMO, por sus siglas en inglés]
LUMO	Orbital Molecular de Menor Energía desocupado [LUMO, por sus siglas en inglés]

Referencias

Adhikari, S., & Chowdhury, R. [2011]. [Vibration spectra of fullerene family](#). *Physics Letters A*, 375[22], 2166-2170.





Agrawal, P. S., Belkhode, P. N., Brijpuriya, D. S., Gouda, S. P., & Rokhum, S. L. [2023]. [Stimulation in fullerene for adsorbing pollutant gases: a review](#). *Chemical Physics Impact*, 6, 100156.





- Dheivamalar, S., & Sugi, L. [2015]. [Density functional theory \[DFT\] investigations on doped fullerene with heteroatom substitution](#). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 151, 687-695.
- Khan, A. A., Ahmad, I., & Ahmad, R. [2020]. [Influence of electric field on CO2 removal by P-doped C60-fullerene: A DFT study](#). *Chemical Physics Letters*, 742, 137155.
- Paul, D., Deb, J., & Sarkar, U. [2020]. [A detailed DFT study on electronic structures and nonlinear optical properties of doped C30](#). *ChemistrySelect*, 5[23], 6987-6999.
- Neese, F. [2012] [The ORCA program system](#). *Wiley Interdisciplinary Reviews: Comput. Mol. Sci.*, 2[1] 73-78.
- Neese F. [2022] [Software update: The ORCA program system—Version 5.0](#), *Wiley Interdisciplinary Reviews: Comput. Mol. Sci.*, 12, e1606.
- Neese, F. [2025]. [Software update: The ORCA program system—version 6.0](#). *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*, 15[2], e70019.
- Shetti, N. P., Mishra, A., Basu, S., & Aminabhavi, T. M. [2021]. [Versatile fullerenes as sensor materials](#). *Materials Today Chemistry*, 20, 100454.





Análisis térmico-mecánico de la boquilla de agua de alimentación de un reactor de agua en ebullición-5





Thermo-mechanical analysis of the feedwater nozzle of a boiling water reactor-5

Pérez-Montejo, Salatiel *^a, Meza-Cruz, Onésimo^b, Martínez-Vargas, Sergio^c y Calan-Canche, Damián^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LYO-9195-2024 •  0000-0002-1750-0154 •  594590

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  LTD-0198-2024 •  0000-0002-0875-6852 •  488085

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  AGW-0814-2022 •  0000-0002-2499-3970 •  100782

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  U-3760-2018 •  0000-0001-6688-4468 •  415663

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.71.79>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería mecánica

Subdisciplina: Diseño mecánico

Key Handbooks

La investigación aporta al desarrollo de la Ciencia y la Tecnología mediante la aplicación del Método del Elemento Finito para analizar la integridad estructural de las boquillas de alimentación en un reactor de agua en ebullición-5, la estimación del factor de uso acumulado [CUF] bajo un escenario de 40 de operación. Esto conforme a normas y regulaciones internacionales [ASME y NUREG]. Los aspectos clave son la comprensión de los procesos de fatiga térmica y estructural, la adopción de normativas internacionales y la simulación numérica avanzada. Entre las principales conclusiones destacan que las boquillas mantienen su integridad estructural por 40 años con un CUF < 1, que existe viabilidad técnica y regulatoria para que la boquilla RFW pueda seguir operando en un periodo extendido de operación hasta 60 años. El coautor Calan-Canche cuenta con beca del SECIHTI, El coautor Martínez-Vargas tiene perfil deseable PRODEP, Pérez-Montejo y Martínez-Vargas pertenecen a sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Los autores en orden de este capítulo del libro tienen el siguiente número de citas 2, 1, 132 y 0. Todos los autores pertenecen a la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más utilizadas son: Integridad estructural, Método del elemento finito, Factor de uso acumulado.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Pérez-Montejo, Salatiel, Meza-Cruz, Onésimo, Martínez-Vargas, Sergio y Calan-Canche, Damián. 2025. Análisis térmico-mecánico de la boquilla de agua de alimentación de un reactor de agua en ebullición-5. 71-79. ECORFAN.

* ✉ [\[sperez@pampano.unacar.mx\]](mailto:sperez@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



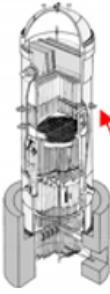
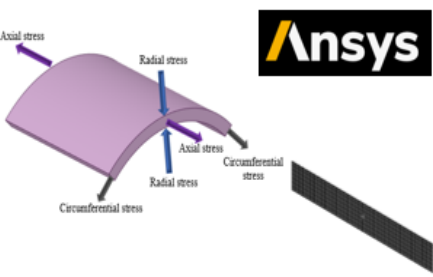
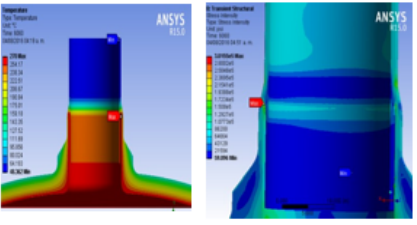
ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

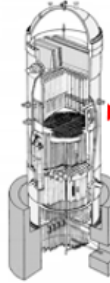
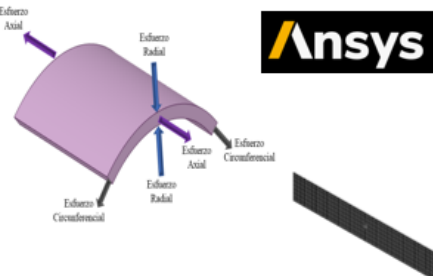
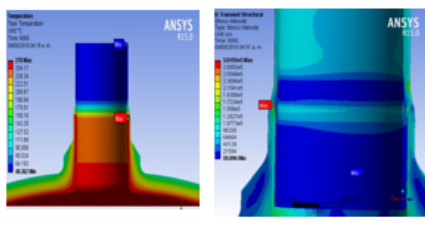
This work evaluates the structural integrity of the feedwater system nozzles of a Boiling Water Reactor-5 in the context of license renewal. Applying the ASME Code Sections III and XI, along with the regulations of the United States Nuclear Regulatory Commission [NUREG-1800, 1801, 0619], thermo-mechanical analyses were carried out using the Finite Element Method, considering temperature distribution, stress fields, and operational cycles. The cumulative usage factor [CUF] was calculated using Miner’s rule under 40- and 60-year operation scenarios. Results show that the CUF remains below 1, indicating that the nozzles can operate safely for at least 60 years. It is concluded that there is technical feasibility for extending operation, with recommendations for experimental validation.

Thermo-Mechanical Analysis of the Feedwater Nozzle of a Boiling Water Reactor-5		
Objectives	Methodology	Contribution
 <p>Feed water nozzle</p> <p>Evaluate the structural integrity</p>	 <p>ANSYS</p>	 <p>Temperature Distribution and Stress Fields</p>

Structural Integrity, Finite Element Method, Cumulative Usage Factor.

Resumen

Este trabajo evalúa la integridad estructural de las boquillas del sistema de agua de alimentación de un reactor de agua en ebullición-5, en el contexto de la renovación de la licencia operativa. Aplicando el código ASME Secciones III y XI, y las regulaciones de la Comisión Reguladora Nuclear [NRC] de los Estados Unidos [NUREG-1800, 1801, 0619], se realizaron análisis termo-mecánicos mediante el Método del Elemento Finito, considerando distribución de temperaturas, Campos de esfuerzos y ciclos operativos. Se calculó el factor de uso acumulado [CUF] usando la regla de Miner en escenarios de operación de 40 y 60 años. Los resultados muestran que el CUF se mantiene por debajo de 1, lo que indica que las boquillas pueden funcionar con seguridad hasta al menos los 60 años. Se concluye que existe viabilidad técnica para extender la operación, con recomendaciones de validación experimental.

Análisis Térmico-mecánico de la Boquilla de Agua de Alimentación de un Reactor de Agua en Ebullición-5		
Objetivos	Metodología	Contribución
 <p>Boquilla de agua de alimentación</p> <p>Evaluar la integridad estructural</p>	 <p>ANSYS</p>	 <p>Distribución de temperatura y campos de esfuerzos</p>

Integridad estructural, Método del elemento finito, Factor de uso acumulado.

Introducción

Cuando una central nucleoelectrónica entra en servicio cuenta con una licencia de operación de 40 años. Al terminar el periodo se puede solicitar una Renovación de la Licencia Operativa [RLO], generalmente son 20 años adicionales. Para esto se requiere analizar los componentes esenciales del reactor, una de ellas son las boquillas del sistema de agua de alimentación, estas requieren un análisis térmico mecánico en estado transitorio. Con este análisis se podrá determinar la integridad estructural que tendría en 60 años de operación, así como los números de ciclos permisibles antes que se presente la falla.

Debido a que no se puede conocer con exactitud la temperatura del refrigerante que pasa por las boquillas del sistema de alimentación, se postularán 4 casos de temperatura del refrigerante. Las temperaturas propuestas serán: de 40°F, 60°F, 80°F y 100 °F.

La RLO para una central nuclear tiene como punto principal realizar una serie de Programas de Gestión de Envejecimiento [AMP, por sus siglas en inglés] a sus elementos principales del sistema, para los componentes críticos se requieren de estudios adicionales que se conocen como análisis de envejecimientos de tiempo limitado [TLAA's, por sus siglas en inglés] [IEE, 2005; U.S. NRC. 2010,].

Un reactor de agua en ebullición BWR, por sus siglas en inglés] es un tipo de reactor nuclear de potencia que utiliza agua ligera como refrigerante y moderador de neutrones. Su principio operativo se basa en permitir que el agua hierva debido a la quema del combustible nuclear produciendo vapor. El vapor se separa del agua pasando a los separadores de vapor posicionados por encima del núcleo, luego pasa a las turbinas, después se condensa y se recicla el refrigerante [ver figura 1] [IAEA 2015].

Box 1

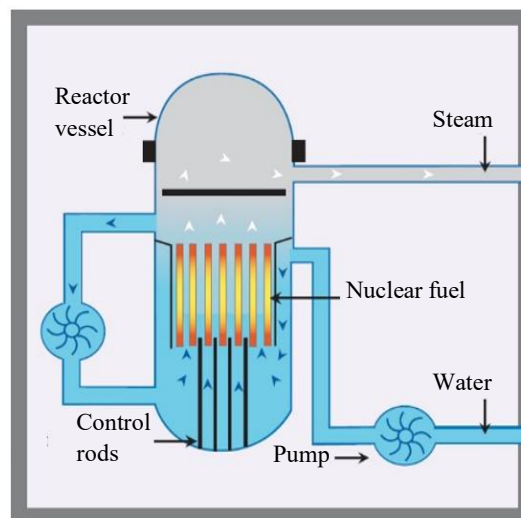


Figura 1

Reactor de agua en ebullición-5.

Fuente: World Nuclear Association, 2025

El uso de los reactores BWR ocupan el segundo lugar en el mundo de los cuales: 78 reactores están en operación, 36 reactores están cerrados en forma permanente y 4 reactores están en construcción. Los siguientes documentos son clave, para la realización del análisis: estos son emitidos por la Comisión de Regulación Nuclear [Nuclear Regulatory commission] de los Estados Unidos de América: estos documentos contienen, información técnica genérica [U.S. NRC. 2010; U.S. NRC. 1981].

- NUREG-1800 Rev. 2. Plan de Revisión Estándar.
- NUREG-1801 Rev. 2. Reporte de lecciones genéricas aprendidas sobre el envejecimiento.
- NUREG-0619 Rev. 1. Boquilla de agua de alimentación.

Metodología

Los pasos a seguir para evaluar la integridad estructural de la boquilla agua de alimentación son los siguientes:

Hacer una revisión detallada de los documentos emitidos por la NRC sobre la problemática, los principales son el NUREG's 1800, 1801, 0619 y código el ASME, Estos documentos darán información técnica genérica precisa acerca de cómo se definen los casos a evaluar y las propiedades de los materiales [tabla 1].

Box 2

Table 1

Propiedades de los materiales de la boquilla de agua de alimentación.

Propiedades	Chaqueta térmica SA 336 F8	Cuerpo SA 508 CL 2	Extremo soldable SB 166
Coefficiente de convección	0.123 BTU/lb°F	0.120 BTU/lb°F	0.120 BTU/lb°F
Densidad	0.290 lb/in ³	0.283 lb/in ³	0.283 lb/in ³
Conductividad Térmica	9.35 BTU/hr-ft-°F	23.5 BTU/hr-ft-°F	23.5 BTU/hr-ft-°F
Módulo de Young	29.5 x 10 ⁶ psi	27.8 x 10 ⁶ psi	26.2 x 10 ⁶ psi
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.3
Limite de Elástico	30 ksi	50 ksi	35 ksi
Resistencia Máxima	70 ksi	80 ksi	80 ksi

Fuente: Elaboración propia

Realiza un modelado 3D del elemento de la boquilla de agua de alimentación mediante un programa de dibujo asistido por computadora [CAD]. En la **figura 2** se muestra el modelo que se utilizó para el análisis.

Box 3

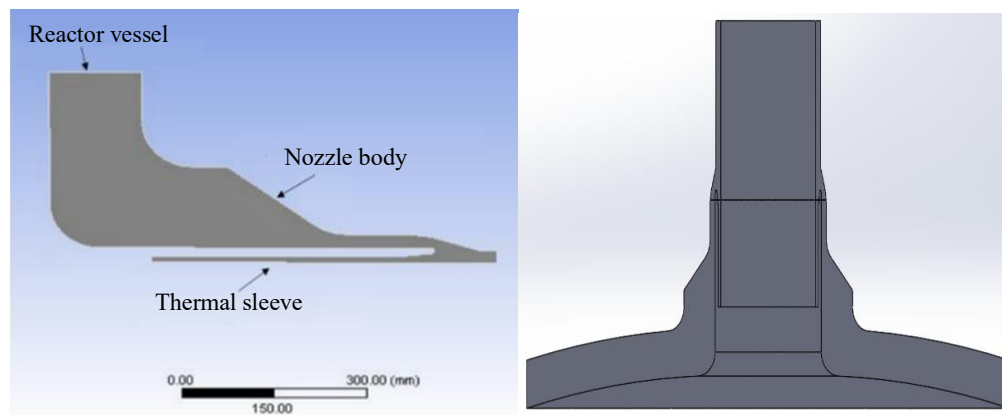


Figura 2

Modelo 3D de una boquilla de agua de alimentación de un reactor de agua en ebullición-5.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis de temperatura mediante el Método del Elemento Finito para cada caso postulado, con el fin de conocer la distribución de temperatura en el cuerpo de la boquilla teniendo en cuenta proceso de convección forzada del refrigerante y la temperatura del ambiente como se muestra en la **figura 3**. Para después exportarlo para un análisis transitorio estructural [Ansys, Inc, 2013].

Condiciones de frontera para el análisis térmico.

- La temperatura del medio ambiente es de 65°C. Afectando a la pared exterior de la boquilla y el reactor.
- Temperatura de operación del reactor en las paredes internas es de 270°C.
- Al pasar el fluido con una menor temperatura por el interior de la boquilla, encontrándose ésta a 270°C, se lleva a cabo el proceso de transferencia por convección forzada.

Box 4

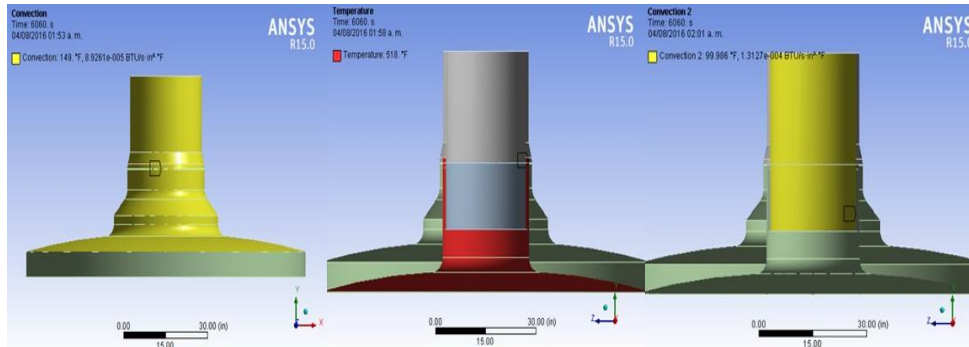


Figura 3

Condiciones de frontera para el análisis térmico.

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de frontera para el análisis estructural

- El extremo de la unión chaqueta-boquilla se restringe. restringe en el eje “Y”.
- Se restringe la boquilla en la región de la vasija, dejándola expandirse axialmente [figura 4].

Box 5

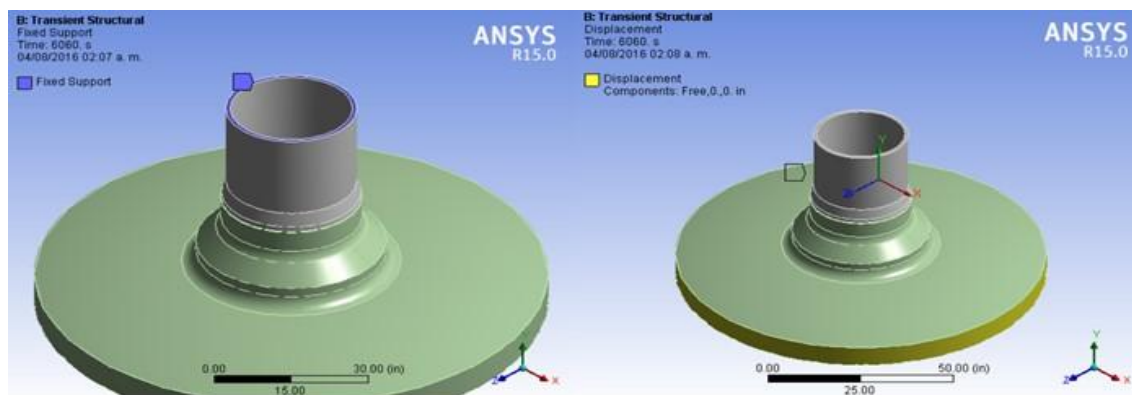


Figura 4

Condiciones de frontera para el análisis estructural.

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados del análisis transitorio estructural, se encuentran los desplazamientos nodales de la boquilla debido a los gradientes de temperatura, los campos de esfuerzos, los esfuerzos máximos y mínimos. Estos últimos se emplearon para determinar los esfuerzos alternantes.

Cálculo de los esfuerzos alternantes

Con los resultados de los análisis encontramos los esfuerzos máximos y mínimos, con ello se determinan los esfuerzos alternantes de la siguiente manera:

$$S_{alt} = \left(\frac{S_{max} - S_{min}}{2} \right) \quad [1]$$

Cálculo del factor de daño acumulado

Teniendo los esfuerzos alternantes, se procede a calcular el número de ciclos permisibles a la falla, esto mediante la tabla I-9.1 del código ASME Sección III, División 1, Apéndices. Para conocer los ciclos soportados hacemos uso de la siguiente fórmula propuesta en código ASME:

$$\frac{N}{N_i} = \left(\frac{N_j}{N_i} \right)^{\left[\frac{\log(S_i/S)}{\log(S_i/S_j)} \right]} \quad [2]$$

S, S_i, S_j son valores en función del esfuerzo alternante

" S_a ", N, N_i y N_j son valores correspondientes al número de ciclos de la *Tabla del código*

ASME

Finalmente determinar el daño acumulado por fatiga en la boquilla de agua de alimentación, utilizando la regla de Miner, de acuerdo con el código ASME.

Resultados

En la **figura 5** se muestran los resultados del análisis térmico-transitorio, las temperaturas van de 270°C a 48.3°C, siendo la parte interna de la boquilla con gradiente de temperatura más alto con 270°C y la parte menos afectada fue al final de la parte del extremo soldable "safe end" con una temperatura de 48.3°C.

Box 6

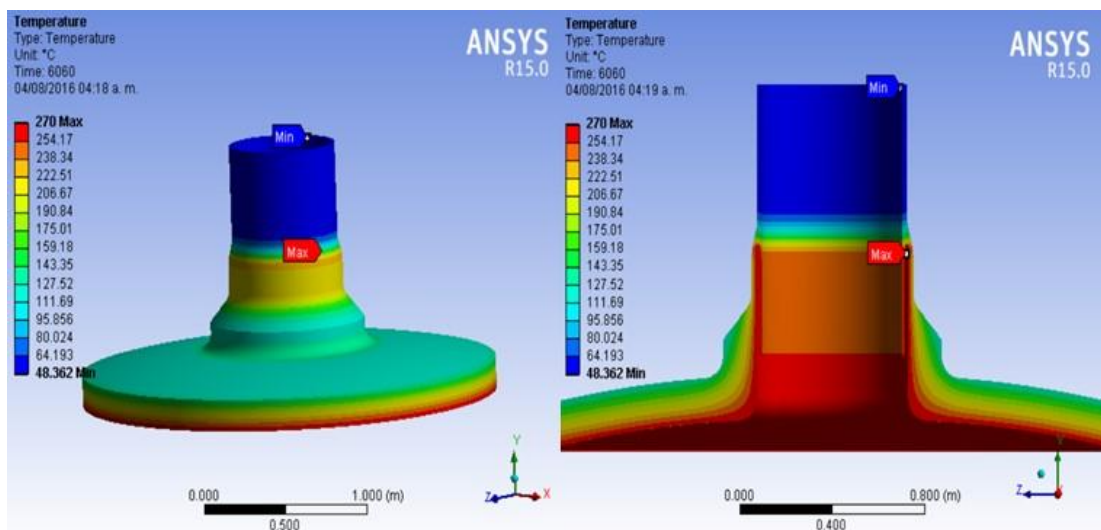


Figura 5

Resultados del análisis térmico.

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 6** se presenta la distribución de esfuerzos en la boquilla cabe mencionar que la zona más afectada es en la unión de la chaqueta térmica y el cuerpo de la boquilla.

Box 7

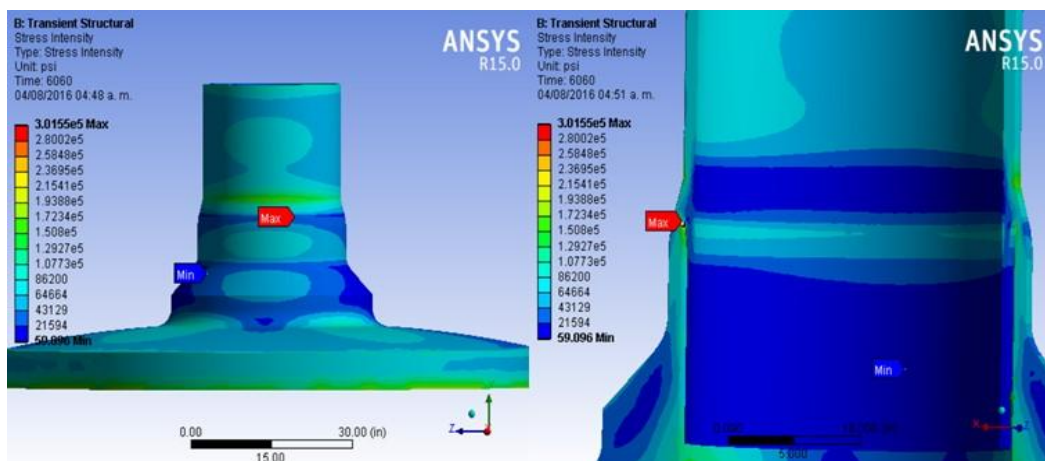


Figura 6

Resultados del análisis estructural

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 5** se muestran los resultados del análisis térmico, la cual indica que en la sección vasija-boquilla se presentan gradientes térmico alto al igual que en la sección de la boquilla – chaqueta térmica, debido a que esta última es de menos espesor los esfuerzos son mas severos.

En la **figura 6** se muestran los campos de esfuerzos resultantes para las condiciones de frontera propuestas, en la figura se puede observar que para toda la boquilla en términos generales se muestra un esfuerzo promedio de 107.13 ksi. Por otro lado, se puede notar que, en la unión de la boquilla - chaqueta térmica, se presenta la condición más drástica, esto debido a un cambio de sección considerable [pasando de la condición de pared gruesa a pared delgada. Esto implica que cuando se presente un clico térmico en esta zona se presentaran los esfuerzos máximos.

Para este caso de estudio, se consideraron los ciclos mas severos que puedan ocurrir en la planta en 40 y 60 años de operación. La **tabla 2** muestra los eventos tomados postulados.

Box 8

Table 2

Tabla de eventos para 40 años de operación

Evento Transitorio	Números de Eventos
Puesta en marcha	3
Puesta en marcha de la turbina [Turbine Roll]	28
Precalentamiento de la turbina [Turbine Trip]	8
Turbina en operación [Turbine Generator Trip]	20
Operación Normal	12
Modo de desconexión [Hot Stand By]	30
Apagado	45

Fuente: Elaboración propia

Para un lapso de 40 años se proponen que pueden ocurrir 146 eventos severos y para un lapso de 60 años se propone que ocurran 219 eventos.

En la **tabla 3** se presentan los resultados de los cálculos del esfuerzo alternante, números de ciclos a la falla, factor de uso acumulado y vida remanente de la boquilla de agua de alimentación de las 4 temperaturas propuestas para 40 y 60 años de operación

Box 9

Table 3

Resultados de los eventos propuestos

Temperatura de inyección del refrigerante	Esfuerzo alternante [ksi]	Numero de ciclos a la Falla	CUF 40 años	CUF 60 años	% Vida remanente 40 años	% Vida remanente 60 años
40 °F [4.44°C]	177.0339	228.02	0.6402	0.9604	35.98 %	3.95 %
60 °F [15.55°C]	175.9528	232.21	0.6287	0.9431	37.12 %	5.68 %
80 °F [26.66°C]	172.8169	245	0.5959	0.8938	40.40 %	10.61 %
100 °F [37.77°C]	170.6886	254.22	0.5743	0.8614	42.56 %	13.85 %

Conclusiones

Los análisis se realizaron con base en lo establecido en el código ASME Sección III, por lo que los resultados obtenidos van de acuerdo con lo esperado. La conocer la sección de la boquilla donde ocurren los mayores esfuerzos térmicos permite poner una mayor atención y con ello reducir el riesgo de una falla catastrófica del elemento.

Al determinar el número de ciclos permisible antes de que ocurra la falla en la boquilla, contribuyó para el calcular el daño acumulado para un periodo de 40 y 60 años. Lo cual pudimos determinar que el daño acumulado del material es menor que 1 en todos los casos postulados. Con la **tabla 3** se llega a la conclusión, si el refrigerante entra a la boquilla a 40°F [evento más crítico] tendrá que pasar 62.5 años para que CUF =1. Si la temperatura entra a 100°F soporta 69.5 años de operación normal para que el CUF = 1

La boquilla de agua de alimentación [FW] fue diseñada con una chaqueta térmica que ayuda a reducir los choques térmicos ocasionados por el gradiente de temperatura entre las paredes de la vasija y el líquido refrigerante del reactor. Con este diseño la boquilla tiene mayor resistencia a esos esfuerzos térmicos, con esto aumenta su vida útil del componente.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Pérez-Montejo, Salatiel: Redacción, contribución a la metodología y análisis de datos.

Patiño-Carachure, Cristóbal: Contribución al análisis de resultados.

Martínez-Vargas, Sergio: Revisión ortográfica y corrección de resultados.

Calan-Canche, Damián: Corrección y revisión de resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponible previa solicitud a: sperez@pampano.unacar.mx.

Financiación

No se recibió financiamiento.

Abreviaturas

AMP	Programa de Gestión de Envejecimiento.
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
BWR	Reactor de Agua en Ebullición.
CUF	Factor de Daño Acumulado.
MEF	Método del Elemento Finito.
NRC	Comisión Nuclear Reguladora.

Referencias

Antecedentes.

International Atomic Energy Agency [August 2015]. *Nuclear Technology Review 2015*. IAEA. <https://www.iaea.org/sites/default/files/ntr2015.pdf>

International Atomic Energy Agency [IAEA]. [October 2005]. *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: BWR Pressure Vessel Internals*. En IAEA-TECDOC-1471. Viena, Austria

Institution of Electrical Engineers [IEE]. [November 2005]. *Nuclear Reactor Types an Environment y Energy FactFile provided by the IEE*. Nuclear Electric.

SENER-CNSNS. [Julio 6 2012]. *Energía Nuclear y Centrales Nucleoeléctrica*. En Curso de Introducción a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas México,

World Nuclear Association. [2025]. *Nuclear Power Reactors*. World Nuclear Association.

Soporte

Ansys, Inc. [2020]. ANSYS Mechanical *User's Guide*, Ansys, Inc.

American Society of Mechanical Engineers. [2007]. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section II, Division 1 – Materials*. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. [2007]. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section III, Division 1 – Rules for Construction of Nuclear Facility Components*. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. [2007]. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section XI – Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components*. ASME.

Diferencias y discusiones

U.S. Nuclear Regulatory Commission. [2010]. *Generic aging lessons learned [GALL] report* [NUREG-1801, Rev. 2]. U.S. NRC. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1801/>

U.S. Nuclear Regulatory Commission. [2010]. *Standard review plan for review of license renewal applications for nuclear power plants* [NUREG-1800, Rev. 2]. U.S. NRC.



U.S. Nuclear Regulatory Commission. [1981]. *BWR feedwater nozzle and control rod drive return line nozzle cracking* [NUREG-0619, Rev. 1]. U.S. NRC.





U.S. Nuclear Regulatory Commission. [2017]. *Regulatory guide 1.207. Guidelines for evaluating fatigue analyses incorporating the life reduction of metal components due to the effects of the light-water reactor environment for new reactors,*” Washington, DC: Office of Nuclear Regulatory Research,




Producción de hidrógeno utilizando placas de aluminio reciclado expuestos en solución de NaOH





Hydrogen production using recycled aluminum plates exposed in NaOH solution

Quiroz-Hernández, Luis Efraín ^a, Pérez-Montejo, Salatiel ^b, Flores-Gil, Aarón ^c y Patiño-Carachure, Cristóbal * ^d

^a  Instituto Tecnológico Superior de Centla •  0009-0009-3703-7281

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  LYO-9195-2024 •  0000-0002-1750-0154 •  594590

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  0000-0002-2302-2056 •  121166

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  AGZ-9935-2022 •  0000-0002-1436-1259 •  226327

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.80.88>

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería química

Subdisciplina: Ciencia de los materiales

Key Handbooks

- Novedoso método de generación de hidrógeno: El estudio demostró con éxito la generación de gas hidrógeno mediante la inmersión de placas de aluminio reciclado en una solución acuosa de hidróxido de sodio [NaOH].
- Caracterización integral del material: Se emplearon técnicas avanzadas como microscopía óptica, difracción de rayos X [XRD] y microscopía electrónica de barrido [SEM] para analizar a fondo la morfología de la superficie y la composición química del aluminio durante toda la reacción.
- Identificación del subproducto clave: La caracterización reveló la formación de fases de hidróxido de aluminio [Al[OH]3], estableciendo un vínculo directo entre este subproducto y la reacción de generación de hidrógeno con NaOH.
- Mecanismo de control identificado: La investigación determinó que el área de superficie y el grosor de las placas de aluminio reciclado expuestas a la solución de NaOH son factores críticos para controlar el caudal volumétrico del hidrógeno generado.
- Generación innovadora de hidrógeno: El logro principal es la generación exitosa de gas hidrógeno a través de un método sencillo, pero eficaz: la inmersión de placas de aluminio reciclado en una solución acuosa de hidróxido de sodio [NaOH].
- Condiciones de reacción optimizadas: La investigación detalla adecuadamente las condiciones específicas para este notable proceso, utilizando una solución preparada con precisión de 2 moles de NaOH en 250 ml de agua destilada, preparando el escenario para una producción eficiente de hidrógeno.
- Revelando el mecanismo de control: la contribución más significativa es la revelación de que el área de superficie y el grosor de las placas de aluminio reciclado son los parámetros críticos que regulan con precisión el caudal volumétrico del hidrógeno generado. Este hallazgo ofrece una vía directa para controlar y optimizar la velocidad de producción de hidrógeno, abriendo diferentes vías para futuras aplicaciones

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Quiroz-Hernández, Luis Efraín, Pérez-Montejo, Salatiel, Flores-Gil, Aarón y Patiño-Carachure, Cristóbal. 2025. Producción de hidrógeno utilizando placas de aluminio reciclado expuestos en solución de NaOH. 80-88. ECORFAN.

* ✉ [\[cpatino@pampano.unacar.mx\]](mailto:cpatino@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

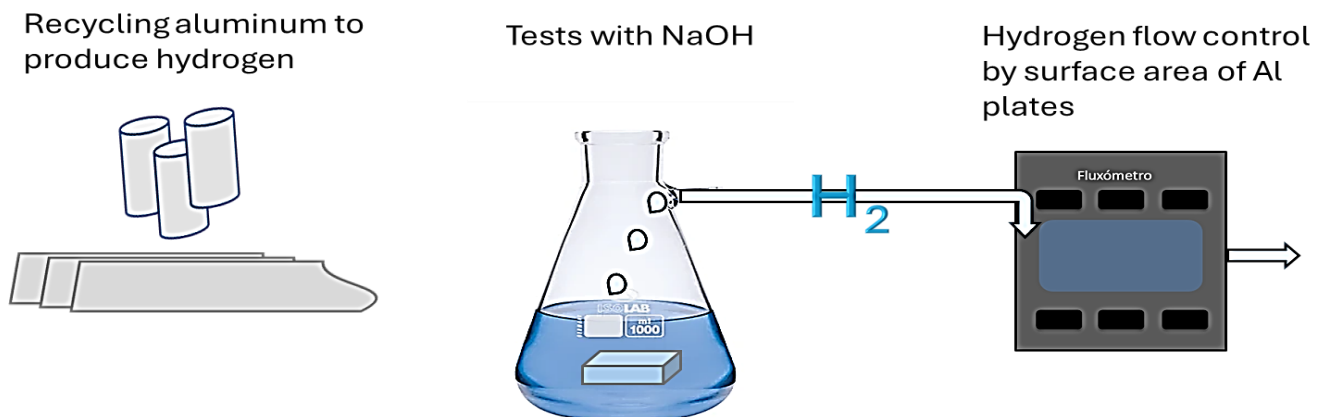
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

Hydrogen generation was achieved by immersing recycled aluminum plates in an aqueous solution of sodium hydroxide [NaOH]. H_2 production was carried out using a solution with 2 moles of NaOH and 250 ml of distilled water. Characterization by optical microscopy, X-ray diffraction [XRD], and scanning electron microscopy [SEM] was employed. This was used to study the surface morphology and chemical composition of the different phases present throughout the process. The characterization revealed the formation of $Al[OH]_3$ phases. This presence was directly associated with both the chemical reaction of the recycled aluminum with the NaOH solution and the hydrogen generation process. The surface area and thickness of the recycled aluminum plate exposed to the NaOH solution are the determining factor in regulating the volumetric flow rate of hydrogen.

Hydrogen production using recycled aluminum plates exposed in NaOH solution

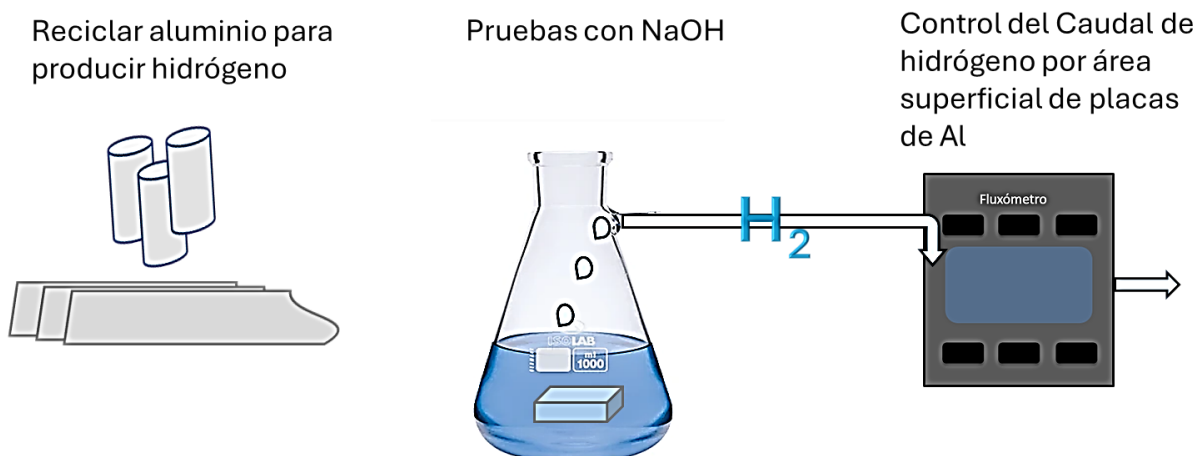


Hydrogen, recycled aluminum, NaOH

Resumen

La generación de hidrógeno se logró mediante la inmersión de placas de aluminio reciclado en una solución acuosa de hidróxido de sodio [NaOH]. La producción de H_2 se efectuó utilizando una solución con 2 moles de NaOH y 250 ml de agua destilada. Se empleó la caracterización por microscopía óptica, difracción de rayos X [DRX] y microscopía electrónica de barrido [MEB]. Con ello se estudió la morfología superficial y la composición química de las distintas fases presentes a lo largo del proceso. La caracterización reveló la formación de fases de $Al[OH]_3$. Esta presencia se asoció directamente tanto con la reacción química del aluminio reciclado con la solución de NaOH con el proceso de generación de hidrógeno. El área superficial y el grosor de la placa de aluminio reciclado expuesta a la solución de NaOH son el factor determinante en la regulación del caudal volumétrico de hidrógeno.

Producción de hidrógeno utilizando placas de aluminio reciclado expuestos en solución de NaOH



Hidrógeno, aluminio reciclado, NaOH

Introducción

El hidrógeno se presenta como un elemento crucial en la tecnología energética debido a su alta densidad energética, su facilidad de almacenamiento y transporte, y su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la producción eficiente y sostenible de hidrógeno enfrenta desafíos técnicos y económicos significativos, lo que impulsa la búsqueda de nuevas tecnologías y procesos innovadores. Se están investigando diversas alternativas sostenibles para la producción de hidrógeno, incluyendo la electrólisis alimentada por energías renovables como la solar y eólica, que separa el agua en hidrógeno y oxígeno, ofreciendo una solución libre de carbono [Huang, 2025; Makky, 2025].

La fotocatalisis, que utiliza semiconductores activados por luz para separar el agua, también se considera una opción, pero los materiales son costosos y complejos para aplicaciones a gran escala [K.M. Kamal, 2024]. El aluminio se destaca como un material prometedor para la producción de hidrógeno debido a su alta reactividad con el oxígeno. Al romper la capa protectora de óxido de aluminio, se puede aprovechar esta reactividad para liberar hidrógeno molecular al reaccionar con el agua, considerándose una alternativa limpia [Musicco, 2025].

El uso de aluminio y sus aleaciones, como el Al-Ga [aluminio-galio], ha ganado interés debido a su capacidad para reaccionar con el oxígeno. Las aleaciones Al-Ga evitan la formación de capas de óxido pasivo, facilitando una reacción continua en medios acuosos para la liberación de hidrógeno [Ilyukhina, 2010]. El aluminio reacciona con ácidos como HCl o H₂SO₄ para producir hidrógeno molecular: $2Al + 6H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 3H_2$ [Alviani, 2019]. También reacciona con soluciones alcalinas como NaOH, KOH o Ca[OH]₂ para generar hidrógeno molecular: $2Al + 6H_2O + 2OH^- \rightarrow 2[Al(OH)_4]^- + 3H_2$ [Taher, 2023; Bolt, 2020; Testa, 2024]. El almacenamiento de hidrógeno es un reto técnico y económico. Los métodos tradicionales [gaseoso a alta presión, líquido criogénico] son costosos y riesgosos [Morrin, 2020; Li, 2019; Mekonnin, 2025].

Se investigan alternativas como hidruros metálicos y compuestos químicos [borohidruros, amoníaco] para un almacenamiento más seguro y eficiente [Scarpati, 2024]. Los métodos in situ para la producción de hidrógeno evitan el almacenamiento a gran escala, siendo ventajosos para aplicaciones móviles o de emergencia. Por lo tanto, en este trabajo se estudia la reacción del aluminio reciclado en forma de placas con una solución de NaOH y agua, la cual permite una generación continua y controlada de hidrógeno mediante la ruptura de la capa de óxido de aluminio.

Metodología

Lingotes de aluminio reciclado [latas de refresco, cerveza y perfiles de ventana] fueron obtenidos por colada convencional. Los lingotes se cortaron en placas de diferentes dimensiones manteniendo una masa constante de 68 gramos aproximadamente como se muestra en la tabla 1.

Box 1

Tabla 1

Placas de aluminio [68 gramos] de diferentes dimensiones y área superficial

No. de muestra	Dimensiones [cm ³]	Área superficial [cm ²]
1	5 x 5 x 1	70
2	2.5 x 2.5 x 1	90
3	1.25 x 2.5 x 1	110
4	1.25 x 1.25 x 1	130

Fuente: elaboración propia

Para las pruebas de producción de hidrogeno, fue preparada una solución de 2 moles de NaOH en 250 ml de agua destilada utilizando un matraz de vidrio conectado a un flujómetro marca Cole Parmer con capacidad de 100 ml/min. Posteriormente las probetas fueron lavadas con exceso de agua destilada y posteriormente secadas en un horno eléctrico a 100 °C.

Para observar la morfología de los productos obtenidos durante la reacción química ocurridas sobre la superficie de la muestra se utilizó un microscopio óptico invertido marca: IROSCOPE, serie: MG 70. Para identificar las fases existentes de las muestras fue utilizado un difractor de rayos X, marca APD 2000, con $K\alpha$ de Cu, $\lambda=1.54321 \text{ \AA}$. Por otro lado, para identificar la composición química y morfológica de las fases, fue utilizado un microscopio electrónico de barrido, marca Hitachi, que opera con un voltaje de 20 a 30 kV.

Resultados

La figura 1 muestra los resultados de la producción de hidrógeno, diferenciando los datos según las dimensiones de las muestras utilizadas. Las muestras [1] y [2] presentan el caudal de hidrógeno, representado en la figura 1a, exhiben una tendencia parabólica y alcanzan valores máximos de 3 y 4 ml/min a los 40 y 50 minutos, respectivamente.

Para las muestras [3] y [4], el perfil del caudal muestra una forma asimétrica, con picos de 14 y 18 ml/min, respectivamente. Para un análisis más detallado, este comportamiento se divide en tres regiones: Región 1 [Primeros 30 minutos] un crecimiento lineal del caudal, Región 2, un crecimiento más rápido, con una forma parabólica y región 3, una Disminución del caudal, con una forma similar a una curva de Lorentz, evidenciando una caída suave y constante. La Figura 1b ilustra el volumen total de hidrógeno producido a lo largo del tiempo.

Donde las muestras [1] y [2]: Producen 250 y 300 ml de hidrógeno, respectivamente. Las muestras [3] y [4]: Generan aproximadamente 425 y 450 ml de hidrógeno, respectivamente. Estos análisis revelan diferencias significativas en la producción de hidrógeno según las dimensiones del área expuesta de las muestras, tanto en términos de la velocidad de producción [caudal] como del volumen total de hidrógeno generado.

Se puede sugerir también que, en la primera región, la pendiente del caudal generado se debe a un proceso de remoción de la capa de óxido y activación de la superficie del material de aluminio limpio de óxido y subsecuentemente en la segunda región se ve favorecido con una mayor pendiente de la curva del caudal hasta llegar al máximo, para después decaer de manera Lorentziana en la tercera región.

Box 2

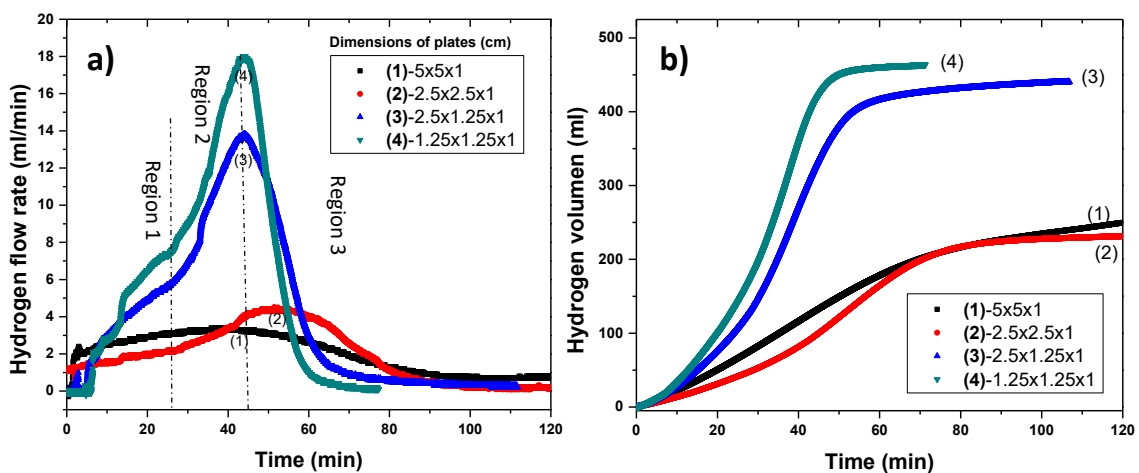


Figura 1

Producción de hidrógeno de placas de aluminio de diferentes dimensiones, a) caudal de hidrógeno y b) volumen de hidrógeno en función del tiempo

Fuente: elaboración propia

La cantidad del área expuesta de aluminio a la solución reactiva es fundamental para optimizar la generación de hidrógeno. La Figura 2 ilustra este principio, mostrando cómo el volumen y el caudal de hidrógeno producido varían con el área superficial del aluminio en contacto con la solución alcalina de NaOH. Se observa que las muestras con áreas superficiales de 70 cm^2 [muestra 1] y 90 cm^2 [muestra 2] exhiben un aumento en el caudal y volumen de hidrógeno.

Las muestras con áreas superficiales mayores, de 110 cm² [muestra 3] y 130 cm² [muestra 4], generan aún más hidrógeno, tanto en caudal como en volumen. Por lo tanto, estos datos demuestran una clara relación directa: a medida que aumenta el área superficial del aluminio, también lo hacen el volumen y el caudal de producción de hidrógeno.

Box 3

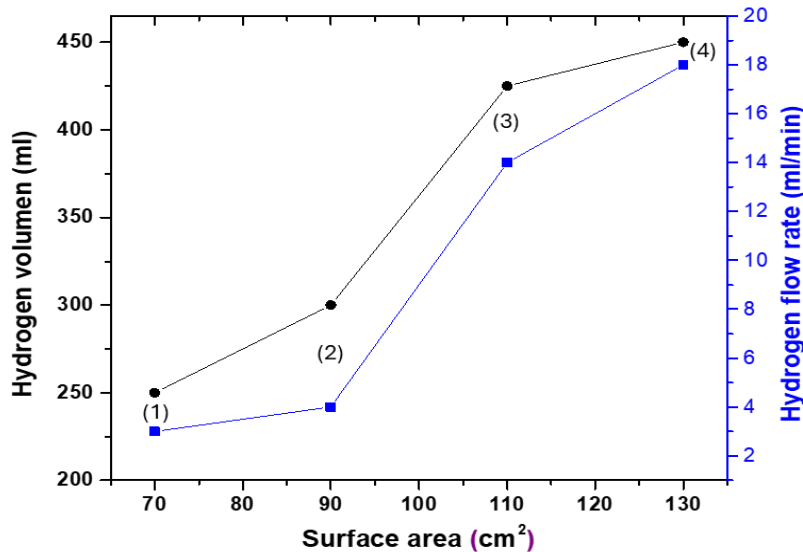


Figura 2

Volumen y caudal de hidrógeno en función del área superficial de aluminio expuesta a la solución de NaOH.

Fuente: elaboración propia

La morfología superficial de las muestras de aluminio tras su exposición al medio alcalino fue examinada utilizando microscopía óptica. La figura 3 ilustra las transformaciones que sufre el aluminio debido a su reacción con el oxígeno presente en el agua. Inicialmente, se observa una superficie cubierta por productos de oxidación, manifestándose como una capa de color café oscuro [productos de oxidación], como se aprecia en la micrografía del lingote a 1X.

Al aumentar la magnificación a 100X, se revela con mayor detalle la topografía de la superficie, permitiendo observar los picadura o cavidades formados por el proceso de oxidación del metal. Para cuantificar la profundidad de estas picaduras, generadas por la reacción del aluminio con la solución de hidróxido de sodio, se realizó un procedimiento de lijado en las placas previamente expuestas al medio alcalino. Se empleó un calibrador vernier para medir el espesor de cada lingote antes y después del lijado.

La flecha superior en la figura 3 [correspondiente a un lingote lijado a 20X] destaca la distribución de estas picaduras que resultan de la mencionada reacción. Así mismo para las otras flechas apuntan para magnificaciones de 80 y 500 X apreciándose a mejor detalle algunas picaduras de mayor profundidad.

Un análisis estadístico de todas las mediciones de profundidad de oxidación arrojó los siguientes resultados: el 58% de las muestras presentó una capa de óxido con un espesor de 0.5 mm. Un 25% de las muestras mostró un espesor de 1 mm y el 17% restante registró un espesor de 1.5 mm. El promedio de la profundidad de la capa de óxido calculado fue de 0.79 mm. Así, estos resultados sugieren que el espesor de una placa debe ser del doble de 0.79 mm para propósitos de aplicación en la producción de hidrógeno para llevar a cabo una reacción total de las placas expuestas a este medio alcalino.

Estos resultados indican que, para una aplicación óptima en la producción de hidrógeno, el grosor de una placa debería ser idealmente el doble del promedio medido de 0.79 mm. Este aumento de grosor tiene como objetivo asegurar una reacción completa de las placas cuando se exponen al medio alcalino, maximizando la eficiencia y el rendimiento de la generación de hidrógeno.

Por lo tanto, un grosor de placa recomendado sería de aproximadamente 1.58 mm para facilitar este proceso de reacción completo. En esencia, estos hallazgos sugieren fuertemente un parámetro de diseño crítico para las placas destinadas a la producción de hidrógeno dentro de este medio alcalino.

Box 4

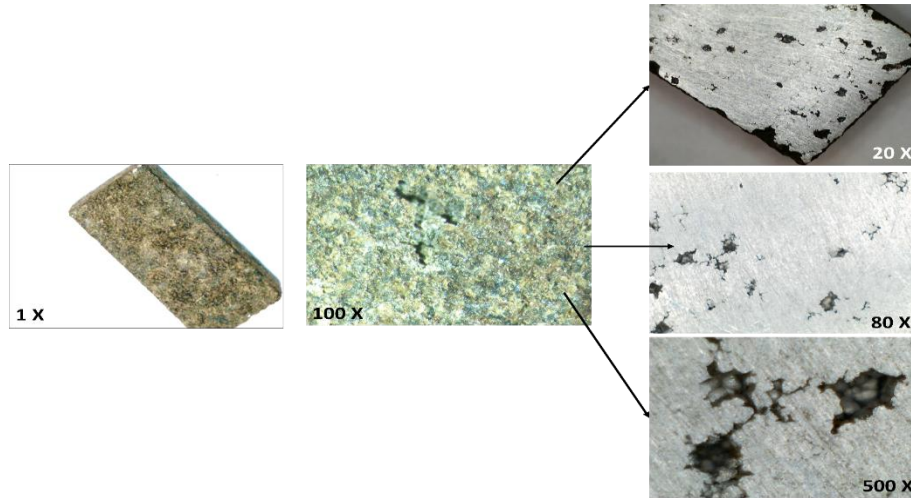


Figura 3

Micrografías obtenidas por microscopía óptica del lingote después de ser expuesto al medio alcalino

Fuente: elaboración propia

La identificación de las fases presentes en el aluminio, tanto antes como después de su interacción con el medio alcalino, se realizó utilizando la técnica de difracción de rayos X. La figura 4 exhibe los patrones de difracción de rayos X obtenidos para las muestras en su estado inicial y tras ser expuestas al medio.

En la figura 4a], se aprecia el patrón característico del aluminio puro. Este patrón también revela que los elementos de aleación presentes en el aluminio reciclado están disueltos dentro de su estructura. Por otro lado, el patrón mostrado en la figura 4b] evidencia la coexistencia de la fase de hidróxido de aluminio [α -Al(OH)₃] junto con la fase de aluminio. Esta observación en la figura 4b] es crucial, ya que indica que una porción significativa del aluminio ha reaccionado con la solución.

Dicha reacción genera hidrógeno y, como producto secundario, forma la fase α -Al(OH)₃, tal como se describe en la ecuación: $2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$ [D.M. Taher, 2023; A. Bolt, 2020; V. Testa, 2024]. En consecuencia, la detección de la fase hidróxido de aluminio funciona como un claro indicador de que se está produciendo hidrógeno.

Box 5

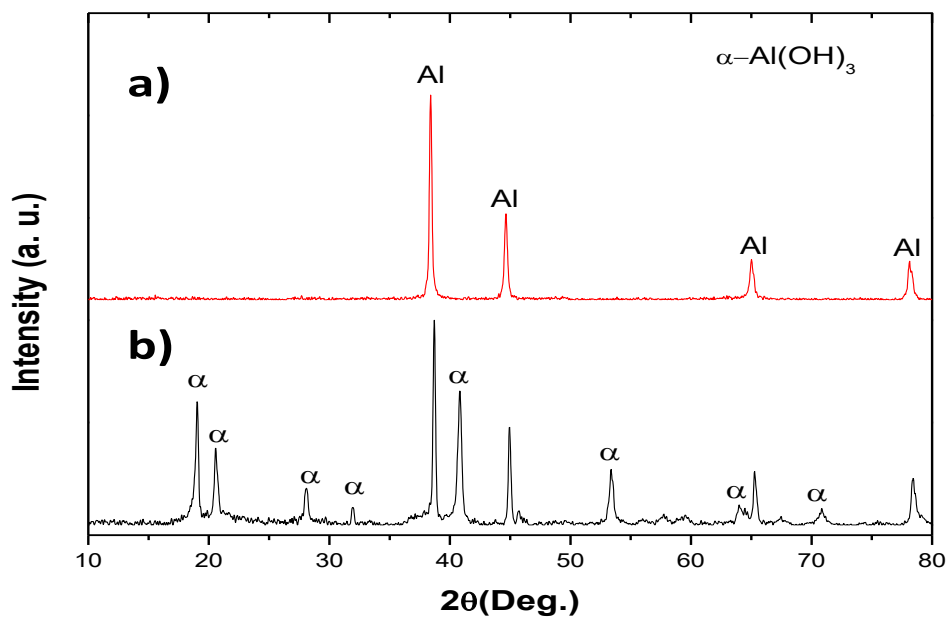


Figura 4

Patrón de difracción de rayos X de las muestras de a] placa de aluminio reciclado y b] placa de aluminio después de ser expuesto al medio alcalino

Fuente: elaboración propia

Para profundizar en el estudio de la superficie del aluminio tras su exposición al medio alcalino y para identificar los productos generados por esta reacción, se recurrió a la técnica de microscopía electrónica de barrido [MEB], cuyos resultados se ilustran en la Figura 5. La Figura 5a), mediante el uso de electrones secundarios, presenta una micrografía que revela una superficie completamente cubierta por productos amorfos.

Estos productos han sido identificados como la fase de hidróxido de aluminio. Este resultado fue corroborado de manera contundente mediante análisis de Espectrometría de Dispersión de Energía de rayos X [EDXS], tal como se detalla en la Figura 5b), y posteriormente confirmado por los datos de difracción de rayos X presentados en la figura previa. Adicionalmente, la Figura 5c) utiliza la técnica de electrones retrodispersados, la cual expone la presencia de dos fases distintas, diferenciadas por su contraste.

Específicamente, la fase que muestra un contraste más oscuro [fase de número atómico menor] se deduce que corresponde al hidróxido de aluminio, mientras que la fase de contraste claro [fase de número atómico mayor] se atribuye a la presencia del propio aluminio. Finalmente, como confirmación adicional a través de la técnica de EDXS, la Figura 5d) exhibe los picos espectrales característicos del aluminio. Además, se detecta la presencia de otros elementos, los cuales corresponden a los componentes de aleación del aluminio reciclado utilizado en el estudio.

Box 6

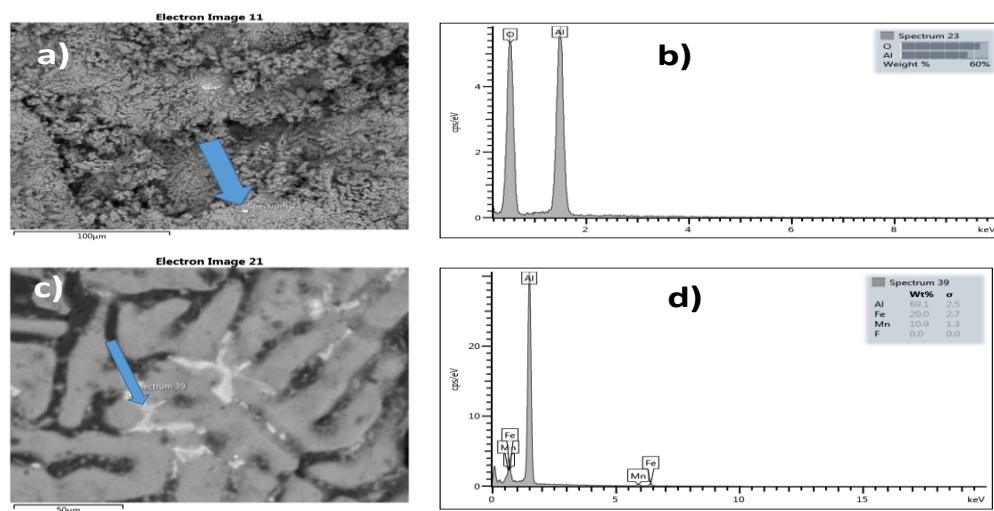


Figura 5

Análisis por microscopía electrónica de barrido a) superficie de la placa expuesta al medio alcalino con su respectivo b) análisis químico, c) micrografía después de la remoción de los productos oxidados y d) análisis químico.

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Se ha investigado la generación de hidrógeno a partir de placas de aluminio reciclado mediante activación química con una solución alcalina de hidróxido de sodio [NaOH].

Los resultados demuestran que es factible controlar el flujo volumétrico de hidrógeno ajustando el área superficial del aluminio reciclado expuesta a la solución, lo cual es prometedor para su uso en celdas de combustible.

Se observó que un aumento en el área expuesta del aluminio conduce a un mayor caudal de hidrógeno. Sin embargo, este incremento en la velocidad de reacción conlleva una disminución en el tiempo total de la misma.

Para optimizar la reacción y maximizar la producción de hidrógeno bajo condiciones de 2 molaridad de NaOH, se recomienda que el grosor de las placas sea aproximadamente de 1.58 mm.

El análisis microestructural de las superficies de las placas de aluminio post-reacción confirma la formación de la fase hidróxido de aluminio $[\text{Al}[\text{OH}]_3]$. De manera adversa, esta capa de $\text{Al}[\text{OH}]_3$ tiende a recubrir la superficie del aluminio, obstaculizando la continuación de la reacción de producción de hidrógeno.

Declarations

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Quiroz-Hernández, Luis Efrain: contribuyó en realizar las pruebas experimentales.

Pérez-Montejo, Salatiel: contribuyo en el procesamiento de datos experimentales y realización de las figuras.

Flores-Gil, Aaron: contribuyó en la interpretación de las gráficas de caudal y volumen contra el tiempo.

Patiño-Carachure, Cristóbal: contribuyo en los análisis de microscopía óptica, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos obtenidos en esta investigación están a cargo del autor correspondiente: cpatino@pampano.unacar.mx

Agradecimientos

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente [PRODEP].

Abreviaturas

$\text{Al}[\text{OH}]_3$	Hidróxido de aluminio
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
DRX	Difracción de rayos X
MO	Microscopía óptica
NaOH	Hidróxido de sodio

Referencias

Antecedentes

Makky, A.A. et al. [2025]. [Techno-economic feasibility of green hydrogen production using hybrid solar-wind energy systems in Oman](#). International Journal of Thermo-fluids 28, 101302.

K.M. Kamal et al. [2024]. [Precise design and construction of NiO-Ni heterostructures for active hydrogen evolution photocatalysis](#). Applied Catalysis O: Open 194, 206997.

Huang, X. et al. [2025]. [Sustainability assessment of hydrogen production via water electrolysis considering different configurations of solar photovoltaics-battery-grid systems in China](#). Sustainable Production and Consumption 56, 221–244.

Soporte

Ilyukhina, A.V., Kravchenko, O.V., Bulychev, B.M., Shkolnikov, E.I. [2010]. [Mechanochemical activation of aluminum with gallams for hydrogen evolution from water](#). Int. J. Hydrogen Energy 35 [5], 1905–1910.

Musicco, N. et al. [2025]. [A review of hydrogen generation methods via aluminum-water reactions](#). *International Journal of Thermofluids*. 27, 101152.

Alviani, V.N. et al. [2019]. [Mechanisms and possible applications of the Al–H₂O reaction under extreme pH and low hydrothermal temperatures](#). *Int. J. Hydrogen Energy* 44 [57], 29903–29921.

Diferencias

Bolt, A., et al. [2020]. [Energy and exergy analyses of hydrogen production process with aluminum and water chemical reaction](#). *Energy* 205, 117978. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117978>.

Taher, D.M. et al. [2023]. [All-electric ship on-board continuous sustainable H₂ generation from aluminum scrap and seawater](#). 2023 IEEE Electric Ship Technologies Symposium [ESTS]. Alexandria, VA, USA, pp. 211-217.

Scarpato, G. et al. [2024]. [A comprehensive review on metal hydrides-based hydrogen storage systems for mobile applications](#). *Journal of Energy Storage* 102, Part A, 113934.

Li, M. et al. [2019]. [Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle](#). *Int. J. Hydrogen Energy* 44, 10677–10693.

Mekonnen, A.S. et al. [2025]. [Hydrogen Storage Technology, and Its Challenges. A Review](#). *Catalysts*, 15[3], 260.





Morrin, T. [2020]. [Choosing the Right Gas Cylinder – Type 1, Type 2, Type 3 or Type 4?](#). AMS Composite Cylinders.





Testa, V. et al. [2024]. [Hydrogen production from aluminum reaction with NaOH/H₂O solution: experiments and insight into reaction kinetics](#). *Int. J. Hydrogen Energy* 83, 589–603.




Simulación numérica de celdas solares de perovskita: estudio teórico del fenómeno de histéresis

Numerical simulation of perovskite solar cells: theoretical study of the phenomenon of hysteresis

Mandujano-Ramírez, Humberto, Julián *^a, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín^b, Flores-Gil, Aarón^c y Martínez-Vargas, Sergio^d

^a  Universidad Autónoma del Carmen •  LTC-9972-2024 •  0000-0003-3714-5564 •  266189

^b  Universidad Autónoma del Carmen •  AIB-1429-2022 •  0000-0003-1368-1741 •  164797

^c  Universidad Autónoma del Carmen •  0000-0002-2302-2056 •  121166

^d  Universidad Autónoma del Carmen •  AGW-0814-2022 •  0000-0002-2499-3970 •  100782

Clasificación:

DOI: <https://doi.org/10.35429/H.2025.7.89.101>

Área: Ingeniería

Campo: Ciencias tecnológicas

Disciplina: Tecnología de materiales

Subdisciplina: Propiedades de los materiales

Key Handbooks

El presente trabajo se realiza un estudio computacional del mecanismo de operación de una celda solar de perovskita, el cual tiene como objetivo reproducir la curva corriente voltaje a través de la solución de la ecuación que describe el mecanismo de operación de dicha celda, la cual esta implementada en el software Scaps, además se identificará los factores que inducen el fenómeno de histéresis el cual es un problema que afecta a las celdas de perovskitas. Una de las principales conclusiones de nuestro estudio es la dependencia de la histéresis con la magnitud del coeficiente de difusión, así mismo se muestra la dependencia de la eficiencia del sistema con los índices de histéresis los cuales fueron hallados en diferentes escenarios. Tres los autores del presente trabajo cuentan con el reconocimiento dado por el sistema nacional de investigadores e investigadoras, así mismo todos son profesores de tiempo completo que cuentan con el perfil deseable del prodep, cabe mencionar que todos cuentan con adscripción en la Universidad Autónoma del Carmen.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia.

Citación: Mandujano-Ramírez, Humberto, Julián, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Flores-Gil, Aarón y Martínez-Vargas, Sergio. 2025. Simulación numérica de celdas solares de perovskita: estudio teórico del fenómeno de histéresis. 89-101. ECORFAN.

* ✉ [\[hmandujano@pampano.unacar.mx\]](mailto:hmandujano@pampano.unacar.mx)

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN: 978-607-8948-65-9 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HDMA. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

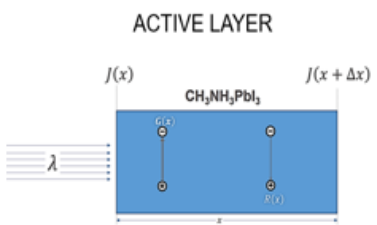

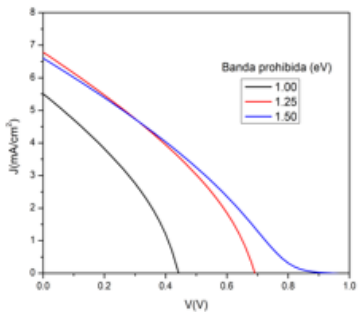
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

Perovskite solar cells [PSCs] are an emerging photovoltaic technology that in recent years have achieved efficiencies over 24.2% [T. J. Jacobsson et al., 2016], which makes them a promising technology since their conversion efficiency is similar to that of traditional Silicon solar cells. In this work, a numerical study of the active layer methylammonium of lead iodide [CH₃NH₃PbI₃] is carried out to generate the characteristic J-V curves and induce hysteresis through diffusion coefficients unbalance analyzing the physics parameters that rules photovoltaic devices by solving the charge carrier continuity equation. This same analysis is performed on a complete PSC. Results are found where diffusion coefficients intervene in the severity of the hysteresis, in addition to the influence of other physical parameters such as the electronic densities and the bandgap of the active layer, the effect of the unbalance on the diffusion coefficients in the bimolecular recombination constant and its contribution to the conversion efficiency of the photovoltaic device is also reported.

NUMERICAL SIMULATION OF PEROVSKITE SOLAR CELLS: THEORETICAL STUDY OF THE PHENOMENON OF HYSTERESIS

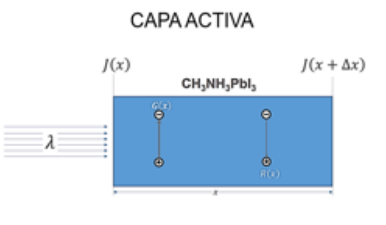

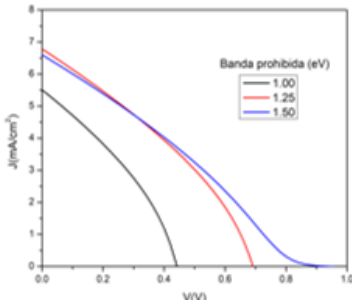
Objective	Methodology	Contribution														
<p style="text-align: center;">Perovskite Solar Cell</p> <p style="text-align: center;">ACTIVE LAYER</p>  <p style="text-align: center;">Simulation parameters for the active layer.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Parámetros</th> <th style="text-align: left;">CH₃NH₃PbI₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Banda prohibida (eV)</td> <td>1.55</td> </tr> <tr> <td>Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm³)</td> <td>1×10¹⁴</td> </tr> <tr> <td>Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm³)</td> <td>1×10¹⁴</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de difusión de electrones (cm²/s)</td> <td>1.7×10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de difusión de huecos (cm²/s)</td> <td>1.7×10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Espesor de la capa activa (μm)</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetros	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Banda prohibida (eV)	1.55	Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm ³)	1×10 ¹⁴	Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm ³)	1×10 ¹⁴	Coefficiente de difusión de electrones (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴	Coefficiente de difusión de huecos (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴	Espesor de la capa activa (μm)	0.45	<p style="text-align: center;">Scaps 1 D</p>  $\frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G(x) - R(x) = \frac{\partial n}{\partial t}$ <p style="text-align: center;">Simulation</p>	<p style="text-align: center;">Theoretical Curve J-V</p>  <p style="text-align: center;">Hysteresis index</p>
Parámetros	CH ₃ NH ₃ PbI ₃															
Banda prohibida (eV)	1.55															
Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm ³)	1×10 ¹⁴															
Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm ³)	1×10 ¹⁴															
Coefficiente de difusión de electrones (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴															
Coefficiente de difusión de huecos (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴															
Espesor de la capa activa (μm)	0.45															

Solar cell, perovskite, Numerical simulation, Hysteresis, Photovoltaics

Resumen

Las celdas solares de perovskitas [PSC] son una tecnología fotovoltaica emergente que en los últimos años han alcanzado eficiencias superiores al 24.2% [*T. J. Jacobsson et al., 2016*], lo cual las hace una tecnología prometedora, ya que su eficiencia de conversión se asemeja al de las celdas tradicionales de Silicio. En este trabajo se realiza un estudio numérico de la capa activa metilamonio de yoduro de plomo [CH₃NH₃PbI₃] para generar las curvas J-V características e inducir histéresis desbalanceando los órdenes de magnitud de los coeficientes de difusión en celdas solares de perovskitas, esto, analizando los parámetros físicos que rigen los dispositivos fotovoltaicos resolviendo la ecuación de continuidad de portadores de carga. Este mismo análisis se realiza en una PSC completa. Se hallan resultados donde los coeficientes de difusión intervienen en la severidad de la histéresis, además de la influencia de otros parámetros físicos como las densidades electrónicas y la banda prohibida de la capa activa, también se estudia el efecto del desbalance en los coeficientes de difusión en la constante de recombinación bimolecular y su contribución a la eficiencia de conversión del dispositivo fotovoltaico.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA: ESTUDIO TEÓRICO DEL FENÓMENO DE HISTÉRESIS

Objetivo	Metodología	Contribución														
<p style="text-align: center;">Celda solar de Perovskita</p>  <p style="text-align: center;">Parámetros de simulación para la capa activa.</p> <table border="1" data-bbox="178 1370 560 1520"> <thead> <tr> <th>Parámetros</th> <th>CH₃NH₃PbI₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Banda prohibida (eV)</td> <td>1.55</td> </tr> <tr> <td>Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm³)</td> <td>1×10¹⁴</td> </tr> <tr> <td>Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm³)</td> <td>1×10¹⁴</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de difusión de electrones (cm²/s)</td> <td>1.7×10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de difusión de huecos (cm²/s)</td> <td>1.7×10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Espesor de la capa activa (μm)</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetros	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Banda prohibida (eV)	1.55	Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm ³)	1×10 ¹⁴	Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm ³)	1×10 ¹⁴	Coefficiente de difusión de electrones (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴	Coefficiente de difusión de huecos (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴	Espesor de la capa activa (μm)	0.45	<p style="text-align: center;">Scaps 1 D</p>  $\frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G(x) - R(x) = \frac{\partial n}{\partial t}$ <p style="text-align: center;">Simulación</p>	<p style="text-align: center;">Curva J-V teórica</p>  <p style="text-align: center;">Índice de histéresis</p>
Parámetros	CH ₃ NH ₃ PbI ₃															
Banda prohibida (eV)	1.55															
Densidad electrónica en la banda de conducción (1/cm ³)	1×10 ¹⁴															
Densidad electrónica en la banda de valencia (1/cm ³)	1×10 ¹⁴															
Coefficiente de difusión de electrones (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴															
Coefficiente de difusión de huecos (cm ² /s)	1.7×10 ⁻⁴															
Espesor de la capa activa (μm)	0.45															

Celda solar, Perovskita, Simulación numérica, Histéresis, Fotovoltaica

Introducción

La liberación de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, resultado de las actividades humanas, están aumentando la temperatura media global, alterando los patrones climáticos y la acidez de los océanos [T. J. Jacobsson et al., 2016]. La dependencia de los combustibles fósiles como los hidrocarburos, carbón y gas natural continúa siendo una problemática mundial. Incluso si las emisiones humanas se detienen repentinamente, podría tomar siglos para alcanzar una nueva temperatura de equilibrio y apreciar el alcance total de los daños [S. Chu, Y. Cui et al., 2016].

El predominio de los combustibles fósiles plantea importantes amenazas ecológicas y sociales a la sostenibilidad de los sistemas energéticos. Estas amenazas requieren un desplazamiento de recursos fósiles por fuentes bajas en carbono y, en particular, fuentes de energía renovable [T. Bauwens et al., 2018]. Cualquier transición tecnológica lejos de los combustibles fósiles implicará cuestiones importantes de aceptación social de las tecnologías, y es probable que la participación pública desempeñe un papel crucial en estos.

Por ello, se realizan estudios para minimizar, e incluso desistir, el uso de combustibles fósiles, utilizando fuentes de energías renovables, ya que se diferencian de los combustibles fósiles al ser fuentes limpias, virtualmente inagotables y crecientemente competitivas.

Como fuentes de energía renovable se puede mencionar la eólica, mareomotriz, hidráulica, geotérmica y la solar. Entre los diversos tipos de recursos energéticos sostenibles, la energía solar es prometedora debido a su inagotable suministro, alta capacidad y respeto al medio ambiente. Sin embargo, la irradiación solar natural es descentralizada, intermitente y fluctúa constantemente. Por lo tanto, la utilización efectiva de la energía solar de manera limpia, económica y conveniente sigue siendo un gran desafío [J. Gong et al., 2019].

El desarrollo de nuevas tecnologías de energía solar se considera una de las muchas soluciones clave para satisfacer una creciente demanda mundial de energía, especialmente para minimizar el uso de combustibles fósiles. El rápido crecimiento en el campo de las tecnologías solares es prometedor, no obstante, enfrenta varias barreras técnicas, como la baja eficiencia de las celdas solares, el bajo equilibrio de sistemas, los obstáculos económicos [por ejemplo, altos costos iniciales y la falta de mecanismos de financiación] y los obstáculos institucionales [por ejemplo, infraestructura inadecuada y escasez de mano de obra calificada] [E. Kabir et al., 2017].

Una de las áreas de aprovechamiento de la energía solar es el desarrollo de la tecnología fotovoltaica [PV] para la producción de electricidad [J. Gong et al., 2019]. Los dramáticos aumentos en el despliegue y la disminución en el costo de los sistemas de conversión de energía solar en la última década dan fe de la importancia de las inversiones en innovación [P. K. Nayak et al., 2019].

Box 1

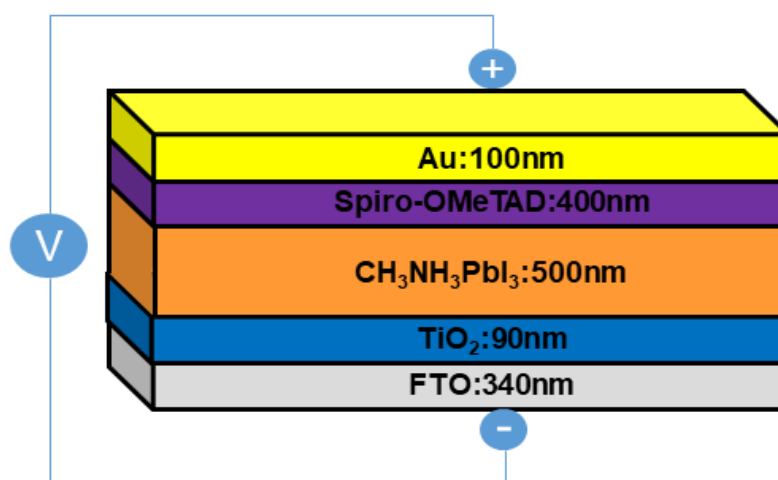


Figura 1

Estructura general de una PSC

Fuente: Elaboración propia

Las celdas solares de perovskita [PSC] se han convertido en una prometedora opción de energía renovable, con altas eficiencias y bajos costos.

Sin embargo, existen diversas problemáticas que la comunidad científica debe resolver, para lograr escalar la producción y convertirlas en tecnología comercial al alcance de cualquier usuario.

El primer reporte de un dispositivo fotovoltaico con una estructura de perovskita [$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$] fue presentado por Akihiro Kojima en el 2009 con una eficiencia de 3.8% [K. Akhoro *et al.*, 2017] y fue aumentando rápidamente con los años: en 2011 se reportó una eficiencia del 9.7% [8], 15.4% en el 2013 [M. Liu *et al.*, 2013], 20.1% en el 2015 y 22.1 % en el 2016 [11] la cual se acerca al rendimiento de las celdas solares de silicio monocristalino. Sin embargo, aun presentar diversas problemáticas, siendo una de ellas la histéresis [N. J. Jeon *et al.*, 2015].

La histéresis es un fenómeno que está presente en la estructura de perovskita de manera inherente, y está relacionada con diferentes mecanismos de degradación y directamente vinculada a la conversión energética de la celda. El comprender este fenómeno contribuiría a mejorar las técnicas de sinterización, fabricación, así como obtener valores reales de eficiencia y tiempo de vida. La histéresis se observa en las diferentes curvas J-V de las PSC que varía dependiendo de la dirección del barrido de voltaje durante la caracterización de las curvas J-V, así como el rango y la velocidad del barrido. Debido a la histéresis, la caracterización y la reproducibilidad de las PSC es una problemática actual. Aun con el interés y las investigaciones realizadas, es un fenómeno que aún no se comprende del todo [Baeza Pérez *et al.*, 2025].

Metodología

El presente trabajo fue desarrollado utilizando el software SCAPS el cual es un programa de simulación unidimensional de celdas solares que resuelve las tres ecuaciones fundamentales de los dispositivos fotovoltaicos: la ecuación de Poisson, la densidad de corriente para electrones y huecos [Sanchez *et al.*, 2025]. Fue desarrollado en el departamento de Electrónica y Sistemas de Información [ELIS] de la Universidad de Gent, Bélgica.

SCAPS se desarrolló originalmente para estructuras celulares de CuInSe_2 y la familia CdTe . Sin embargo, varias extensiones han mejorado sus capacidades, por lo que también es aplicable a las células solares cristalinas [familia Si y GaAs] y a las células amorfas [a-Si y Si micromorfo] y recientemente a celdas orgánicas-inorgánicas [Dye y Perovskitas].

A continuación, se presenta parte de la teoría fundamental sobre la cual se sustenta nuestro análisis mediante el programa antes mencionado

➤ Ecuaciones de continuidad

Este estudio se basa en la resolución de las ecuaciones de continuidad, con enfoque de importancia en los coeficientes de difusión, los cuales son derivados de los mecanismos de transporte de masa atómica. Este es un mecanismo que sucede de forma aleatoria en gases y líquidos, y es proporcional al gradiente de concentración dC/dx y es descrito por la primera Ley de Fick

$$J_{\text{diff}} = -D \frac{dC}{dx} \quad [1]$$

Donde D es el coeficiente de difusión, y el signo negativo indica que el transporte se realiza hacia la zona donde exista menor concentración.

Por otro lado, las ecuaciones de continuidad de portadores de carga [electrones para cargas negativas, huecos para cargas positivas] describen la densidad de flujo de corriente a través de un semiconductor [78].

$$\frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G[x] - R[x] = \frac{\partial n}{\partial t} \quad [2]$$

$$-\frac{1}{q} \frac{\partial J_h}{\partial x} + G[x] - R[x] = \frac{\partial h}{\partial t} \quad [3]$$

Donde, en la ecuación 3.1, J_n es la densidad de corriente de electrones, q es la carga del electrón, x es el grosor de la capa activa de perovskita, $G[x]$ es el término de generación y $R[x]$ es el término de recombinación, n es la concentración electrónica de las cargas y el t es el tiempo. En la ecuación 3.2 se presentan los mismos parámetros para huecos, h .

En una celda de perovskita, la densidad de corriente es la suma de las corrientes producidas por fenómenos de difusión y de arrastre debido a un campo eléctrico. Entonces las ecuaciones 3.1 y 3.2, pueden expresarse de la siguiente manera.

$$J_n = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} + qn\mu_n \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad [4]$$

$$J_h = qD_p \frac{\partial h}{\partial x} - qn\mu_h \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad [5]$$

Donde, en la ecuación 3.3, D_n es el coeficiente de difusión de electrones, μ_n es el coeficiente de movilidad de los electrones, φ es el potencial de campo eléctrico. La ecuación 4 muestra los mismos parámetros para la densidad de corrientes producida por los huecos. La densidad de corriente por difusión es de suma importancia, ya que, con la relación de Einstein [ecuación 5], podemos estudiar los fenómenos de migración de portadores de carga y los efectos que esto produce en la capa activa.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{kT}{q} \quad [6]$$

En ausencia de campo eléctrico, los portadores se mueven aleatoriamente y no hay un transporte neto de carga. Con la presencia de un campo eléctrico [ecuación 6] el movimiento aleatorio se superpone una componente [la misma para todos los portadores de igual carga] que provoca un movimiento neto en la dirección del campo eléctrico. Es por esto, que la corriente de arrastre, también llamada a la deriva, se suma a la corriente por difusión.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) = \frac{q}{\varepsilon} [n(x) - h(x)] \quad [7]$$

Donde ε es la permitividad eléctrica en el vacío, n y p son las concentraciones de carga de electrones y huecos respectivamente. Entonces, las ecuaciones 3.1 y 3.2 pueden expresarse como:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{d^2 n[x]}{dx^2} - \mu_n \left(\frac{dn(x)}{dx} \frac{d\varphi(x)}{dx} + n(x) \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right) + G(x) - R(x) \quad [8]$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \frac{d^2 h[x]}{dx^2} - \mu_p \left(\frac{dh(x)}{dx} \frac{d\varphi(x)}{dx} + h(x) \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right) + G(x) - R(x) \quad [9]$$

Donde n es la concentración de electrones y h la de huecos y se definen con las siguientes expresiones

$$n = N_C e^{\frac{E_f - E_C}{k_B T}} \quad [10]$$

$$h = N_V e^{\frac{E_V - E_f}{k_B T}} \quad [11]$$

Para las ecuaciones 3.9 y 3.10 k , T y E_f son la constante de Boltzman, la temperatura en Kelvin y el nivel de Fermi, respectivamente. E_V es el nivel energético de la banda de valencia, y E_C es el nivel energético en la banda de conducción. N_C y N_V son las densidades de estados localizados en las bandas de conducción y valencia, respectivamente.

➤ Generación

El objetivo principal de una celda solar es la generación de electricidad. La densidad de corriente es determinada por la cantidad de luz absorbida por la capa activa, la generación de fotocorriente y la recombinación de las cargas.

Generación y recombinación son dos fenómenos que ocurren simultáneamente en un semiconductor, mientras que el primero describe la generación de portadores de carga, la recombinación describe es la eliminación de esos mismos portadores a una tasa proporcional. Cuando el estado de equilibrio en el semiconductor es alterado, también lo hacen las concentraciones de portadores de carga [K. Akhiro et al., 2017].

La generación [ecuación 11] es un fenómeno de excitación electrónica que incrementa el número de portadores de carga, también se puede describir como el salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, para crear un par electrón-hueco, dejando un espacio libre en la banda de conducción. La generación puede expresarse como:

$$G(x) = \int_0^{\lambda_0} G(\lambda, x) d\lambda = \int_0^{\lambda_0} PCE(\lambda) \times \frac{I(\lambda) \times \alpha[\lambda] \times e^{-\alpha(\lambda)x}}{\frac{hc}{\lambda}} d\lambda \quad [12]$$

Donde PCE es la eficiencia de conversión energética [para nuestro estudio se considera el 100%, es decir, que todos los excitones pueden separarse eficientemente en portadores de carga], $I(\lambda)$ es la densidad de luz incidente, $\alpha[\lambda]$ es el coeficiente de absorción, h la constante de Plank y c la velocidad de la luz.

Resultados

Para el estudio de la histéresis en la celda completa. Se desbalancean los coeficientes μn y μh para observar la influencia de las movilidades en la curva J-V. En la figura 4.28 se variaron los coeficientes en el mismo orden de magnitud, pudiendo observar un comportamiento distinto a las curvas del apartado de la capa activa.

Box 2

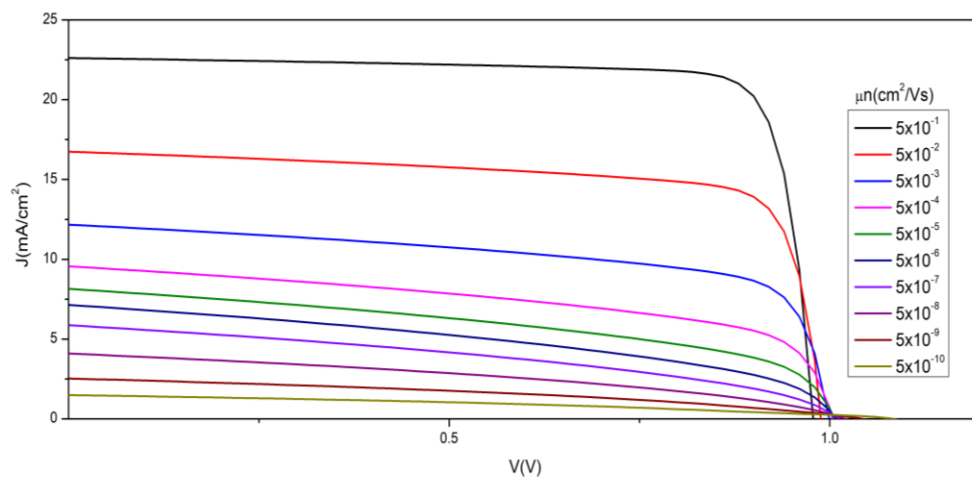


Figura 2

Curva J-V para diferentes valores de μn y manteniendo fijo μh

Fuente: Elaboración propia

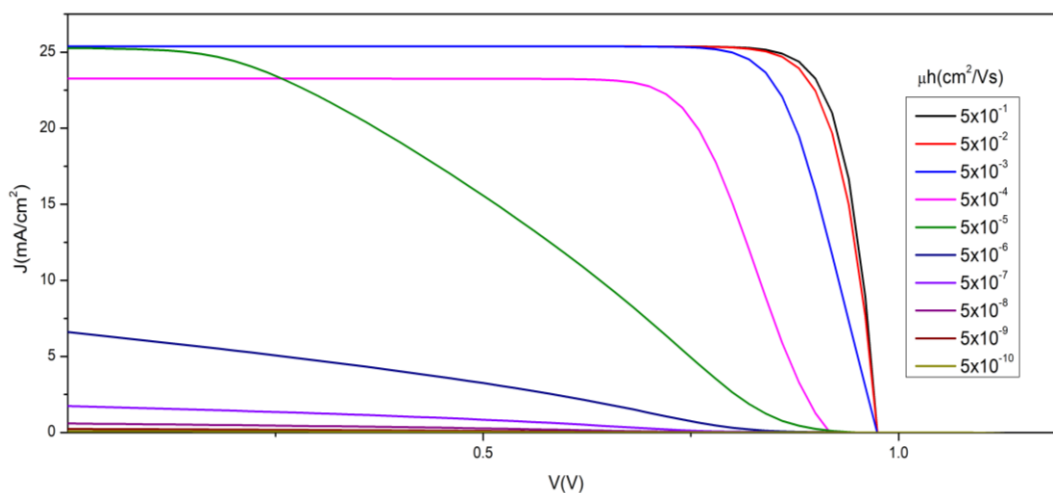
En la tabla 1 se ha extraído la información de cada curva, para observar el comportamiento del desbalance de movilidad, se puede notar que los valores tienden a estabilizarse, sin embargo, con mayor dificultad que en los escenarios idealizados del apartado de la capa activa.

Box 3**Tabla 1**

Parámetro de las curvas corriente voltaje de la figura 2, para diferentes valores de movilidad de los electrones y movilidad de los huecos constante

$\mu_h(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}[\text{V}]$	FF	$\eta(\%)$
5×10^1	5×10^{-1}	22.6102	0.9785	0.8364	18.51
5×10^1	5×10^{-2}	16.7402	0.9893	0.7602	12.59
5×10^1	5×10^{-3}	12.1703	0.9995	0.6443	7.84
5×10^1	5×10^{-4}	9.5557	1.0043	0.5307	5.09
5×10^1	5×10^{-5}	8.1451	1.0068	0.4571	3.75
5×10^1	5×10^{-6}	7.1382	1.0090	.4098	2.95
5×10^1	5×10^{-7}	5.8669	1.0123	0.3809	2.26
5×10^1	5×10^{-8}	4.0900	1.0207	0.3680	1.54
5×10^1	5×10^{-9}	2.5272	1.0433	0.3558	0.94
5×10^1	5×10^{-10}	1.4896	1.0824	0.3427	0.55

De manera similar, se realizó la misma estrategia para analizar el desbalance de portadores de carga, pero ahora variando μ_h y dejando fijo $\mu_n = 5 \times 10^1$. En la figura 3 se puede apreciar el comportamiento de las curvas J-V al realizar esta variación.

Box 4**Figura 3**

Curva J-V para diferentes valores de μ_h y manteniendo fijo μ_n

Fuente: Elaboración propia

Box 5**Tabla 2**

Parámetro de las curvas corriente voltaje de la figura 3, para diferentes valores de movilidad de huecos y movilidad de los electrones constante

$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\mu_h(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}[\text{V}]$	FF	$\eta(\%)$
5×10^1	5×10^{-1}	25.3884	0.9752	0.8679	21.49
5×10^1	5×10^{-2}	25.3886	0.9751	0.8580	21.24
5×10^1	5×10^{-3}	25.3905	0.9742	0.8133	20.12
5×10^1	5×10^{-4}	25.4022	0.9670	0.7148	17.56
5×10^1	5×10^{-5}	25.2727	0.9471	0.3271	7.83
5×10^1	5×10^{-6}	6.5990	0.9408	0.2646	1.64
5×10^1	5×10^{-7}	1.7427	0.9544	0.2599	0.43
5×10^1	5×10^{-8}	0.592	0.9827	0.2437	0.14
5×10^1	5×10^{-9}	0.235	1.0164	0.2244	0.05
5×10^1	5×10^{-10}	0.092	1.0487	0.2086	0.02

Para entender la influencia de histéresis, se pueden analizar los comportamientos característicos siendo afectados por el desbalance en la movilidad. Para ello se puede tomar como ejemplo las curvas J-V a diferentes soles, como se muestra en la figura 4.

Box 6

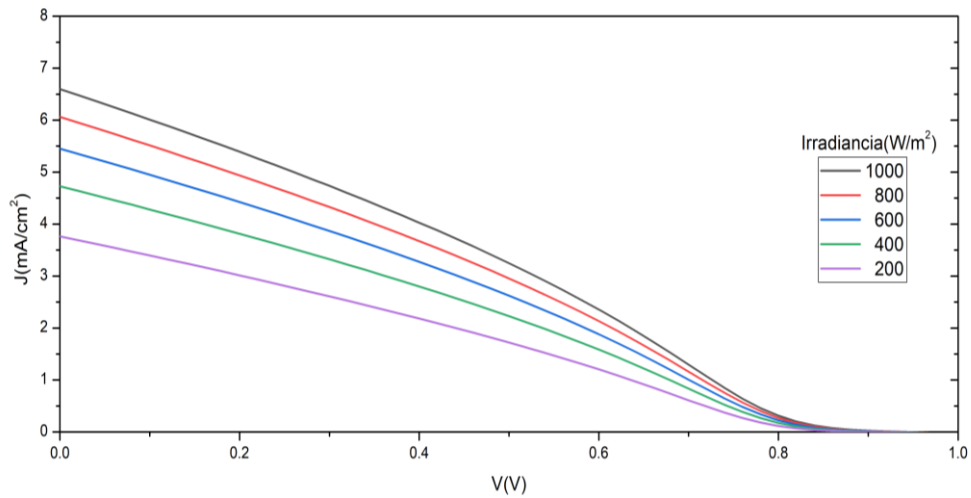


Figura 4

Curva J-V para diferentes valores de irradiancia, en la curva se puede observar el efecto de la histéresis cerca de punto de voltaje a circuito abierto

Fuente: Elaboración propia.

Por último, podemos observar como la eficiencia de la celda se ve influenciada por la presencia de histéresis en la figura 5 donde, incluso a máxima irradiancia [1 sol], la conversión energética es minimizada. En la curva sin histéresis, μn y μh son iguales a $5 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; y con histéresis $\mu n = 5 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\mu h = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Box 7

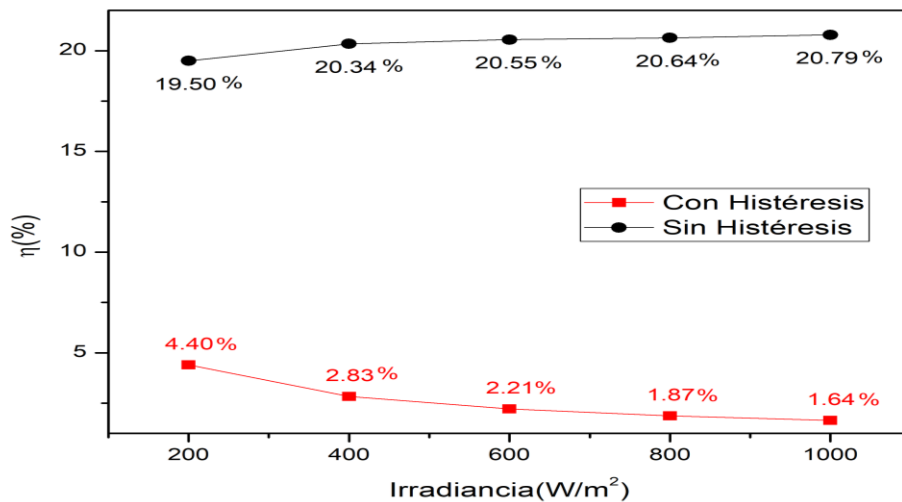


Figura 5

Eficiencia de la una celda solar de perovskita en función de la irradiancia. También se puede observar la influencia de la histéresis en la eficiencia de la celda.

Fuente: Elaboración propia

Índice de histéresis

Una vez halladas las condiciones donde se encontró histéresis [$\mu n = 5 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\mu h = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$] se variaron los parámetros para analizar el índice de histéresis, hallando de manera numérica las curvas de histéresis al variar la banda prohibida y la densidad electrónica, siendo estos dos valores los que proporcionaron las curvas de las figuras 6 y 7 ideales para analizar el índice de histéresis.

En la figura 6 se pueden observar curvas similares a las reportadas mostrando el comportamiento de histéresis. Las direcciones de barridos se mantuvieron en el mismo sentido que en el estudio del apartado anterior.

Box 8

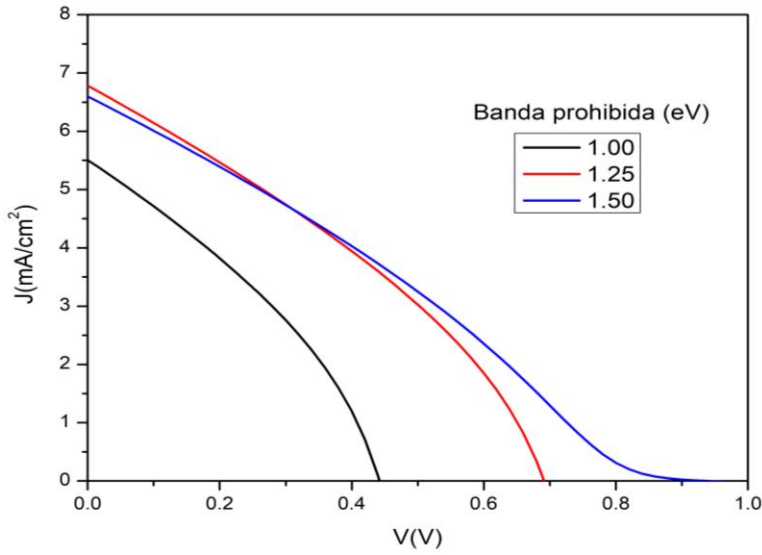


Figura 6

Curvas características de histéresis en curvas J-V al variar la banda prohibida con desbalance de portadores de carga

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 obtuvieron también curvas de histéresis al variar las densidades electrónicas de las bandas de valencia $[Nv]$ y de conducción $[Nc]$ en los mismos órdenes de magnitud, pero teniendo el mismo desbalance de carga que en el caso de la variación de la banda prohibida.

En la figura 7 se muestran las curvas por pares estableciendo sus direcciones de barrido, en esta ocasión para las variaciones en la banda prohibida.

Box 9

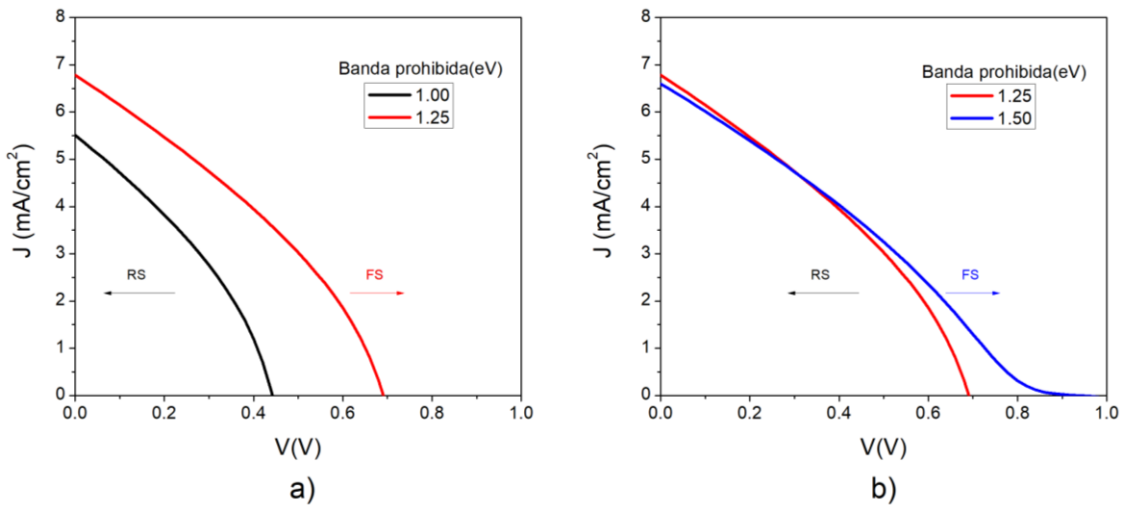


Figura 7

Propuesta para las direcciones de barrido para las curvas de histéresis generadas al variar la banda prohibida

Fuente: Elaboración propia

Con esta consideración se pueden calcular los índices de histéresis. Este análisis sirve para analizar los fenómenos físicos que intervienen en la conversión energética. En la tabla 3 se indican los resultados obtenidos de la figura 7, indicando los índices de histéresis en la columna de la derecha.

Box 10

Tabla 3

Análisis de los índices de histéresis de acuerdo a los escenarios de la figura 4.

Escenario	Dirección de barrido	Parámetros	Índice de histéresis
a]	RS	$J_{sc} = 5.5081 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.44 \text{ V}$ $PCE = 0.83 \%$	$HI_1 = -0.93$
	FS	$J_{sc} = 6.7813 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.69 \text{ V}$ $PCE = 1.58 \%$	$HI_2 = -0.90$ $HEI = -0.93$
b]	RS	$J_{sc} = 6.7813 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.69 \text{ V}$ $PCE = 1.58 \%$	$HI_1 = -0.32$ $HI_2 = -0.03$
	FS	$J_{sc} = 6.5990 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.94 \text{ V}$ $PCE = 1.64 \%$	$HEI = -0.27$

De manera similar se proponen las direcciones de barrido para las curvas generadas al variar las densidades electrónicas, el conjunto de curvas generadas por el SCAPS se presenta en la figura 8, las cuales se agruparán en pares para sus análisis.

Box 11

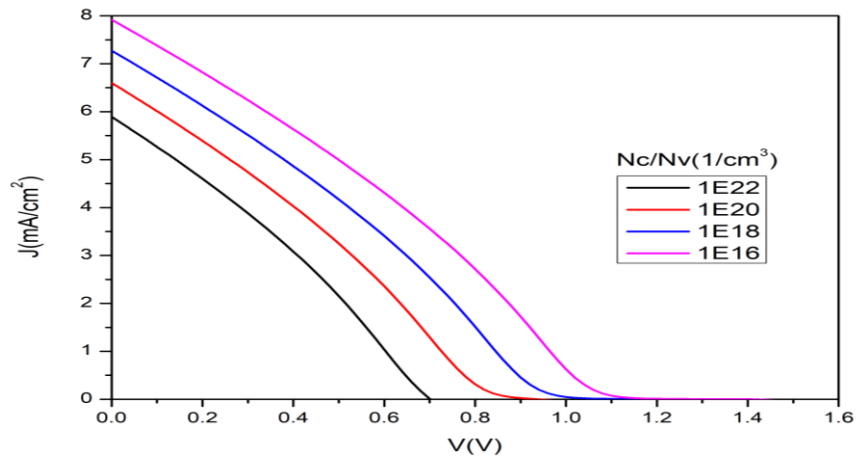


Figura 8

Curvas características de histéresis en curvas J-V al variar las densidades electrónicas con desbalance de portadores de cargas.

Fuente: Elaboración propia

Las direcciones de barrido propuestas se indican en la figura 9, donde se puede observar ligeras diferencias con las curvas obtenidas en el análisis de la capa activa.

Box 12

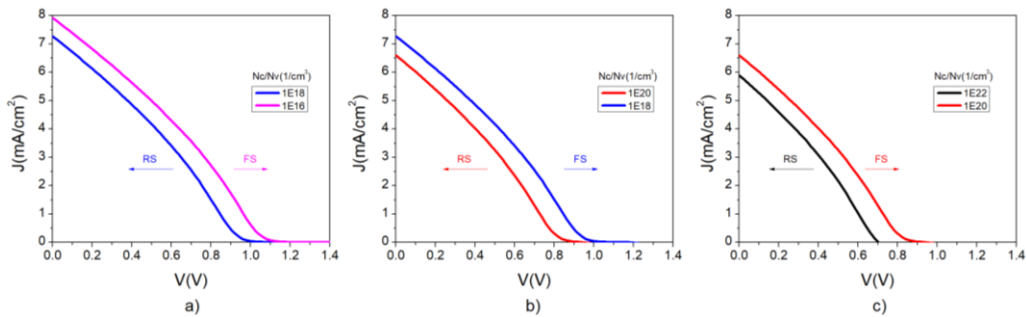


Figura 9

Propuesta para las direcciones de barrido para las curvas de histéresis generadas al variar las densidades electrónicas.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se muestra el análisis numérico de los escenarios de la figura 9, para poder realizar un análisis en los índices de histéresis y las variaciones de las densidades electrónicas con desbalance de cargas.

Box 13

Table 4

Análisis de los índices de histéresis de acuerdo a los escenarios de la figura 6

Escenario	Dirección de barrido	Parámetros	Índice de histéresis
a)	RS	$J_{sc} = 5.0257 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.46 \text{ V}$ $PCE = 0.78 \%$	$HI_1 = -0.77$
	FS	$J_{sc} = 5.8909 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.70 \text{ V}$ $PCE = 1.23 \%$	$HI_2 = -0.57$ $HEI = -0.57$
b)	RS	$J_{sc} = 5.8909 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.70 \text{ V}$ $PCE = 1.23 \%$	$HI_1 = -0.50$
	FS	$J_{sc} = 6.5990 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.94 \text{ V}$ $PCE = 1.64 \%$	$HI_2 = -0.33$ $HEI = -0.40$
c)	RS	$J_{sc} = 6.5990 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 0.94 \text{ V}$ $PCE = 1.64 \%$	$HI_1 = -0.37$
	FS	$J_{sc} = 7.2725 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 1.17 \text{ V}$ $PCE = 2.09 \%$	$HI_2 = -0.27$ $HEI = -0.31$
	FS	$J_{sc} = 7.9193 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc} = 1.40 \text{ V}$ $PCE = 2.58 \%$	

Conclusiones

La histéresis es un fenómeno que involucra diferentes mecanismos de transporte dentro de la estructura cristalina de los materiales que conforman la celda y está relacionada con la conversión energética de las PSC. Los índices de histéresis muestran las curvas de histéresis son el resultado de una combinación de parámetros que pueden replicar las curvas obtenidas a través de escaneos experimentales.

También, se observa que la banda prohibida y la densidad electrónica junto con las variaciones en los órdenes de magnitud de los coeficientes de difusión, son parámetros que generan histéresis de forma numérica. Se puede ver como la variación de los coeficientes son parámetros que influyen en la histéresis, sin embargo, necesita de la participación de otros parámetros físicos para desencadenarla. Se puede modelar la histéresis en una PSC variando los coeficientes de difusión de electrones y huecos, así como generar las curvas características hacia adelante y hacia atrás.

No obstante, para poder ajustarse a valores hallados experimentalmente se debe realizar el análisis de forma aleatoria hasta hallar la configuración correcta.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Mandujano-Ramírez, Humberto, Julián: Apoyó en el desarrollo experimental y redacción del documento.

Figuroa-Ramírez, Sandra Jazmín: Contribuyó en la revisión de los resultados.

Flores-Gil, Aarón: Revisión del trabajo.

Martínez-Vargas, Sergio: Contribuyó en el análisis de los resultados.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles a solicitud en el correo: hmnandujano@pampano.unacar.mx

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Referencias

Básicos

T. J. Jacobsson, W. Tress, J. P. Correa-Baena, T. Edvinsson, and A. Hagfeldt, “Room Temperature as a Goldilocks Environment for CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells: The Importance of Temperature on Device Performance,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 120, no. 21, pp. 11382–11393, 2016.

S. Chu, Y. Cui, and N. Liu, “The path towards sustainable energy,” *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 16–22, 2016.

T. Bauwens and P. Devine-Wright, “Positive energies? An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy,” *Energy Policy*, vol. 118, no. February, pp. 612–625, 2018.

J. Gong, C. Li, and M. R. Wasielewski, “Advances in solar energy conversion,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 48, no. 7, pp. 1862–1864, 2019.

E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 894–900, 2018.

P. K. Nayak, S. Mahesh, H. J. Snaith, and D. Cahen, “Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art,” *Nat. Rev. Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 269–285, 2019.

Soporte

K. Akhiro, T. Kenjiro, S. Yasuo, and M. Tsutomu, “Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–1, 2009.

Ning Cai *et al.*, “An organic D- π -A dye for record efficiency solid-state sensitized heterojunction solar cells,” *Nano Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 1452–6, 2011..

M. Liu, M. B. Johnston, and H. J. Snaith, “Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition,” *Nature*, vol. 501, no. 7467, pp. 395–398, 2013.

N. J. Jeon *et al.*, “Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells,” *Nature*, vol. 517, no. 7535, pp. 476–480, 2015.

Sanchez, H. B. S., Cappelletti, M. A., & Rebaza, A. V. G. [2025, May]. Diseño estructural y propiedades electrónicas de perovskitas CsGe_nPb_{1-n}X₃ y CsSn_nPb_{1-n}X₃ considerando el efecto Jahn-Teller. In XLI Congreso Argentino de Mecánica Computacional.

Baeza Pérez, R. A. [2025]. Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como material absorbedor [Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León].

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

[Title in TNRoman and Bold No. 14 in English and Spanish]

Surname, Name 1st Author*^a, Surname, Name 1st Co-author^b, Surname, Name 2nd Co-author^c and Surname, Name 3rd Co-author^d [No.12 TNRoman]

^a  [Affiliation institution](#),  [Researcher ID](#),  [ORCID ID](#), [SNI-SECIHTI ID](#) or CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^b  [Affiliation institution](#),  [Researcher ID](#),  [ORCID ID](#), [SNI-SECIHTI ID](#) or CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^c  [Affiliation institution](#),  [Researcher ID](#),  [ORCID ID](#), [SNI-SECIHTI ID](#) or CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^d  [Affiliation institution](#),  [Researcher ID](#),  [ORCID ID](#), [SNI-SECIHTI ID](#) or CVU PNPC [No.10 TNRoman]

All ROR-Clarivate-ORCID and SECIHTI profiles must be hyperlinked to your website.

Prot-  [University of South Australia](#) •  [7038-2013](#) •  [0000-0001-6442-4409](#) •  416112

SECIHTI classification: <https://marvid.org/area-i.php> [No.10 TNRoman]

Area:

Field:

Discipline:

Subdiscipline:

DOI: <https://doi.org/>


Key Handbooks

[Explain the following aspects:]

- What are the main contributions to generating Science and Technology written in this research?
- What are the key aspects to be understood in order to apply to the generation of universal knowledge?
- Outline the main conclusions of the research.
- How many citations did the authors of the work generate in the last year?
- From which institutions do they originate?

Citation: Surname, Name 1st Author, Surname, Name 1st Co-author, Surname, Name 2nd Co-author and Surname, Name 3rd Co-author. Year. Book title. [Pages]. ECORFAN.

Contact e-mail address:

*  [example@example.org]

Handbook shelf URL: <https://www.ecorfan.org/handbooks.php>



ISBN XXX-XX-XXXXX-XX-X/© 2009 The Author[s]. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding X on behalf of Book X. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee [MARVID®](#)- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Abstract [In English]

Must contain up to 150 words

Graphical abstract [In English]

Your title goes here		
Objectives	Methodology	Contribution

Authors must provide an original image that clearly represents the work described in the chapter. Graphical abstracts should be submitted as a separate file. Please note that, as well as each article must be unique. File type: the file types are MS Office files. No additional text, outline or synopsis should be included. Any text or captions must be part of the image file. Do not use unnecessary white space or a "graphic abstract" header within the image file.

Keywords [In English]

Indicate 3 keywords in TN Roman and Bold No. 12

Abstract [In Spanish].

Must contain up to 150 words

Graphical abstract [In Spanish]

Your title goes here		
Objectives	Methodology	Contribution

Authors must provide an original image that clearly represents the work described in the book. Graphical abstracts should be submitted as a separate file. Please note that, as well as each article must be unique. File type: the file types are MS Office files. No additional text, outline or synopsis should be included. Any text or captions must be part of the image file. Do not use unnecessary white space or a "graphic abstract" header within the image file.

Keywords [In Spanish]

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Indicate 3 keywords in TNRoman and Bold No. 12

Introduction

Text in TNRoman No.12, single space.

General explanation of the subject and explain why it is important.

What is your added value with respect to other techniques?

Clearly focus each of its features

Clearly explain the problem to be solved and the central hypothesis.

Explanation of sections Chapter.

Development of headings and subheadings of the chapter with subsequent numbers

Products in development No.12 TNRoman, single spaced.

Including figures and tables-Editable

In the Chapter content any figure and table should be editable formats that can change size, type and number of letters, for the purposes of edition, these must be high quality, not pixelated and should be noticeable even reducing image scale.

[Indicating the title at the top with No.12 and TNRoman Bold]

Box

Table 1

Title [Should not be images-everything must be editable]

Source [in italic]

Box

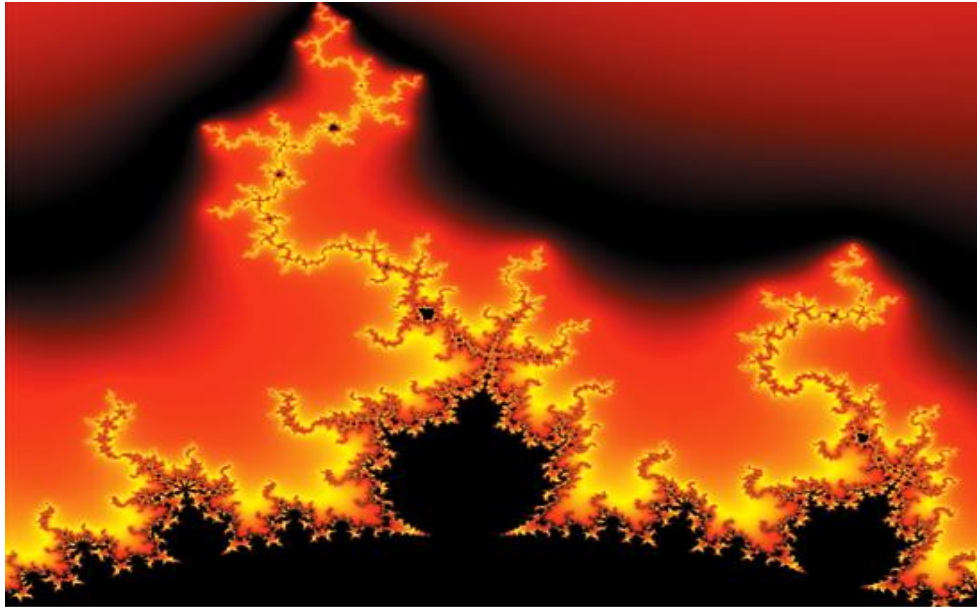


Figure 1

Title [Should not be images-everything must be editable]

Source [in italic]

The maximum number of Boxes is 10 items

For the use of equations, noted as follows:

$$\int_{lim^{-1}}^{lim^1} = \int \frac{lim^1}{lim^{-1}} = \left[\frac{1[-1]}{lim} \right]^2 = \frac{[0]^2}{lim} = \sqrt{lim} = 0 = 0 \rightarrow \infty \quad [1]$$

Must be editable and number aligned on the right side.

Methodology

Develop give the meaning of the variables in linear writing and important is the comparison of the used criteria.

Results

The results shall be by section of the chapter.

Conclusions

Clearly explain the results and possibilities of improvement.

Annexes

Tables and adequate sources.

The international standard is 7 pages minimum and 14 pages maximum.

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Declarations

Conflict of interest

The authors declare no interest conflict. They have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence in this chapter.

Author contribution

Specify the contribution of each researcher in each of the points developed in this research.

Prot-

Benoit-Pauleter, Gerard: Contributed to the project idea, research method and technique.

Availability of data and materials

Indicate the availability of the data obtained in this research.

Funding

Indicate if the research received some financing.

Acknowledgements

Indicate if they were financed by any institution, University or company.

Abbreviations

List abbreviations in alphabetical order.

ANN Artificial Neural Network

References

Use APA system. Should not be numbered, nor with bullets, however if necessary numbering will be because reference or mention is made somewhere in the chapter.

Use the Roman alphabet, all references you have used should be in Roman alphabet, even if you have cited a chapter, book in any of the official languages of the United Nations [English, French, German, Chinese, Russian, Portuguese, Italian, Spanish, Arabic], you should write the reference in Roman alphabet and not in any of the official languages.

Citations are classified the following categories:

Antecedents. The citation is due to previously published research and orients the citing document within a particular scholarly area.

Basics. The citation is intended to report data sets, methods, concepts and ideas on which the authors of the citing document base their work.

Supports. The citing article reports similar results. It may also refer to similarities in methodology or, in some cases, to the reproduction of results.

Differences. The citing document reports by means of a citation that it has obtained different results to those obtained in the cited document. This may also refer to differences in methodology or differences in sample sizes that affect the results.

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Discussions. The citing article cites another study because it is providing a more detailed discussion of the subject matter.

The URL of the resource is activated in the DOI or in the title of the resource.

Prot-

Mandelbrot, B. B. [2020]. [Negative dimensions and Hölders, multifractals and their Hölder spectra, and the role of lateral preasymptotics in science](#). Journal of Fourier Analysis and Applications Special. 409-432.

Intellectual Property Requirements for editing:

- Authentic Signature in Color of [Originality Format](#) Author and Coauthors.
- Authentic Signature in Color of the [Acceptance Format](#) of Author and Coauthors.
- Authentic Signature in blue color of the [Conflict of Interest Format](#) of Author and Co-authors.

Reserva a la Política Editorial

ECORFAN Handbooks se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar la Obra Científica a la Política Editorial del ECORFAN Handbooks. Una vez aceptada la Obra Científica en su versión final, el ECORFAN Handbooks enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación de la Obra Científica.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito de la Obra Científica, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución.

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de la Obra Científica que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes de la Obra Científica deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia de la Obra Científica propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título de la Obra Científica:

- El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en esta Obra Científica ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en la Obra Científica, así como las teorías y los datos procedentes de otras Obras Científicas previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de esta Obra Científica se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en la Obra Científica.

Copyright y Acceso

La publicación de esta Obra Científica supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding México para su ECORFAN Handbooks, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada de la Obra Científica y la puesta a disposición de la Obra Científica en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título de la Obra Científica:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre la Obra Científica enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio a la Obra Científica el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de la Obra Científica. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con la Obra Científica que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter la Obra Científica a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Obras Científicas son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Obra Científica definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza de la Obra Científica presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

V|LEX [Plataforma global de inteligencia jurídica]

RESEARCH GATE [Alemania]

MENDELEY [Gestor de Referencias bibliográficas]

GOOGLE SCHOLAR [Índices de citas-Google]

REDIB [Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC]

Servicios Editoriales

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Handbooks con PLAGSCAN

Evaluación de Obra Científica

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Obra Científica

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Publicación de Obra Científica

Certificado de Obra Científica

Facturación por Servicio de Edición

Política Editorial y Administración

Park Pedregal Business 3580 – Adolfo Ruiz Cortines Boulevard, CP-01900. San Jeronimo Aculco Álvaro Obregón - Mexico City. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; E-mail: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

Vargas-Delgado, Oscar. PhD

Director Ejecutivo

Ramos-Escamilla, María. PhD

Director Editorial

Peralta-Castro, Enrique. MSc

Diseñador Web

Escamilla-Bouchan, Imelda. PhD

Programador web

Luna-Soto, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

Rosales-Borbor, Eleana. BsC

Filólogo

Ramos-Arancibia, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

[ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan], sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

Park Pedregal Business 3580 - Adolfo Ruiz Cortines Boulevard, CP-01900. San Jeronimo Aculco Álvaro Obregón - Mexico City.

21 Santa Lucia, CP-5220. Libertadores -Sucre - Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Moralarzal -Madrid-Spain.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas I - Santa Elena-Ecuador.

1047 Avenida La Raza - Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Avenida Suroeste, San Sebastian - León-Nicaragua.

31 Kinshasa 6593- Republique Démocratique du Congo.

Avenida San Quentin, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 kilometers, U.S. highway, Terra Alta house, D7 Mixco Zone 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Capitán, CP-2060. Luque City- Paraguay.

69 Street YongHe District, Zhongxin. Taipei-Taiwan.

43 Street # 30 -90 B. El Triunfo CP.50001. Bogotá-Colombia.

