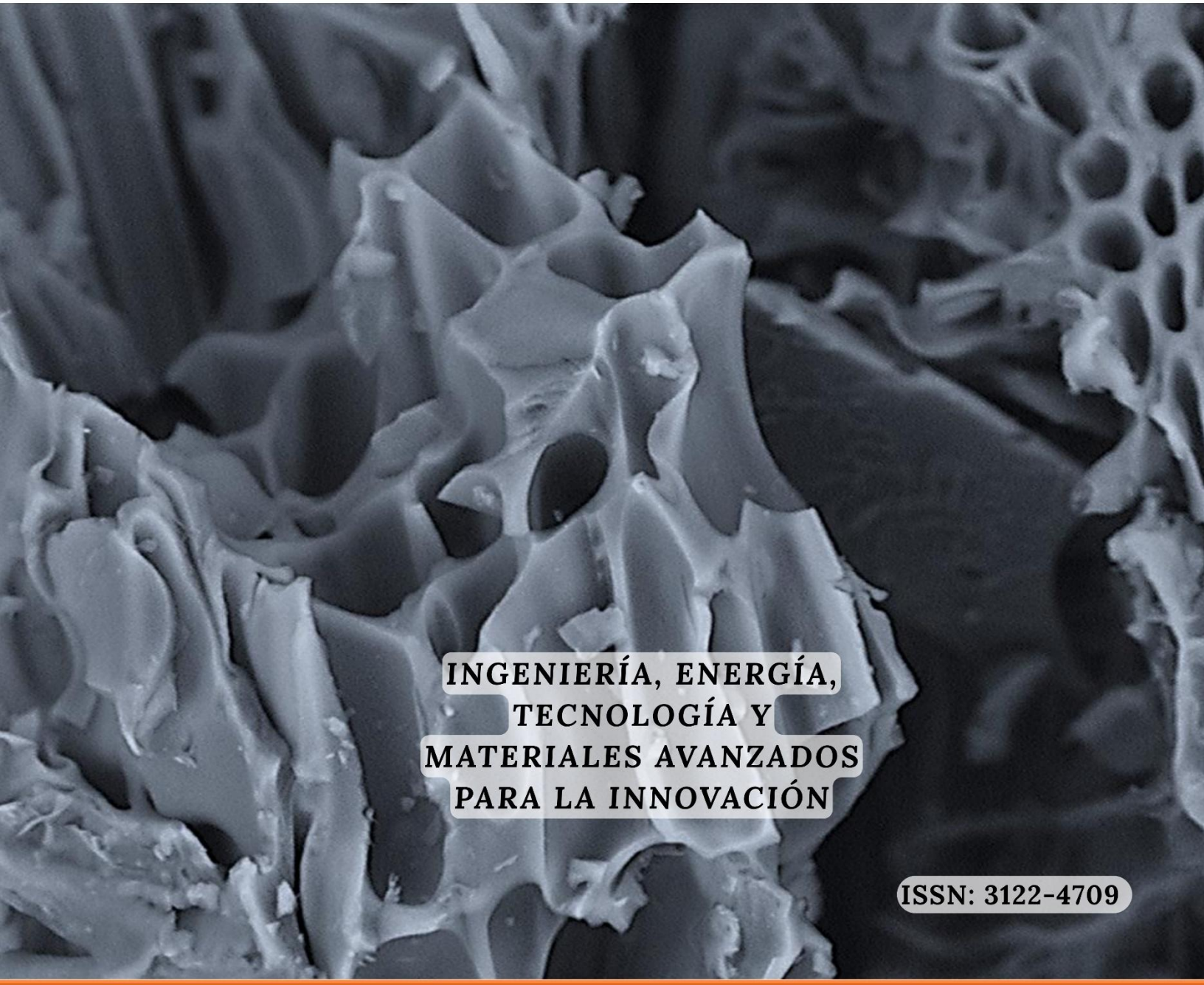
Volumen 01 | Número 02 Mayo - Agosto de 2026

INGÉNESIS

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA - BIOQUÍMICA Y CIENCIAS DE LA SALUD - CIENCIAS SOCIALES Y HUMANAS



INGENIERÍA, ENERGÍA, TECNOLOGÍA Y MATERIALES AVANZADOS PARA LA INNOVACIÓN

ISSN: 3122-4709

UN ESPACIO PARA LA CIENCIA, EL CONOCIMIENTO Y LA INNOVACIÓN

Educación
Secretaría de Educación Pública
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
División de estudios de Posgrado e Investigación


INGENESIS

INGÉNESIS

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA

EQUIPO EDITORIAL

EDITORA JEFA

Alma Dolores Pérez Santiago

CONSEJO EDITORIAL

Aldo Eleazar Pérez Ramos
Coordinador del Consejo Editorial

Juana Isabel Ramírez Hernández
Coordinadora del Comité Operativo

Víctor Manuel Jiménez Ramos
Coordinador del Comité Técnico Editorial

Karina Aidee Martínez García
Enlace de Gestión Editorial Administrativa

Julita Moreno Avendaño
Enlace de Gestión Legal, Documental y Estadísticas

Miguel Ángel Osorio Hernández
Enlace del Comité Técnico Editorial

EDITORES DE ÁREA

Carlos Mauricio Lastre Domínguez
Ingeniería y Tecnología Aplicada

Iván Antonio García Montalvo
Bioquímica y Ciencias de la Salud

Maricela Castillo Leal
Ciencias Sociales y Humanas

APOYO EN MAQUETACIÓN EDITORIAL

Luis Daniel García Martínez
Bryan Emmanuel Meraz López

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Oaxaca

INSTITUCIÓN EDITORA

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Oaxaca

AUTORIDADES INSTITUCIONALES

Silvia Santiago Cruz | Directora del TecNM / Instituto Tecnológico de Oaxaca

Alma Dolores Pérez Santiago | Subdirectora Académica

Iván Antonio García Montalvo | Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

NOTA SOBRE EL PROCESO EDITORIAL DE ESTE NÚMERO

La coordinación y el seguimiento editorial del presente número estuvieron a cargo del Dr. Carlos Mauricio Lastre Domínguez, Editor de Área de Ingeniería y Tecnología Aplicada, conforme a las políticas y los procedimientos editoriales de la revista. Los artículos que integran este número fueron recibidos en el marco de la convocatoria orientada a tecnologías emergentes aplicadas, desarrollada del 1 al 30 de agosto de 2025, y posteriormente sometidos a un proceso de evaluación por pares bajo la modalidad de doble ciego. El contenido y los resultados presentados en los artículos son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos publicados, siempre que se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la revista.

CINTILLO LEGAL

INGÉNESIS, Año 1, Núm. 2, mayo-agosto de 2026, es una publicación cuatrimestral electrónica editada por el **Tecnológico Nacional de México**, Avenida Universidad No. 1200, 5º Piso, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, teléfono **5536002500**, a través del **Instituto Tecnológico de Oaxaca**. Página electrónica de la revista: **https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista**
Correo electrónico: **revista.ingenesis@itoaxaca.edu.mx**
Editora responsable: **Dra. Alma Dolores Pérez Santiago**. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo **No. 04-2025-120309551700-102**, ISSN: **3122-4709** — ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: **Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos**, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, Col. Centro, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, C.P. 68030. Fecha de última modificación: **31 de agosto de 2026**. Tamaño del archivo: **4 MB**.



Estimada comunidad académica, científica y tecnológica. Es un honor presentar el segundo número de la revista multidisciplinaria INGÉNESIS, una edición especial que en esta ocasión, reúne las contribuciones seleccionadas en el campo de la ingeniería. Este espacio editorial refleja el compromiso continuo del Instituto Tecnológico de Oaxaca con el avance del conocimiento, la investigación multidisciplinaria y la innovación con impacto social.

Los trabajos reunidos en este número abordan problemáticas y avances estratégicos articulados en cuatro ejes temáticos: inteligencia artificial aplicada a sectores estratégicos; diseño y aplicaciones avanzadas de circuitos integrados y sistemas embebidos; electromovilidad y tecnologías para el transporte sustentable; y ciencia de los materiales y nuevas tecnologías de manufactura. Cada artículo seleccionado refleja el rigor metodológico, la creatividad tecnológica y la dedicación de investigadoras, investigadores y estudiantes que transforman la teoría en soluciones tangibles para nuestro entorno.

Expreso mi más sincero reconocimiento a las autoras, los autores y estudiantes por su dedicación. Asimismo, agradezco a la editora jefa, al consejo editorial de INGÉNESIS, al editor del área de ingeniería y a todas las personas que, con sus conocimientos, liderazgo y creatividad, participaron en el desarrollo de este segundo número y realizaron el cuidadoso trabajo de selección y edición.

Invito a toda la comunidad académica y al público interesado a profundizar en estos conocimientos, con la seguridad de que las contribuciones aquí reunidas impulsarán nuevas redes de colaboración y futuros avances en beneficio de nuestra sociedad.

Atentamente,

Silvia Santiago Cruz
Directora del TecNM / Instituto Tecnológico de Oaxaca.



Con gran entusiasmo les damos la bienvenida a este número de **INGÉNESIS**, dedicado íntegramente a contribuciones sobresalientes de distintas áreas de la ingeniería. Esta edición representa un logro importante en la difusión del conocimiento científico y tecnológico generado en las aulas y los laboratorios de las instituciones de educación superior y los centros de investigación que en esta ocasión colaboraron con el Tecnológico Nacional de México.

En concordancia con el propósito de promover las áreas prioritarias de investigación en ingeniería y ofrecer un espacio de encuentro para investigadoras, investigadores y académicos interesados en la transferencia tecnológica, el proceso de selección y arbitraje de este número se llevó a cabo con rigor, a fin de asegurar la calidad y pertinencia de cada artículo.

Esta publicación integra investigaciones de vanguardia sobre inteligencia artificial aplicada a sectores estratégicos; diseño y aplicaciones avanzadas de circuitos integrados y sistemas embebidos; electromovilidad y tecnologías para el transporte sustentable; así como ciencia de los materiales y nuevas tecnologías de manufactura. En conjunto, los trabajos presentan avances orientados al desarrollo de materiales más eficientes, sistemas tecnológicos innovadores y procesos de producción inteligentes.

Agradezco profundamente la labor de quienes participaron en la dictaminación de los artículos y del Comité Editorial, cuyo invaluable apoyo hizo posible la consolidación de este número. Asimismo, felicito a las autoras y los autores por la calidad de sus trabajos y los invito a continuar contribuyendo al avance del conocimiento científico y tecnológico en beneficio de la sociedad.

Esperamos que disfruten esta lectura tanto como nosotros disfrutamos el proceso de hacerla posible.

Atentamente,

Alma Dolores Pérez Santiago

Editora Jefa de la revista INGÉNESIS

ÍNDICE

Sistema de medición eléctrico y lumínico para paneles solares 1

Juan Diego Castillo Irineo, Germán Baltazar González, Brenda Ximena Contreras Perroni, Norvind Alejandro Cardona García, Maylú Guadalupe Romero Sánchez

Revisión en producción de hidrógeno usando un método biológico 8

Jesica A. Jiménez Mendoza, Magdaleno Caballero Caballero, Fernando Chiñas-Castillo, Luis H. Robledo Taboada

Efecto de ciclos SILAR y dopaje de plata en películas delgadas de ZnO 14

Luis Alfonso García Cerda, Víctor Hugo Martínez Landeros, Edson Edgardo Guipzot Sánchez

Análisis del riesgo de corrosión de concretos reforzados empleando técnicas de *machine learning* 22

Silvia Olivia Ramírez Martínez, Esteban López Vázquez, Carlos Mauricio Lastre Domínguez, Marco Antonio Maldonado García

Estudio de la polarización en PEDOT:PSS bajo diferentes longitudes de onda para aplicaciones optoelectrónicas 28

Alinne Estefania Espinosa Lozoya, Rubén Grajales Coutiño, Jorge Luis Camas Anzueto, Alfredo Rossel Morales Navarro, Claudia Ivette Ruiz Suárez


INGÉNESIS

INGÉNESIS | VOLUMEN 1 · NÚMERO 2 · MAYO–AGOSTO DE 2026 · PP. 1–7

Sistema de medición eléctrico y lumínico para paneles solares

Electrical and light measurement system for solar panels

Juan Diego Castillo Irineo [1], Germán Baltazar González [2]*, Brenda Ximena Contreras Perroni [3], Norvind Alejandro Cardona García [4] , Maylú Guadalupe Romero Sánchez[5]*

[1] Universidad Politécnica de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 0009-0009-8976-8932, 123047316@upq.edu.mx
[2] Universidad Politécnica de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 0009-0004-9651-0781, 123045771@upq.edu.mx
[3] Universidad Politécnica de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 0009-0002-2374-5905, 123046257@upq.edu.mx
[4] Universidad Politécnica de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 0000-0000-0000-0000, 123046236@upq.edu.mx
[5] TecNM-Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro., México, 0000-0003-1696-5811, maylu.rs@queretaro.tecnm.mx (*autor de correspondencia)

Recepción: 29/08/2025 | Aceptación: 12/06/2026 | Publicación: 31/08/2026
ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

Resumen—Este trabajo presenta un sistema preliminar de adquisición de datos de bajo costo para el monitoreo eléctrico y lumínico de paneles solares de baja potencia. El sistema integra un microcontrolador Arduino Uno con un multiplexor I²C (Inter-Integrated Circuit) modelo TCA9548A, un convertidor analógico-digital ADS1115 para medición de voltaje, un monitor de corriente/potencia INA219 y un sensor de iluminancia BH1750. Los datos adquiridos se transmiten mediante comunicación serial a un script desarrollado en Python, que registra las mediciones y los convierte en archivos de Excel para su posterior análisis. La propuesta permite monitorear simultáneamente el voltaje, la corriente y la iluminancia, así como estimar la irradiancia efectiva mediante la conversión de lux a W/m². Los resultados experimentales muestran una relación directa entre la irradiancia estimada, la potencia generada y la eficiencia fotovoltaica con un coeficiente de correlación de 0.8576 y junto con desviaciones menores a ±2 % en voltaje y ±5 % en corriente. El sistema constituye una plataforma replicable para entornos académicos con caracterización inicial de sistemas fotovoltaicos, y se considera como base de diseño para futuras implementaciones de trazado automático de curvas I–V (Corriente-Voltaje).

Palabras clave—Arduino Uno, eficiencia fotovoltaica, I²C, medición eléctrica.

Abstract—This work presents a preliminary low-cost data acquisition system for the electrical and light monitoring of low-power solar panels. The system integrates an Arduino Uno microcontroller with a TCA9548A Inter-Integrated Circuit (I²C) multiplexer, an ADS1115 analog-to-digital converter for voltage measurement, an INA219 current/power monitor, and a BH1750 illuminance sensor. The acquired data were transmitted via serial communication to a Python-based script that recorded the measurements and stored them in Excel files for subsequent analysis. The proposed system enables the simultaneous monitoring of voltage, current, and illuminance, as well as the estimation of effective irradiance by converting lux to W/m². The experimental results show a direct relationship between the estimated irradiance, generated power, and photovoltaic efficiency, with a correlation coefficient of 0.8576 and deviations of less than ±2 per cent in voltage and ±5 per cent in current. The system represents a replicable platform for academic environments and the initial characterization of photovoltaic systems, and is considered a design basis for future implementations of automatic I–V curve tracing.

Keywords—Arduino Uno, photovoltaic efficiency, I²C, electrical measurement.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las fuentes renovables de mayor crecimiento a nivel mundial. Según el informe Renewable Capacity Statistics 2024 de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) [1], en 2023 se agregaron 345,5 GW de nueva capacidad fotovoltaica, lo que representó un incremento del 32,2 % respecto al año anterior. Este aumento sin precedentes estuvo liderado principalmente por China, responsable de casi tres cuartas partes de la expansión global.

Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Su eficiencia depende de múltiples factores, entre los que destacan la irradiancia solar incidente, la temperatura de operación del módulo, la orientación e inclinación de los paneles, así como las características eléctricas intrínsecas de las celdas solares [2]. Una de las principales limitaciones técnicas de la energía solar es su variabilidad, lo que obliga a implementar sistemas de monitoreo y control que permitan medir parámetros eléctricos y ambientales en tiempo real.

Uno de los factores que es de mayor interés es la irradiancia (E), definida como la potencia por unidad de área recibida del sol en forma de radiación electromagnética (W/m²) y está directamente relacionada con la generación de corriente y voltaje en un panel solar. Sin embargo, este factor es variable respecto al tiempo, ubicación y condiciones climáticas.

Por otro lado, existen dispositivos como luxómetros que registran la iluminancia en lux (lx), unidad que representa la cantidad de flujo luminoso percibido por el ojo humano en una superficie. Estos dispositivos tienen ventajas importantes, como ser económicos, sensibles a niveles bajos de luz y de fácil acceso. Por lo tanto, establecer un factor de conversión entre la iluminancia y la irradiancia permite emplear estos dispositivos como herramientas de estimación y apoyo experimental para evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico.

Existen reportes que abordan precisamente esta problemática en [3] se propone un marco teórico y experimental para guiar la conversión entre ambas magnitudes, con el fin de habilitar aplicaciones prácticas en el monitoreo de sistemas fotovoltaicos, las diferencias entre irradiancia e iluminancia radican en la relación en la que se mide el flujo de fotones sobre una superficie. La irradiancia (W/m²) mide la potencia total que llega a una superficie sin considerar la percepción humana, e incluye todo el rango espectral, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. La iluminancia (lux) mide la densidad del flujo luminoso ponderada por la respuesta espectral del ojo humano, por ello, se limita al rango visible (aprox. 380–780 nm) y se expresa en lúmenes por metro cuadrado (lm/m²).

La conversión entre lux e irradiancia constituye un puente esencial para la aproximación en la medición de la radiación solar en aplicaciones fotovoltaicas.

En la ecuación 1, se establece que,

$$\mathrm{E}\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right) \approx \frac{\mathrm{L(lx)}}{k_m} \qquad (1)$$

donde L (lx) es la iluminancia medida en lux y km ∈ [116, 122] y es un factor de conversión empírica expresado en lx/(W/m²). En este estudio se considera el estándar ASTM G173 aunado a las mediciones experimentales, donde 1 W/m² es equivalente a 116 lux en exteriores y a 122 lux en exteriores bajo entornos

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

reales.

Un problema latente en los sistemas fotovoltaicos es la existencia de factores externos, tales como la acumulación de polvo, la humedad relativa, la presencia de aerosoles, la contaminación atmosférica y las sombras proyectadas, que afectan significativamente la cantidad de luz efectiva que alcanza la superficie del panel [4]. Recientemente, se ha demostrado que la disminución de la irradiancia provocada por estos factores afecta la potencia de salida, aun cuando el cielo se encuentra despejado [5].

Para tales problemas, se emplean equipos más robustos que recolectan con mayor precisión y exactitud variables eléctricas que establecen el resultado en el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares, tales como los piranómetros, trazadores de curvas I-V y multímetros de alta precisión; sin embargo, implica un aumento significativo en el costo para la adquisición de dichos equipos para instituciones académicas de bajos recursos [6]. Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar un sistema asequible y replicable que integre dispositivos de bajo costo para análisis de variables eléctricas de paneles solares. Una alternativa prometedora es considerar dispositivos como Arduino UNO que integren sensores de corriente, de voltaje e iluminancia.

El presente trabajo propone un sistema preliminar de medición basado en Arduino Uno que emplea un multiplexor I²C (TCA9548A) y tres sensores: el ADS1115 para voltaje, el INA219 para corriente y potencia, y el BH1750 para medir la iluminancia en tiempo real y estimar la eficiencia del panel solar, así como establecer la base instrumental para futuras implementaciones de trazado automático de curvas I–V en condiciones reales de operación.

La contribución de este trabajo radica en la integración de dispositivos de bajo costo para la medición de voltaje, corriente e iluminancia, con estimación de la irradiancia, mediante una arquitectura multiplexada I²C escalable. Con este trabajo se pretende aportar una herramienta sencilla y económica que permita a estudiantes e investigadores caracterizar el comportamiento de paneles solares de manera más asequible.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño de hardware

El sistema propuesto se basa en un microcontrolador Arduino Uno, que actúa como nodo central de adquisición de datos y coordina la comunicación con tres sensores especializados a través del protocolo I²C. Para ampliar la capacidad de conexión y evitar conflictos de direcciones, se incorporó un multiplexor digital TCA9548A [7], con ocho canales independientes.

Este componente permite seleccionar dinámicamente el canal de comunicación, garantizando que cada sensor pueda enviar datos sin interferencia. La arquitectura del sistema se muestra en la Fig. 1. Los sensores empleados fueron los siguientes:

1) ADS1115: convertidor analógico-digital de 16 bits, capaz de registrar señales de voltaje con una precisión de 0.1875 mV hasta 3 mV por bit. Su uso en este sistema asegura una medición precisa de la diferencia de potencial generada por el panel solar. El rango de operación ajustable (de ±0.256 a ±6.144 V) facilita la adaptación a distintos niveles de voltaje característicos de paneles de pequeña escala [8].
2) INA219: monitor de corriente y potencia con conversor ADC interno de 12 bits. Este sensor mide la caída de tensión en una resistencia shunt de 0.1 Ω y el voltaje en el bus para obtener indirectamente la corriente generada por el panel. Adicionalmente, entrega valores de corriente y de voltaje con un margen de error de 0.5–1 % [9].
3) BH1750: sensor digital de iluminancia que mide en el rango de 1 a 65,535 lux, con una resolución mínima de 1 lux. Opera con un fotodiodo interno y conversión analógica-digital de 16 bits [10].

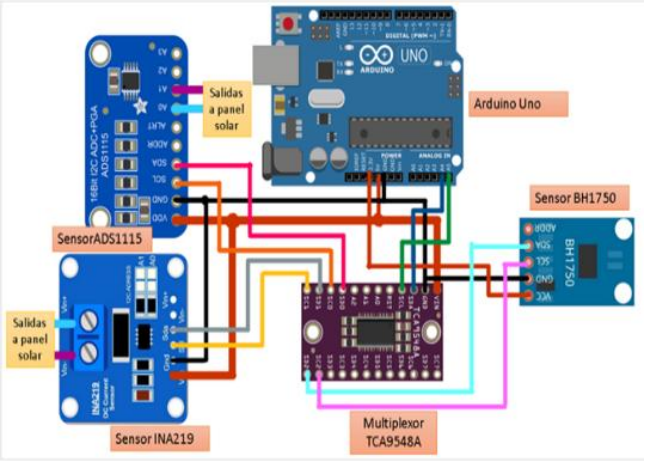


Fig. 1. Diagrama en bloques del sistema de medición

B. Comunicación y flujo de datos e implantación de software

El Arduino Uno establece comunicación serial con la computadora a 115200 baudios. El programa en Arduino se desarrolló en el entorno Arduino IDE utilizando librerías específicas de Adafruit (Adafruit_ADS1X15, Adafruit_INA219 y BH1750). El flujo de datos sigue la secuencia:

1) Selección del canal del TCA9548A mediante escritura de un byte de control en su dirección I²C (0x70).
2) Activación del sensor correspondiente al canal.
3) Lectura de los registros internos del ADS1115 (voltaje y en mV), del INA219 (corriente en mA) y del BH1750 (iluminancia en lux).
4) Conversión de los valores a unidades físicas y ensamblaje en formato CSV y se transmiten vía USB a la PC.
5) Envío de la cadena de texto por el puerto serial USB.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

Este procedimiento se ejecuta cada 15 minutos, aunque la frecuencia de muestreo puede configurarse para aplicaciones de mayor resolución temporal. Esta selección de periodos de toma de lecturas es la misma para la comparación con los instrumentos de referencia.

En el lado de la PC se implementó un script en Python que utiliza las librerías PySerial para la comunicación, Pandas para la manipulación de datos y OpenPyXL para la exportación a Excel. De esta manera, cada línea recibida se convierte en una fila con sello de tiempo, voltaje, corriente e iluminancia, generando un registro histórico fácilmente analizable.

C. Validación del sistema

La validación consistió en emplear un panel solar de 6V/1W de 0.0127 m2 de área, con una fuente de corriente continua calibrada. Se compararon los valores obtenidos con un multímetro Fluke, para tener una comparación del sistema frente a un instrumento de referencia. Cada lectura se realizó durante periodos de 15 min en condiciones exteriores en un intervalo de tiempo de 10:00 am hasta la 4:00 pm. Al mismo tiempo que se registraban las mediciones con los sensores INA219 y ADS1115.

La validación del sensor BH1750 se realizó mediante la comparación de sus lecturas con las obtenidas por un luxómetro marca GreenTech, modelo LX1010B, con exactitud nominal de ±5%. Las mediciones se efectuaron en un ambiente interior controlado, dentro de un intervalo de iluminación de 0 a 50 000 lx, evitando la incidencia directa de luz solar y procurando condiciones estables durante el proceso de medición.

D. *Definición de la eficiencia fotovoltaica*

La eficiencia del panel solar se define por la ecuación (2),

$$\eta = \frac{V*I}{E*A} x100 \qquad (2)$$

donde:

E corresponde a la irradiancia (convertida desde lux)
A corresponde al área activa de la celda
V corresponde al voltaje de salida
I corresponde a la corriente de salida

Este parámetro permite comparar el desempeño del panel en distintas condiciones de la irradiancia (basada en una estimación derivada de la iluminancia) y evaluar la utilidad del sistema en estudios de eficiencia fotovoltaica, sin considerar valores absolutos bajo condiciones estándar o la temperatura del panel.

III. RESULTADOS

El sistema propuesto logró integrar correctamente los tres sensores mediante el multiplexor I²C, lo que permitió la adquisición sincronizada de voltaje, corriente e iluminancia en intervalos regulares. La implementación en campo se realizó durante un periodo de observación de 12:00 p.m. a 7:00 p.m., con un muestreo cada 15 minutos. Las variables medidas incluyeron la iluminancia, la irradiancia, el voltaje y la corriente de salida del panel solar.

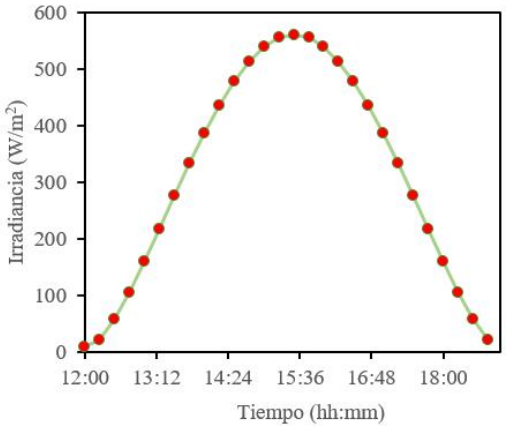


Fig. 2. Irradiancia medida a lo largo del día cada 15 minutos.

La Fig. 2 muestra el perfil de irradiancia a lo largo del día y muestra un incremento progresivo desde el mediodía, alcanzando un máximo alrededor de las 14:30 h, coincidente con la mayor elevación solar. Posteriormente, los valores decaen hacia la tarde conforme disminuye el ángulo de incidencia de la radiación solar.

Este comportamiento reproduce la curva esperada de irradiancia diaria en condiciones de cielo parcialmente despejado y muestra que el sensor BH1750 fue capaz de captar las variaciones lumínicas con suficiente sensibilidad.

En la Tabla 1 se muestra la calibración del sensor BH170 con respecto a la referencia en luxes. Se observa que el sensor mostró mediciones con errores relativos inferiores al 3 % en valores de 0-300 lx. En los valores entre 600–1000 lx el error relativo se mantuvo alrededor de 4 al 5 %.

En valores altos de irradiancia, cercanos a 5000 lx y superiores, se observaron desviaciones más notorias, alcanzando un error relativo máximo del 11 % a 5000 lx. Sin embargo, al aumentar hasta 50 000 lux, el error se redujo nuevamente al 1.60 %.

Tabla I. Calibración del sensor BH1750

Referencia (lx)	BH1750 (lx)	Error Abs (lx)	Error Rel. (%)
0	0.00	0.00	
10	9.84	0.16	1.64
16	16.30	0.30	1.90
26	26.71	0.71	2.74
41	42.08	1.08	2.64
66	64.90	1.10	1.67

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

107	104.68	2.32	2.17
171	174.28	3.28	1.92
274	268.41	5.59	2.04
441	422.57	18.43	4.18
707	737.80	30.80	4.36
1135	1194.24	59.24	5.22
1822	1937.44	115.44	6.34
2924	2686.38	237.62	8.13
4693	5209.28	516.28	11.00
7533	6708.68	824.32	10.94
12091	10889.16	1201.84	9.94
19408	21024.73	1616.73	8.33
31151	32941.18	1790.18	5.75
50000	49200.00	800.00	1.60

Adicionalmente, con el fin de fortalecer la evaluación cuantitativa del sensor BH1750 frente al instrumento de referencia, se calcularon métricas complementarias de error: error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error porcentual absoluto medio (MAPE), como se muestra en la Tabla II.

Tabla II. Métricas estadísticas complementarias de error

Métrica estadística	Valor
MAE	361.27 lx
RMSE	667.97 lx
MAPE	4.86 %

Para el conjunto completo de mediciones, el MAE fue de 361.27 lx y el RMSE de 667.97 lx. El MAPE fue de 4.86 %, calculado únicamente para los valores distintos de cero, debido a que el error porcentual no puede definirse cuando la iluminancia de referencia es 0 lx. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9972$ entre las lecturas del BH1750 y el luxómetro de referencia, lo que evidencia una alta linealidad del sensor dentro del intervalo evaluado. Estos resultados indican que, aunque el error absoluto aumenta en niveles elevados de iluminancia, el error porcentual promedio se mantiene por debajo del 5 %.

No obstante, se reconoce que para aplicaciones metrológicas o certificadas sería necesario emplear un piranómetro o un luxómetro calibrado como instrumento patrón.

Los resultados eléctricos del sistema mostraron desviaciones menores a ±2% en voltaje y ±5% en corriente respecto a la referencia. Se han reportado sistemas de adquisición de datos asistidos por Arduino para caracterización fotovoltaica con errores porcentuales bajos, lo que respalda la viabilidad de plataformas de bajo costo. Pachauri et al. [12] reportaron errores porcentuales de 0.48 %, 1.95 % y 1.37 % en un sistema asistido por Arduino para la caracterización de arreglos fotovoltaicos bajo condiciones de sombreado parcial, al comparar el hardware experimental con resultados de MATLAB/Simulink. Además, describen el sistema como económico y útil para la adquisición en tiempo real de voltaje y corriente.

En este sentido, las desviaciones observadas en el presente trabajo son coherentes con el alcance experimental del sistema propuesto y con su orientación hacia aplicaciones de bajo costo, la docencia y la investigación inicial [13], aunque no sustituyen la validación metrológica requerida en aplicaciones certificadas.

En la Fig. 3. se presenta la relación entre irradiancia y potencia generada ($P=V \cdot I$). Se observa un incremento casi lineal de la potencia eléctrica en función de la irradiancia medida. Los resultados sugieren una correlación directa entre la intensidad luminosa y la generación de energía eléctrica en el panel, lo cual es consistente con la teoría fotovoltaica que establece que la corriente generada es proporcional al número de fotones incidentes sobre la superficie de la celda.

El análisis de regresión lineal arrojó un coeficiente de determinación $R^2 \approx 0.8576$, lo que indica un moderado-alto grado de correlación entre la irradiancia estimada y la potencia de salida del panel. La desviación estándar de los residuales fue de aproximadamente 14.01 mW, lo que evidencia un comportamiento predictivo razonablemente consistente.

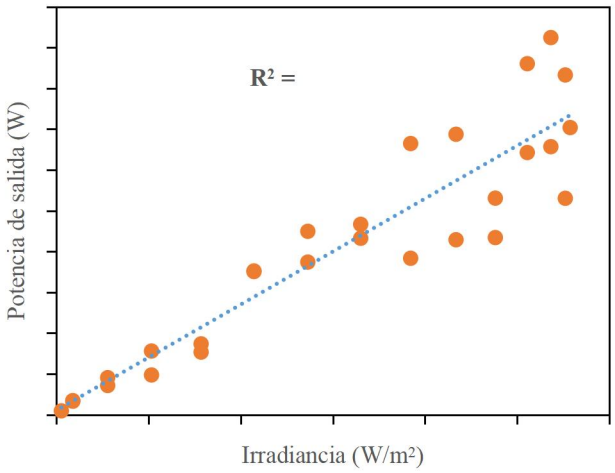


Fig 3. Relación de irradiancia vs. Potencia

Estos valores se encuentran en línea con los reportados por Cruz-Vázquez et al. en estudios previos [4], quienes analizaron sistemas fotovoltaicos urbanos y encontraron que la correlación entre la irradiancia y la potencia medida se

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

mantiene alta ($R^2 > 0.85$) en condiciones de cielo despejado, aunque puede disminuir en presencia de nubosidad o contaminación atmosférica.

Usando los valores calculados de la irradiancia y la potencia, la Fig. 4. presenta la eficiencia resultante.

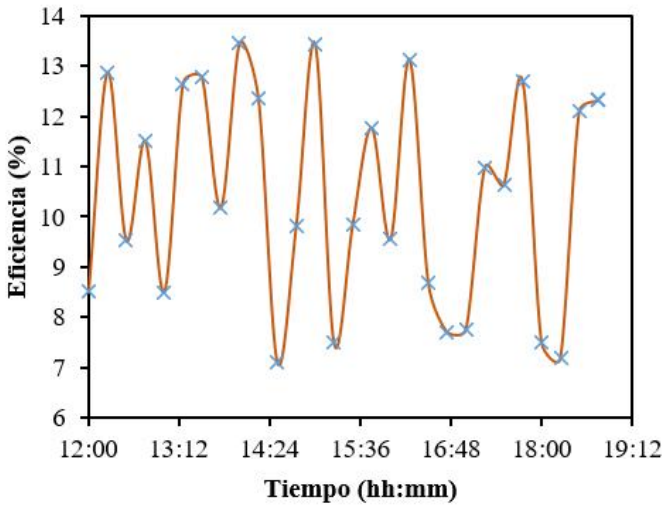


Fig 4. Relación de eficiencia vs Tiempo (hh:mm)

La Fig. 4 muestra la eficiencia calculada a lo largo del período de prueba. Se observa un pico entre las 13:00 y las 15:00 h, correspondiente a la mayor irradiancia del día. Posteriormente, la eficiencia decrece al inicio y al final del intervalo debido a la reducción de la radiación incidente y al incremento de pérdidas por ángulos de incidencia menos favorables. Este patrón es típico en instalaciones de ángulo fijo, donde el panel no sigue la trayectoria solar y, por lo tanto, su rendimiento depende directamente de la geometría de iluminación [11].

La comparación de los resultados con los reportados en la literatura muestra que el sistema desarrollado reproduce adecuadamente las tendencias globales observadas en la generación fotovoltaica. Asimismo, se ha reportado [11] que los parámetros de rendimiento de los sistemas conectados a red presentan máximos de eficiencia en horarios cercanos al mediodía solar, con descensos al inicio y al final del día, en relación con lo observado en este trabajo.

Las pruebas realizadas demuestran la capacidad del sistema para captar de manera confiable los cambios en la iluminancia y obtener la estimación de irradiancia, así mismo lograr correlacionarlos con la producción eléctrica del panel solar. El uso de sensores de bajo costo demostró ser suficiente para caracterizar la curva de eficiencia diaria, sin considerar temperatura del panel o condiciones estándar, pero permite su fácil implantación para entornos académicos.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que el sistema de adquisición de datos propuesto permite registrar de forma integrada variables eléctricas y lumínicas asociadas al desempeño de un panel solar de baja potencia.

La correlación encontrada entre la irradiancia estimada a partir de iluminancia y la potencia generada fue de $R^2 \approx 0.8576$ y es consistente con tendencias reportadas en la literatura que emplearon instrumentación de mayor precisión. Se ha documentado que en sistemas fotovoltaicos urbanos, los valores de R^2 entre la irradiancia y la potencia eléctrica suelen superar 0.85 en condiciones de cielo despejado, lo cual concuerda con lo observado en este trabajo [4].

Asimismo, el perfil diario de eficiencia registrado coincide con los resultados reportados por Marion et al. [11], donde se analizaron parámetros de rendimiento en sistemas conectados a red, encontrando que la máxima eficiencia ocurre alrededor del mediodía solar y decrece hacia el atardecer debido a los ángulos de incidencia y a cambios espectrales en la radiación solar.

La evaluación experimental se centró en demostrar la funcionalidad integrada de los sensores y la consistencia de las tendencias observadas. Estudios posteriores incluirán resultados de medición prolongadas para evaluar la repetibilidad y la estabilidad a largo plazo.

Una de las ventajas del sistema preliminar propuesto es su bajo costo y facilidad de implementación. Al emplear sensores de bajo costo y un microcontrolador de uso genérico facilita su replicación y adaptación a distintos contextos. Además, la integración de un multiplexor I^2C permite escalar el sistema para medir simultáneamente múltiples paneles solares y módulos adicionales.

Asimismo, se identifican limitaciones importantes relacionadas, una de ellas es la estimación de la irradiancia a partir de un sensor de iluminancia (BH1750) que implica asumir una conversión aproximada entre lux y W/m^2, la cual depende del espectro de la fuente luminosa. Esta aproximación puede introducir errores adicionales en condiciones de nubosidad, con presencia de aerosoles o contaminantes atmosféricos, en las que el espectro solar difiere del estándar AM1.5 [3]. Aunque en este trabajo se obtuvo una correlación aceptable, la precisión podría mejorarse mediante la calibración del sensor frente a un piranómetro de referencia.

Otra limitación se asocia con la frecuencia de muestreo, ya que en las pruebas se empleó un intervalo de 15 minutos, suficiente para trazar el perfil de un día, pero insuficiente para capturar variaciones rápidas ocasionadas por la nubosidad transitoria o sombras parciales. Un aumento en la frecuencia de muestreo permitiría un análisis más detallado del impacto de estos factores sobre la potencia de salida. Cabe mencionar que el sistema propuesto se comparó con equipos de medición estándar para su calibración y la toma de datos en campo para fines académicos. En términos de aplicación práctica el sistema no pretende reemplazar la instrumentación profesional,

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

sino emplear el sistema como una plataforma replicable para entornos académicos.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales del trabajo propuesto mostraron que el sistema de medición de paneles solares es capaz de ofrecer diferencias relativas inferiores al 5 %, bajo las condiciones experimentales evaluadas. La correlación lineal entre la irradiancia estimada y la potencia generada, con un $R^2 \approx 0.8576$, junto con desviaciones menores a ±2 % en voltaje y ±5 % en corriente. Sin embargo, se detectaron limitaciones en el enfoque experimental. La conversión de iluminancia (lux) a irradiancia (W/m2) introduce incertidumbre, ya que el sensor BH1750 mide solo la iluminación visible y no la irradiancia total incidente. En el desarrollo de los experimentos se realizaron comparaciones con otros equipos de medición estándar, como el multímetro Fluke y el luxómetro exclusivamente.

Como trabajo futuro, se propone mejorar la calibración del sensor BH1750 bajo estándares más rigurosos, integrar sensores adicionales, como temperatura, humedad y polvo, desarrollar un sistema de trazado automático de curvas I-V y almacenar los datos en la nube para su visualización en tiempo real.

DECLARACIONES ÉTICAS Y DE TRANSPARENCIA

Financiamiento: La investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autoría: Los autores participaron en la conceptualización, el desarrollo metodológico, el análisis de resultados, la redacción, la revisión crítica y la aprobación final del manuscrito.

Disponibilidad de datos: Los datos derivados de este estudio están disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia.

Aprobación ética: No aplica.

Consentimiento informado: No aplica.

Uso de herramientas de inteligencia artificial: Los autores declaran que utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa para la revisión gramatical, la corrección ortográfica y coherencia. Los autores revisaron y validaron el contenido final del manuscrito.

REFERENCIAS

[1] IRENA, “Renewable Capacity Statistics 2024”, International Renewable Energy Agency, abr. 2024. [En línea]. Disponible: https://www.irena.org/Data/Statistical-publications/Yearbooks

[2] R. Kayabaşı and M. Kaya,“Effect of Module Operating Temperature and Irradiance on Efficiency of PV Modules,” Journal of Thermal Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 163–175, 2023. https://doi.org/10.18186/thermal.1243519

[3] P. R. Michael, D. E. Johnston, and W. Moreno, “A Conversion Guide: Solar Irradiance and Lux Illuminance,”Journal of Measurements in Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 153–164, 2020. https://doi.org/10.21595/jme.2020.21667

[4] C. Cruz-Vázquez, J. Gómez, M. Álvarez-Morales, and A. Moreno-Martínez, “Measurement and analysis of irradiance for urban photovoltaic systems,” Nova Scientia, vol. 13, no. 26, pp. 1–29, 2021. https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2684.

[5] O. Bamisile, A. Dagbasi, F. Adaramola, and Y. Yilanci, “The environmental factors affecting solar photovoltaic output: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 208, p. 113232, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115073

[6] T. Khatib, A. Mohamed, K. Sopian, and M. Mahmoud, “Design of stand-alone photovoltaic systems: A review of methods,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 5, pp. 2513–2520, 2012. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.023

[7] Texas Instruments, “TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I²C Switch with Reset,” DS, Rev. H, sep. 2024. [En línea]. Disponible: https://www.ti.com/product/TCA9548A

[8] Texas Instruments, “ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs…,” DS, SBAS444E, Rev. E, dec. 2024. [En línea]. Disponible: https://www.ti.com/product/ADS1115

[9] Texas Instruments, “INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I2C Interface,” DS, Rev. G, oct. 2014. [En línea]. Disponible: https://www.ti.com/product/INA219

[10] Rohm Semiconductor, “BH1750FVI Digital 16bit Ambient Light Sensor IC (Light to Digital Converter),” Data Sheet, Rev. D, nov. 2011. [En línea]. Disponible: https://www.rohm.com/products/sensor-ics/light-color-sensors/bh1750

[11] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Canada, T. Narang, and S. Kroposki, “Performance parameters for grid-connected PV systems,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report NREL/TP-520-37358, 2005. https://doi.org/10.2172/15008801

[12] R. K. Pachauri, O. P. Mahela, B. Khan, A. Kumar, S. Agarwal, H. H. Alhelou, and J. Bai, “Development of arduino assisted data acquisition system for solar photovoltaic array characterization under partial shading conditions,” Computers and Electrical Engineering, vol. 92, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107175

[13] P. L. O. Machado, L. V. G. Fachini, E. T. Tiuman, T. M. Barchi, S. L. Stevan Jr., H. V. Siqueira, R. M. Szmoski, and T. Antonini Alves, “A Low-Cost Arduino-Based I–V Curve Tracer with Automated Load Switching for PV Panel Characterization,” Applied Sciences, vol. 15, no. 15, Art. no. 8186, 2025. https://doi.org/10.3390/app15158186.

INGÉNESIS | VOLUMEN 1 · NÚMERO 2 · MAYO–AGOSTO DE 2026 · PP. 08–13

Revisión en producción de hidrógeno usando un método biológico

Review on hydrogen production using a biological method

Jesica Ariadna Jiménez Mendoza[1], Magdaleno Caballero Caballero[2], Fernando Chiñas Castillo[3*], Luis Humberto Robledo Taboada[4].

[1] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, México, 0009-0009-8978-6524
[2] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, México, 0000-0003-3408-4161
[3] Depto. de Ingeniería Mecánica, TecNM/ITO, Mex., 0000-0003-1588-2459, fernandochinas@itoaxaca.edu.mx (Autor de correspondencia)
[4] Depto. de Ingeniería Industrial, TecNM/Instituto Tecnológico de Oaxaca, México, 0000-0003-0760-9508

Recepción: 08/09/2025 | Aceptación: 17/06/2026 | Publicación: 31/08/2026
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
ISSN: 3122-4709
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

Resumen—Ante los efectos de gases de efecto invernadero sobre el cambio climático, generadas por el uso de combustibles, se requieren alternativas de descarbonización, como las energías renovables. El hidrógeno se considera una fuente ecológica, sostenible y amigable con el medio ambiente, con un valor calórico de 120 a 142 kJ/g. El objetivo de este trabajo es estudiar las fuentes de biomasa, así como las condiciones de operación e indicadores de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura. Se realizó una revisión bibliográfica en Scopus, con búsquedas por recurso y por áreas. Los resultados bibliográficos se agruparon por fuente de biomasa, condiciones empleadas y producción obtenida. Adicionalmente, se encontró que el método de fermentación oscura es adecuado para la obtención de hidrógeno: una limitación del método de búsqueda es que no permite obtener información basada en los parámetros operativos para la producción de hidrógeno por la heterogeneidad de los estudios revisados, por lo que se recomendaría crear una base de datos con esta información.

Palabras clave—Biodisponibilidad, biomasa, energía e hidrógeno.

Abstract—Given the effects of carbon emissions on climate change generated using fuels, alternatives for decarbonization, such as renewable energies, are required. Hydrogen is considered a sustainable and environmentally friendly energy source, with a calorific value of 120-142 kJ/g, producing water as the final product and emitting almost no emissions. The objective of this work was to investigate biomass sources suitable for hydrogen production. A literature review was conducted in Scopus on hydrogen yields from various biomass types. The bibliographic results were grouped by biomass source, conditions used, and yield obtained. Additionally, it was found that the dark fermentation method is suitable for obtaining hydrogen, but it still requires optimization of substrate costs, provision of an inoculum, and investigation of factors that influence its yield.

Keywords—Bioavailability, biomass, energy and hydrogen.

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo existe una creciente preocupación por la descarbonización, por lo que se recurre a las energías renovables para mitigar los efectos de las emisiones de carbono, que han agravado el cambio climático [1]. Existen fuentes de energía renovable, tales como la eólica, la solar y la mareomotriz, que han sido exploradas y dependen de las condiciones climáticas, lo que implica un elevado costo de almacenamiento y transporte.

El hidrógeno, en cambio, es fácil de almacenar y transportar, tiene un mayor rendimiento energético (142.35 kJ/g) y utiliza agua en su producción, por lo que se considera limpio y su aplicación se facilita mediante la tecnología de pilas de combustible [2]. Se considera un combustible limpio, crucial para la transición energética sostenible hacia 2050 [3].

La clasificación del hidrógeno se basa en su origen de producción: gris (reformado con vapor y gas natural), blanco (de origen natural), negro (gasificación), marrón (gasificación), turquesa (pirólisis de metano y gas natural), amarillo (electrólisis y energía solar), verde (electrólisis y energías renovables), azul (reformado con vapor, captura de carbono y gas natural) y rosa (electrólisis y central nuclear) [1]. La biomasa es una materia de origen orgánico derivada de plantas o animales y puede utilizarse como fuente de energía [4]. Esta, usada de forma sostenible, ayuda a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de combustibles fósiles, lo que podría contribuir a reducirlas. Este trabajo propone únicamente una revisión bibliográfica sobre el aprovechamiento de la biomasa mediante un método biológico tal como la fermentación oscura para producir biohidrógeno.

II. METODOLOGÍA

A. Preliminares

1) Estructura química: En las Figs. 1, 2 y 3 se muestran diferentes estructuras químicas lignocelulósicas características de las principales fuentes de biomasa. La celulosa es un homopolisacárido lineal compuesto por residuos de glucosa unidos por enlaces β (1→4), que forman fibras resistentes, y constituye el principal componente estructural de las paredes celulares vegetales [5]. La hemicelulosa es una familia de polisacáridos de la pared celular vegetal compuesta por diversas unidades de azúcares, con una estructura amorfa y ramificada que rodea y enlaza las microfibrillas de celulosa [6].

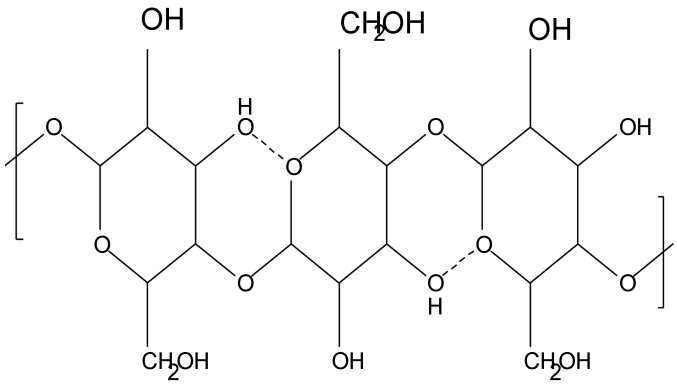


Fig. 1. Estructura química de la celulosa.

ISSN: 3122-4709

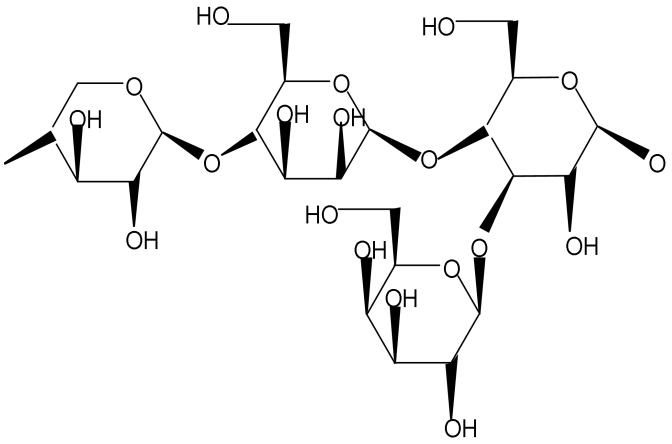


Fig. 2. Estructura química de hemicelulosa.

La lignina es un biopolímero que une las fibras de celulosa y hemicelulosa y proporciona rigidez a las plantas [7], se deposita en la pared celular vegetal y aporta resistencia estructural [8].

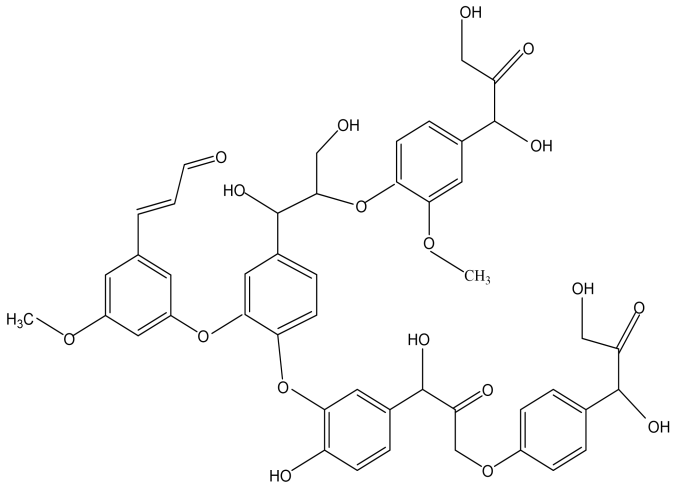


Fig. 3. Estructura química de lignina.

2) Métodos biológicos para la producción de hidrógeno: El biohidrógeno puede ser producido por microorganismos autótrofos y heterótrofos [9], [10]. Mediante estos últimos se llevan a cabo dos tipos de conversión: la fotofermentación y la fermentación oscura, la primera llevada a cabo por bacterias del tipo fotosintéticas y la segunda por anaerobias que convierten los carbohidratos en biohidrógeno [11]. Estos son considerados métodos más sostenibles y económicos que la biofotólisis, aunque la producción de hidrógeno y la eficiencia de conversión son bajas [12].
3) Fermentación oscura: Se define como un proceso microbiano en el que los sustratos orgánicos ricos en carbohidratos [11] se oxidan de forma incompleta para producir ácidos carboxílicos de cadena corta, que comienza con la degradación de carbohidratos a piruvato mediante la vía metabólica de Embden-Meyerhof-Parnas [13]. Las ecuaciones (1), (2) y (3) describen la conversión de glucosa a hidrógeno [14].

$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12\,H_2 \quad (1)$$
$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 2CO_2 + 2C\,H_3COOH + 4\,H_2 \quad (2)$$
$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 2CO_2 + C\,H_3C\,H_2C\,H_2COOH + 4\,H_2 \quad (3)$$

donde $C_6H_{12}O_6$ representa la glucosa, H_2O agua, CO_2 dióxido de carbono, H_2 hidrógeno molecular, $C\,H_3COO^-$ ácido carboxílico, H^+ protón, CO_2 dióxido de carbono y H_2 hidrógeno, $C\,H_3COOH$ ácido acético y $C\,H_3C\,H_2C\,H_2COOH$ ácido butanoico.

4) Microorganismos fermentadores para la producción de H2: Convierten sustratos orgánicos e inorgánicos para generar biohidrógeno en ausencia de luz [15], [16], involucran actividades e interacciones entre bacterias hidrolíticas y fermentativas [17] y ofrecen el doble beneficio de la generación de energía gaseosa y el tratamiento de residuos orgánicos [18]. Se investigaron los microorganismos capaces de producir H_2 mediante fermentación oscura, así como las temperaturas más empleadas.

B. Procedimiento de revisión

Los criterios de búsqueda para la revisión bibliográfica se detallan en la Fig. 4.



Fig. 4. Etapas principales del proceso de búsqueda en Scopus

1) Base de datos Scopus: Se realizó una búsqueda en los campos de título del artículo, resumen y palabras clave, usando los términos "biological method + hydrogen production". Los resultados se limitaron al período 2020-2026. Además, la búsqueda se restringió a las áreas de "Bioquímica", "Genética y Biología Molecular", "Desarrollo de las Ciencias", "Ingeniería Química", "Energía" y "Química" durante ese mismo período. Cabe mencionar que se hizo uso de esta base de datos así como del buscador de Google para complementar la información.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

2) Criterios de inclusión y selección: Para la búsqueda en Scopus se incluyeron artículos y revisiones en inglés en el período anteriormente mencionado y se seleccionaron las revistas clasificadas en JCR sobresalientes en producción biológica de hidrógeno por el método de fermentación oscura (Fig. 5).

III. RESULTADOS

A. Biomasa

Los factores que influyen en la producción de hidrógeno son el pH, la temperatura, las fuentes de inóculo, el pretratamiento de los sustratos, la tasa de carga orgánica, la presión parcial de H2 y el tiempo de retención hidráulica [19], así como la recalcitrancia de los polisacáridos. En la tabla 1 se presentan algunos tipos de biomasa utilizados para la producción de hidrógeno.

Tabla I. Condiciones para la obtención de hidrógeno a partir de diferentes tipos de biomasa.

Biomasa	Condiciones	Producción	Fuente
Enzimas de rumen del yak	pH=3-12 Temperatura y tolerancia a la sal	Aumento del 91.3 %	[20]
Residuos de alimentos	37°C pH=5.5-7	151.25 mL H2/L.h 10-55% H2	[11]
Uso de TiO2 y FeO4	Temperatura ambiente	1.56 mol H2/mol Glucosa	[21]
Bagazo de A. tequilana	Carbón activado 1% p/v	1.71 y 1.23 mol H2/mol de azúcar	[22]
Cultivos mesófilos	Anaerobias	1.3 mol H2/mol Glucosa	[23]

El pH ácido favorece las bacterias productoras de hidrógeno e inhibe a los metanógenos; la temperatura incrementa la actividad metabólica; el tiempo de retención aumenta o disminuye la productividad de los microorganismos y, por último, el sustrato, dependiente de la fuente de biomasa, también influye en el rendimiento del hidrógeno producido [24].

La búsqueda en Scopus arrojó 2 105 documentos y estos referenciaron a otras referencias de libros y tesis, principalmente. Esta clasificación se estableció de acuerdo con los cuartiles de Q1 a Q4.

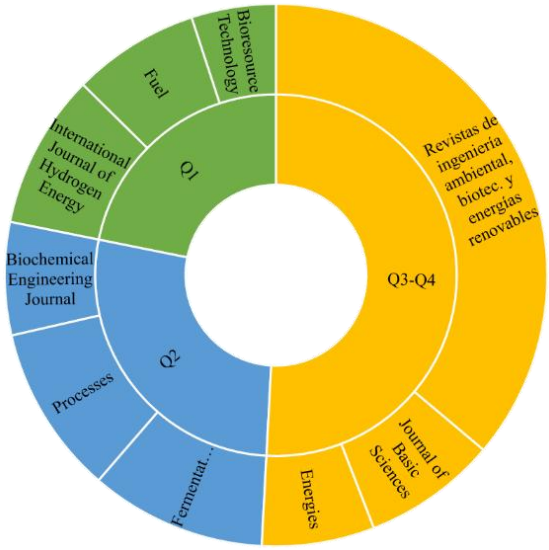


Fig. 5. Clasificación de las revistas especializadas en la producción de hidrógeno a partir de biomasa

B. Fermentación oscura

La fermentación oscura, como método para la obtención de biohidrógeno, tiene diversas aplicaciones y se ha empleado con distintos sustratos para producirlo, como microalgas, suero de leche y glucosa [13], [24], [25], así como pulpa de café [25], suero de queso [22] y rumen [20]. Mediante fermentación oscura, se han reportado 4 moles de hidrógeno por mol de glucosa consumida a través del acetato [11].

En términos de eficiencia, escalabilidad y viabilidad económica de la producción de hidrógeno, la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura presenta una eficiencia de conversión 60-80% y requiere optimizar los costos del sustrato, disponer de un inóculo y explorar el valor de los bioproductos para garantizar la sustentabilidad económica [25].

C. Microorganismos fermentadores para la producción de H2

Los microorganismos utilizados para la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura son [25]: *Escherichia coli* [26], *Porphyridium cruentum* [27], *Klebsiella pneumoniae* [28], *Alcaligenes eutrophus* [28], *Desulfovibrio vulgaris* [29], *Clostridium butyricum* [30], *C. pasteurianum* [31], *Methanobacterium spp*. [21], *Rhizobium leguminosarum* [32], *Azotobacter vinelandii* [33] y *Enterobacter aerogenes* [34].

En la tabla 2 se presentan las temperaturas empleadas para el desarrollo óptimo de los microorganismos productores de hidrógeno.

Tabla II. Grupos de microorganismos empleados en la producción de hidrógeno

ISSN: 3122-4709

Microorganismos	Temperatura
Mesófilos	25-40 °C
Termófilos	40-65 °C
Termófilos extremos	65-80 °C
Hipertermófilos	> 80°C

Nota: Adaptado de [35]–[37].

En este tipo de fermentación se pueden utilizar diferentes fuentes de carbono, como almidón, celulosa, sacarosa, etc., y se producen metabolitos valorados, como los ácidos butírico y láctico; sin embargo, requiere C y N para su desarrollo. Adicionalmente, presenta desafíos ambientales y técnicos, incluida la contaminación del agua por descargas de efluentes y la emisión de dióxido de carbono [38]. También se encontró en la búsqueda un factor adicional, la recalcitrancia por parte de los polisacáridos, puede ser reducida mediante un pretratamiento, uno de ellos consiste en exponer el material a amoniaco líquido a gaseoso a temperaturas de 90 a 100 °C que se consideran moderadas y a 250-300 psi para lograr desintegrar y solubilizar la lignina y otros componentes recalcitrantes, aunado a ello, el consumo de agua es mínimo y hay una ausencia de efluentes [39].

IV. DISCUSIÓN

Como se observa en la Tabla 1, las fuentes de obtención de hidrógeno son diversas y se diferencian según el tipo de biomasa empleada. La temperatura y el pH son variables relevantes en la fermentación oscura. En particular, temperaturas dentro del intervalo mesófilo (25–40 °C) pueden favorecer la actividad de estos microorganismos, mientras que el pH influye en el rendimiento de hidrógeno.

El proceso de revisión bibliográfica utilizado tiene la ventaja de haber permitido identificar distintas condiciones de obtención de hidrógeno según la biomasa. La heterogeneidad de las condiciones y unidades reportadas en los estudios dificultó comparar de manera directa los parámetros operativos y los indicadores de producción de hidrógeno. Por ello, futuros trabajos consistirán en crear una base de datos de parámetros operativos comunes para los distintos tipos de biomasa mediante fermentación oscura, así como en la búsqueda de biomasa existente en el territorio mexicano como fuente de obtención de energía.

V. CONCLUSIONES

La revisión identificó que la fermentación oscura se ha estudiado con diversas fuentes de biomasa y que el pH y la temperatura son variables recurrentes en la producción de biohidrógeno.

La producción de biohidrógeno a partir de biomasa representa una alternativa de interés; sin embargo, su desempeño depende de la fuente de biomasa, el pretratamiento y las condiciones de operación.

Se recomienda crear una base de datos con los parámetros experimentales para la obtención de hidrógeno a partir de biomasa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de estancia posdoctoral en el CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.

DECLARACIONES ÉTICAS Y DE TRANSPARENCIA

Financiamiento: La investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribuciones de autoría: Los autores participaron en la conceptualización, el desarrollo metodológico, el análisis de resultados, la redacción, la revisión crítica y la aprobación final del manuscrito.

Disponibilidad de datos: Los datos derivados de este estudio están disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia.

Aprobación ética: No aplica.

Consentimiento informado: No aplica.

Uso de herramientas de inteligencia artificial: Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito. Los autores revisaron y validaron el contenido final del manuscrito.

REFERENCIAS

[1] A.-M. Chirosca, E. Rusu, and V. Minzu, “Green Hydrogen — Production and Storage Methods: Current Status and Future Directions,” energies, vol. 17, p. 5820, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/en17235820.
[2] J. Wang and Y. Yin, “Fermentative hydrogen production using various biomass-based materials as feedstock,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 92, no. January 2017, pp. 284–306, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.033.
[3] I. Staffell et al., “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system,” Energy Environ. Sci., vol. 12, p. 463, 2019, doi: 10.1039/c8ee01157e.
[4] S. Barot, “Biomass and Bioenergy : Resources , Conversion and Application,” Renew. Energy Sustain. Growth Assess., pp. 243–262, 2022, doi: 10.1002/9781119785460.ch9.
[5] D. L. Nelson and M. M. Cox, Principles of Biochemistry, 8th ed. 2021.
[6] R. M. Rowell, Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, 2nd. CRC Press., 2012.
[7] S. W. A. Shah et al., “Lignin-based additive materials: A review of current status, challenges, and future perspectives,” Addit. Manuf., vol. 74, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103711.
[8] M. . Himmel, Biomass Recalcitrance: Deconstruction of the Plant Cell Wall for Bioenergy. Blackwell Publishing, 2008.

[9] D. Das and T. N. Veziroglu, "Advances in biological hydrogen production processes," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 33, no. 21, pp. 6046–6057, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.098.
[10] S. Meher Kotay and D. Das, "Biohydrogen as a renewable energy resource-Prospects and potentials," Int. J. Hydrog. Energy, vol. 33, pp. 258–263, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.07.031.
[11] Ghimire A et al., "A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products," Appl. Energy, vol. 144, pp. 73–95, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.045.
[12] M. E. Chandran EM, "Sustainable biohydrogen production from lignocellulosic biomass sources - metabolic pathways, production enhancement, and challenges.," Env. Sci Pollut Res Int., vol. 30, no. 46, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-29617-z.
[13] R. Palomo Briones, "Strategies for controlling microbial communities during dark fermentation," 2018.
[14] P. C. Hallenbeck, Microbial technologies in advanced biofuels production. Springer, 2012.
[15] A. Goren, A.Y., Dincer, I. & Khalvati, "A comparative evaluation of dark fermentative bioreactor configurations for enhanced hydrogen production," Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 32, pp. 2182–2209, 2025, doi: 10.1007/s11356-024-35873-4.
[16] W. Khetkorn et al., "Bioresource Technology Microalgal hydrogen production – A review," Bioresour. Technol., vol. 243, pp. 1194–1206, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.085.
[17] J. E. Gabriel-Barajas, J. Arreola-Vargas, A. Toledo-Cervantes, H. O. Méndez-Acosta, J. C. Rivera-González, and R. Snell-Castro, "Prokaryotic population dynamics and interactions in an AnSBBR using tequila vinasses as substrate in co-digestion with acid hydrolysates of Agave tequilana var. azul bagasse for hydrogen production," J. Appl. Microbiol., vol. 132, no. 1, pp. 413–428, 2022, doi: 10.1111/jam.15196.
[18] N. Savla, A. Shinde, K. Sonawane, L. Mekuto, P. Chowdhary, and S. Pandit, Microbial hydrogen production: Fundamentals to application. INC, 2020.
[19] M. M. Albuquerque et al., "Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review," Methane, vol. 3, pp. 500–532, 2024, doi: 10.3390/methane3030029.
[20] I. Bature et al., "Isolation, cloning, and characterization of a novel GH5 cellulase from yak rumen metagenome for enhanced lignocellulose hydrolysis in biofuel production and ruminant feed utilization," Enzyme Microb. Technol., vol. 191, no. August, p. 110737, 2025, doi: 10.1016/j.enzmictec.2025.110737.
[21] S. Tang, J. Ai, Z. Liu, and W. Jiang, "Bioresource Technology The synergy of light irradiation , TiO 2 , and Fe 3 O 4 boosts biohydrogen production from the dark fermentation at room temperature," Bioresour. Technol., vol. 437, no. June, p. 133127, 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2025.133127.
[22] B. . Valdez-Guzmán, E. E. Ríos-Del Toro, R. L. Cardenas-López, H. O. Méndez-Acosta, V. González-Álvarez, and J. Arreola-Vargas, "Enhancing biohydrogen production from Agave tequilana bagasse: Detoxified vs. Undetoxified acid hydrolysates," Bioresour. Technol., vol. 276, no. December 2018, pp. 74–80, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.101.
[23] G. Davila-Vazquez, C. B. Cota-Navarro, L. M. Rosales-Colunga, A. de León-Rodríguez, and E. Razo-Flores, "Continuous biohydrogen production using cheese whey: Improving the hydrogen production rate," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 34, no. 10, pp. 4296–4304, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.063.
[24] R. N. Moussa, N. Moussa, and D. Dionisi, "Hydrogen Production from Biomass and Organic Waste Using Dark Fermentation : An Analysis of Literature Data on the Effect of Operating Parameters on Process Performance," processes, vol. 10, 2022, doi: 10.3390/pr10010156.
[25] M. Cha, M. S. Park, and S. J. Kim, "Biological Routes for Biohydrogen Production: A Clean and Carbon-Free Fuel," Biotechnol. J., vol. 20, p. 12, 2025, doi: 10.1002/biot.70074.
[26] K. Bekbayev et al., "Growth and hydrogen production by Escherichia coli during utilization of sole and mixture of sugar beet, alcohol, and beer production waste," Biomass Convers. Biorefinery, vol. 14, no. 1, pp. 909–919, 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02692-x.
[27] D. Hidalgo, J. M. Martín-Marroquín, and F. Corona, "Metal-based nanoadditives for increasing biomass and biohydrogen production in microalgal cultures: A review," Sustain. Chem. Pharm., vol. 33, no. January, p. 101065, 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101065.
[28] W. Liu et al., "Hydrogen production by a novel Klebsiella pneumoniae strain from sheep rumen uses corn straw as substrate," Energy, vol. 282, no. June, p. 128210, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128210.
[29] X. Marbehan et al., "Combining metabolic flux analysis with proteomics to shed light on the metabolic flexibility: the case of Desulfovibrio vulgaris Hildenborough," Front. Microbiol., vol. 15, no. February, pp. 1–17, 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1336360.
[30] J. K. Braga, R. A. Stancari, F. Motteran, I. Malavazi, and M. B. A. Varesche, "Metals addition for enhanced hydrogen, acetic and butyric acids production from cellulosic substrates by Clostridium butyricum," Biomass and Bioenergy, vol. 150, no. June 2020, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105679.
[31] L. Chen, K. Zhang, M. Wang, Z. Zhang, and Y. Feng, "Enhancement of magnetic field on fermentative hydrogen production by Clostridium pasteurianum," Bioresour. Technol., vol. 341, no. August, p. 125764, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125764.
[32] Y. Matsumura, K. Sato, C. Jiang, S. Mino, and T. Swabe, "Comparative Physiology and Genomics of Hydrogen-Producing Vibrios," Curr. Microbiol., vol. 79, no. 12, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1007/s00284-022-03065-3.
[33] J. Noar, T. Loveless, J. L. Navarro-Herrero, J. W. Olson, and J. M. Bruno-Bárcena, "Aerobic hydrogen production via nitrogenase in azotobacter vinelandii CA6," Appl. Environ. Microbiol., vol. 81, no. 13, pp. 4507–4516, 2015, doi: 10.1128/AEM.00679-15.
[34] B. Ramprakash and A. Incharoensakdi, "Peanut shell activated carbon doped with nickel-iron nanoparticles as material for improving dark fermentative hydrogen production by Enterobacter aerogenes," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 99, no. December 2024, pp. 579–588, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.175.
[35] S. Chen, D. Qu, X. Xiao, and X. Miao, "ScienceDirect Biohydrogen production with lipid-extracted Dunaliella biomass and a new strain of hyper- thermophilic archaeon Thermococcus eurythermalis," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 23, pp. 12721–12730, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.010.
[36] Y. Dilsad and M. Duran, "Biohydrogen production from cattle manure and its mixtures with renewable feedstock by hyperthermophilic Caldicellulosiruptor bescii," J. Clean. Prod., vol. 292, p. 125969, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125969.
[37] K. S. . et al. E. Woon, J.M.; Khoo, K.S.; AL-Zahrani, A.A.; Alanazi, M.M.; Lim, J.W.; Cheng, C.K.; Sahrin, N.T.; Ardo, F.M.; Yi-Ming, S.; Lin, "Biohydrogen Production from Microbes: Critical Challenges vs Opportunities," Environmental Res., vol. 227, no. 115780, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115780.
[38] S. A. Siddiqui et al., "An overview of fermentation in the food industry - looking back from a new perspective," Bioresour. Bioprocess., vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40643-023-00702-y.
[39] C. Alvarez-Guzmán, F. Rodríguez-Hipólito, Y. Chávez-Reyes, and I. Valdez-Vazquez, "Lignocellulosic biomass mixtures improve hydrogen production by promoting microbial complementation in a consolidated bioprocess," J. Clean. Prod., vol. 489, no. 144691, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144691.

ISSN: 3122-4709

INGÉNESIS | VOLUMEN 1 · NÚMERO 2 · MAYO–AGOSTO DE 2026 · PP. 14–21

Efecto de ciclos SILAR y dopaje de plata en películas delgadas de ZnO

Effect of SILAR cycles and silver doping on ZnO thin films

Luis Alfonso García Cerda[1]*, Víctor Hugo Martínez Landeros[2], Edson Edgardo Guipzot Sánchez[3]

[1] Centro de Investigación en Química Aplicada, 0000-0003-3575-6580, luis.garcia@ciqa.edu.mx (*Autor de correspondencia)
[2] Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, 0000-0001-5881-4048, vmartinezlanderos@uadec.edu.mx
[3] Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, edson_guipzot@uadec.edu.mx

Recepción: 19/09/2025 | Aceptación: 12/08/2026 | Publicación: 31/08/2026
ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

Resumen—En este estudio se utilizó el método de adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas (SILAR) para preparar películas delgadas de Ag-ZnO. Se varió el número de ciclos del depósito en 10, 20 y 40 ciclos, y el dopaje con plata a 1.5, 3 y 5% en peso con el propósito de estudiar sus propiedades estructurales, ópticas y morfológicas. Las propiedades fueron analizadas mediante difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía ultravioleta-visible (UV-vis). Mediante la difracción de rayos X se observó la formación de ZnO en fase hexagonal de tipo wurtzita. El tamaño de cristalito aumentó con el número de ciclos y disminuyó al incrementar el contenido de Ag, con valores inferiores a 34 nm. Se evaluó el efecto de los ciclos de depósito sobre la morfología de la superficie. Las películas delgadas mostraron una superficie densa no homogénea, al aumentar el número de ciclos. El ancho de banda prohibido estimado para las películas delgadas de Ag-ZnO disminuyó al aumentar el número de ciclos y el contenido de Ag; el rango observado fue entre 3.45 y 2.69 eV. Estos resultados indican potencial para futuras evaluaciones en sistemas de fotocatálisis y sensores de gases.

Palabras clave—Método SILAR, Óxido de Zinc, Películas delgadas.

Abstract—In this study, the successive ion layer adsorption and reaction (SILAR) method was used to prepare Ag-ZnO thin films. The number of deposition cycles was varied to 10, 20, and 40, and the silver doping was 1.5, 3, and 5 wt% to study their structural, optical, and morphological properties. These properties were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and ultraviolet-visible (UV-vis) spectroscopy. X-ray diffraction revealed the formation of ZnO in a wurtzite-type hexagonal phase. The crystallite size increased with the number of cycles and decreased with increasing Ag content, reached values below 34 nm. The effect of deposition cycles on surface morphology was evaluated. The thin films exhibited a dense, non-homogeneous surface as the number of cycles increased. The estimated bandgap for the Ag-ZnO thin films decreased with increasing cycles and Ag content, the observed range was between 3.45 to 2.69 eV. These results indicate potential for future evaluations in photocatalysis and gas sensors.

Keywords—SILAR method, Thin films, Zinc oxide.

I. INTRODUCCIÓN

Las películas delgadas son estructuras más versátiles para su estudio que sus contrapartes de masa debido a sus propiedades superficiales excepcionales. El ensamblaje de dopantes en películas delgadas de óxidos metálicos es cada vez más común, ya que altera la relación superficie-volumen de estos materiales según los elementos que contienen, lo que potencialmente conduce a nuevos avances y descubrimientos científicos, así como a ampliar su campo de aplicación tecnológica. Ejemplos de aplicaciones incluyen la fotocatálisis, la mejora de la conductividad eléctrica, la separación de especies químicas mediante membranas y los sensores de gases, entre otros [1].

El óxido de zinc (ZnO) es considerado uno de los materiales semiconductores, de banda prohibida amplia. Este material exhibe propiedades físicas, químicas y optoelectrónicas que lo hacen adecuado para las aplicaciones mencionadas anteriormente. Sin embargo, los semiconductores con un ancho de banda prohibido grande presentan una captación de luz limitada y una recombinación de electrones y huecos, que puede minimizarse mediante la introducción de impurezas, como nanopartículas metálicas [2].

Las películas delgadas semiconductoras nanocompuestas se obtienen dopándolas con nanopartículas metálicas, lo que mejora sus propiedades optoelectrónicas. Estos materiales confieren al ZnO una conductividad de tipo n, ya que la presencia de vacantes de oxígeno favorece la formación de sitios intersticiales de Zn^{2+}. Sin embargo, puede doparse para lograr una conductividad de tipo p, mediante la creación de niveles aceptores de nivel profundo [3].

Para el dopaje, la plata (Ag) es una opción entre los metales de transición debido a que posee un electrón externo, lo que explica su gran tamaño iónico y su energía orbital. Además, en comparación con otros metales de transición, la Ag es un metal económico, estable y no tóxico. La introducción de plata como dopaje inserta subniveles de energía dentro de la banda prohibida del semiconductor, reduciendo así espacio de energía para que los electrones pasen a la banda de conducción. La razón principal para elegir ZnO dopado con Ag es que mejora las características optoelectrónicas al dificultar la captura de electrones fotogenerados, lo que alarga la vida útil de las cargas separadas [4].

Se han utilizado diversas técnicas físicas y químicas para la síntesis de películas delgadas de ZnO, tanto sin dopar como dopadas con diferentes metales, con diversos campos de aplicación. Entre las técnicas químicas, la técnica de adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas (SILAR) es un método sencillo, de bajo costo, puede llevarse a cabo a baja temperatura, incluida la temperatura ambiente, y proporciona un depósito uniforme sobre diferentes sustratos. La concentración molar, el valor de pH, el tipo de agente complejante, la temperatura, los ciclos de depósito y otros factores de preparación son fácilmente ajustables. Durante la preparación de las películas delgadas, el número de ciclos de depósito puede ser esencial, así como el control de la inserción de dopantes metálicos en su composición. Las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de las películas delgadas pueden modificarse en función del número de ciclos de depósito y del control de dopaje utilizados para sintetizarlas [5].

En este trabajo, se sintetizaron películas delgadas de ZnO dopadas con Ag para buscar cambios optoelectrónicos como disminución de la banda prohibida del semiconductor, mediante el método de adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas (SILAR), el cual es sencillo, económico y reproducible, y se estudió el efecto del número de ciclos de depósito y dopaje de Ag en las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas, como potenciales materiales semiconductores para su aplicación en procesos de

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

fotocatálisis o en sensores de gases.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales y reactivos

Para la síntesis de las películas delgadas se emplearon reactivos de grado analítico: sulfato de zinc heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), nitrato de plata ($AgNO_3$) e hidróxido de amonio (NH_4OH, 28-30%), todos de la marca Sigma-Aldrich con pureza ≥95%. Como sustratos se emplearon portaobjetos de vidrio marca Corning (76.2 × 25.4 × 1 mm).

B. Limpieza del sustrato

Para la limpieza, los sustratos de vidrio se colocaron dentro de una caja Petri, en un baño ultrasónico Branson 2800, en donde se sometieron a un ciclo de 3 procesos de lavado en solventes de: acetona, alcohol isopropílico y agua desionizada; por 10 minutos cada uno y por separado. Posteriormente, los sustratos de vidrio se secaron a 100 °C en aire.

C. Preparación de las películas delgadas

Las películas delgadas se sintetizaron mediante el método SILAR que consta de 4 etapas: adsorción, reacción, secado y enjuague. Se utilizó una solución de sulfato de zinc (0.2 M) como solución catiónica, incorporando el AgNO3 a diferentes porcentajes en peso en relación al precursor del zinc, como fuente de plata, para obtener contenido nominal de este metal de 1.5%, 3% y 5% en peso. El pH de la solución catiónica se ajustó a 10 mediante la adición de NH_4OH, manteniendo la agitación constante para asegurar la homogeneidad. Cada ciclo de depósito SILAR consistió en: 20 s en solución catiónica (adsorción), 10 s en agua tridestilada a 90 °C (reacción), 20 s de secado en vaso vacío y 10 s de enjuague en agua tridestilada a temperatura ambiente (Fig. 1). Al finalizar el depósito, las películas delgadas se sometieron a un tratamiento térmico a 400 °C por 2 horas en aire en una mufla.

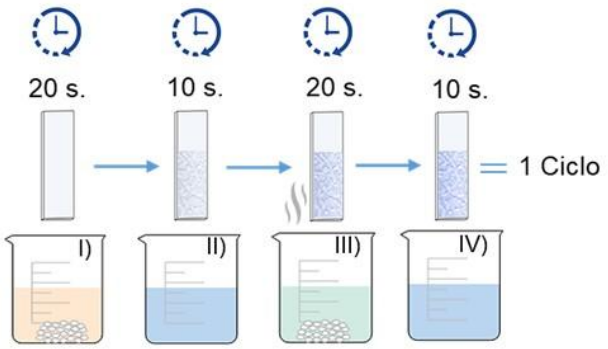


Fig. 1. Método SILAR para la preparación de películas delgadas.

D. Caracterización

Las propiedades estructurales de las películas delgadas se estudiaron mediante los patrones de difracción de rayos X (XRD) obtenidos en un difractómetro Rigaku Ultima IV con radiación Cu Kα en un rango de barrido de 10 a 80° (2θ) con pasos de 0.05° por segundo. El tamaño de cristalito de las películas delgadas se calculó usando la ecuación de Scherrer expresada en la ecuación (1), tomando como referencia el plano (002):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

donde D es el tamaño de cristalito, K es el factor de forma, λ es la longitud de onda de los rayos X (1.54058 Å), β es el ancho medio del pico de difracción a la mitad de su altura máxima (FWHM) y θ es el ángulo de Bragg.

El análisis superficial y morfológico de las películas delgadas se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) con un microscopio Jeol JCM 6000, a 15 kV.

Las propiedades ópticas de las películas delgadas se evaluaron mediante espectroscopía UV-Visible (UV-Vis) en modo de transmitancia, en el rango de 340 a 800 nm, utilizando un espectrofotómetro Cintra 2020 GBC. El ancho de banda prohibido se calculó a partir de los espectros de transmisión mediante la ecuación (2), propuesta por Tauc [6].

$$\alpha h\nu = c(h\nu - Eg)^n \quad (2)$$

donde α es el coeficiente de absorción (en este caso se toma la densidad óptica, DO, la cual se calculó con la siguiente expresión: $DO=\log_{10}(100/\%T)$, al no contar con espesores definidos), h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la luz incidente, c es una constante de proporcionalidad empírica, Eg es el ancho de banda prohibida y n es un exponente de transición óptica, para el caso de materiales basados en ZnO, que es un semiconductor, se tomó como 2 para transiciones directas. Se construyó una gráfica de $(OD \cdot h\nu)^2$ frente a $h\nu$, y Eg se determinó mediante la extrapolación lineal del borde de absorción.

III. RESULTADOS

A. Propiedades estructurales

Las Figs. 2-4 presentan los patrones de difracción de rayos X para las películas delgadas de Ag-ZnO obtenidas a 10, 20 y 40 ciclos, respectivamente. De manera general, se observa que todas las películas presentan picos localizados a 31.77°, 34.42°, 36.25°, 47.60°, 56.65°, 62.98°, 68.06° y 69.37°, que corresponden a los planos cristalinos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) y (201), respectivamente, y son característicos del ZnO en fase hexagonal de tipo wurtzita (JCPDS No. 01-080-0074). Se observa que la intensidad de los picos principales depende del número de ciclos. Conforme aumentó el número de ciclos de depósito, se observó un incremento en la intensidad de los picos de difracción; las películas obtenidas a 40 ciclos presentaron las mayores intensidades, lo que sugiere una mayor cristalinidad. Por otra

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

parte, al añadir plata, la intensidad de los picos principales disminuye de acuerdo con los porcentajes en cada película, las películas de ZnO con 5% de Ag mostraron las intensidades menores.

Se reporta en la literatura que, al aumentar la cantidad de Ag, este ion puede alojarse en sitios intersticiales o en la superficie del ZnO. Los iones Zn^{2+} pueden ser sustituidos por iones Ag^{+}, debido a la diferencia en los radios iónicos entre el Ag^{+} (0.126 nm) y el Zn^{2+} (0.074 nm), lo que puede provocar posteriormente la formación de clústeres de Ag^{+}. Esta sustitución de iones en el ZnO deteriora la estructura cristalina de las películas induciendo tensiones internas [7].

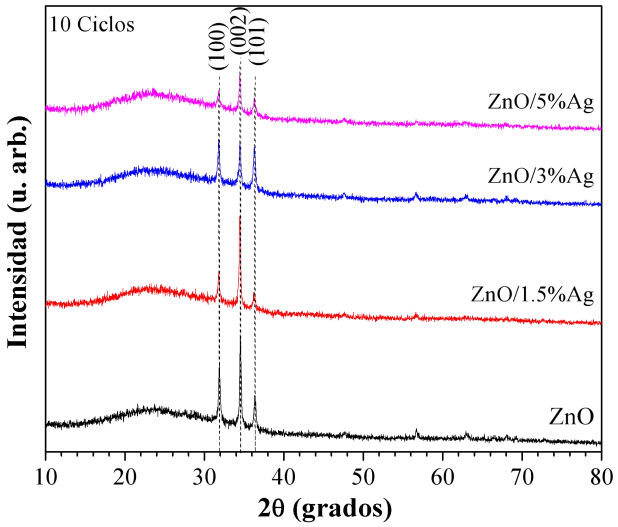


Fig. 2. Patrones de difracción de rayos X de las películas delgadas obtenidas a 10 ciclos.

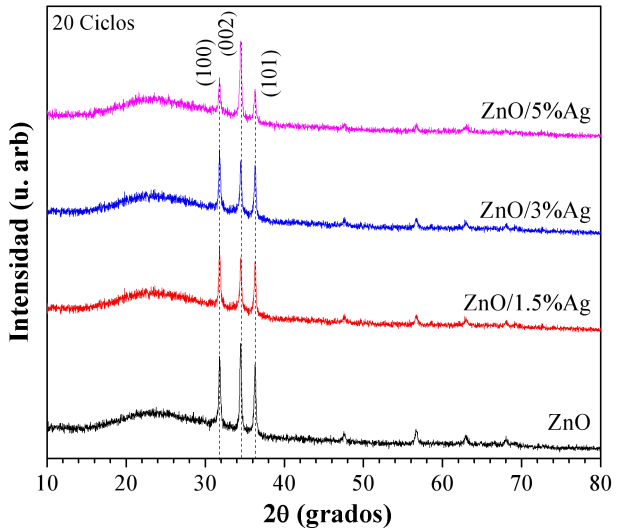


Fig. 3. Patrones de difracción de rayos X de las películas delgadas obtenidas a 20 ciclos.

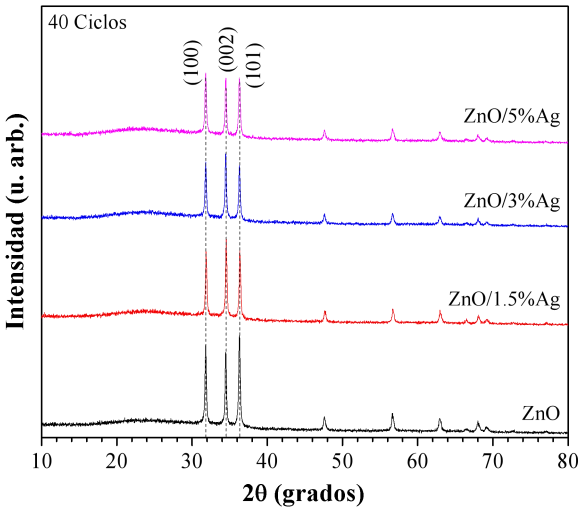


Fig. 4. Patrones de difracción de rayos X de las películas delgadas obtenidas a 40 ciclos.

El tamaño de cristalito de las películas delgadas se presenta en la Tabla I. En general, el tamaño de cristalito disminuye a medida que aumenta el contenido de Ag. Al aumentar la cantidad de Ag en las películas delgadas, también aumenta la tensión reticular entre los cristalitos, aunque fases asociadas a la Ag no fueron observadas. Un mayor número de iones de Ag provoca un desorden en la red aumentando el FWHM, lo que resulta en una reducción del tamaño de cristalito. Dado que los iones Ag+ tienen un radio mayor que los iones Zn^{2+}, las constantes reticulares aumentan, lo que incrementa el volumen de la celda [8].

Tabla I. Tamaño de cristalito medido en nm de las películas delgadas.

Muestra	10 Ciclos	20 Ciclos	40 Ciclos
ZnO	24.21	27.78	33.49
ZnO/1.5% Ag	24.14	25.62	33.10
ZnO/3% Ag	22.55	25.64	31.74
ZnO/5% Ag	21.03	25.57	29.12

Por otra parte, como se observó en los patrones de difracción de rayos X (XRD) (Figs. 2-4), la intensidad de los picos y la cristalinidad aumentaron con el número de ciclos de depósito, mientras que en el cambio del contenido de dopaje de Ag no se observaron cambios drásticos en la intensidad cristalina. Esto da como resultado una mejora de la nucleación y de la formación de cristales [9], lo que incrementa el tamaño de los cristalitos.

B. Propiedades ópticas

Los espectros de transmitancia para las películas delgadas de Ag-ZnO en función del número de ciclos de depósito (10, 20 y 40 ciclos) se presentan en las Figs. 5-7. La incorporación de

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

Ag afecta la transmitancia óptica de las películas, lo que se traduce en un mayor rango de absorción de luz, condición fundamental para algunas aplicaciones, como la fotodegradación. La adición de Ag disminuye la transmitancia, ya que posee un radio iónico mayor que el de Zn e introduce niveles de energía adicionales, lo que aumenta la absorción de luz [7].

Los valores de ancho de banda prohibido se presentan en la Tabla II. De manera general, el valor disminuye al incrementarse el número de ciclos de depósito, este comportamiento está relacionado con el incremento en el tamaño de cristalito, como ya se mencionó anteriormente.

Asimismo, se observa para las películas delgadas de ZnO dopadas con Ag a las diferentes concentraciones que la disminución del ancho de banda prohibida no es estrictamente continua entre todas las concentraciones de Ag: por ejemplo, a 10 ciclos, el valor con 5 % de Ag es mayor que el de 3% de Ag (Tabla II). Este comportamiento es debido al enriquecimiento de especies cargadas en las bandas de conducción y valencia [10], es decir a estados localizados de la plata por impurezas sustitucionales sobre el Zn, o bien, por creación de estados electrónicos intermedios causados por defectos como vacancias de oxígeno [11].

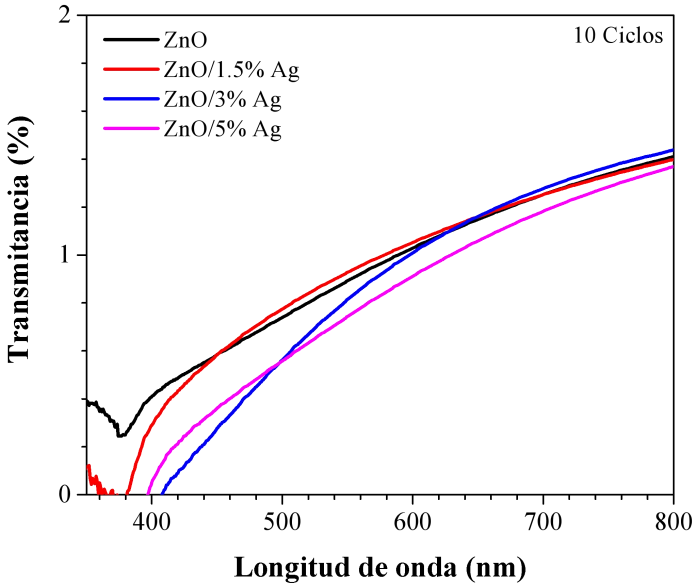


Fig. 5. Espectros de transmitancia para películas delgadas obtenidas a 10 ciclos.

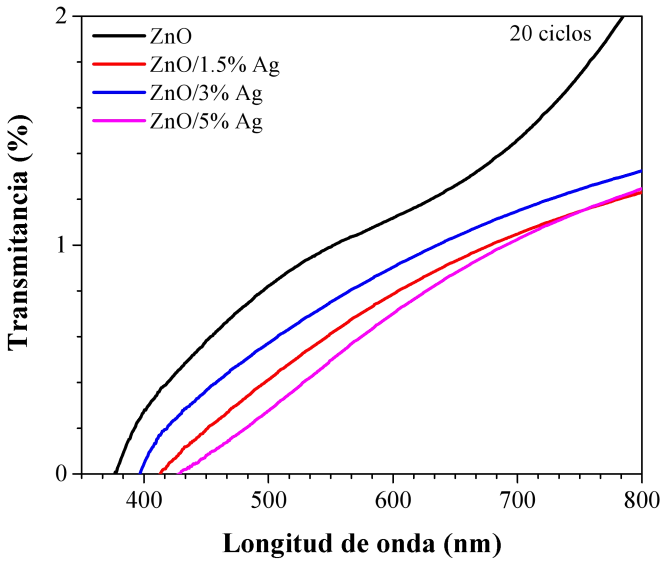


Fig. 6. Espectros de transmitancia para películas delgadas obtenidas a 20 ciclos.

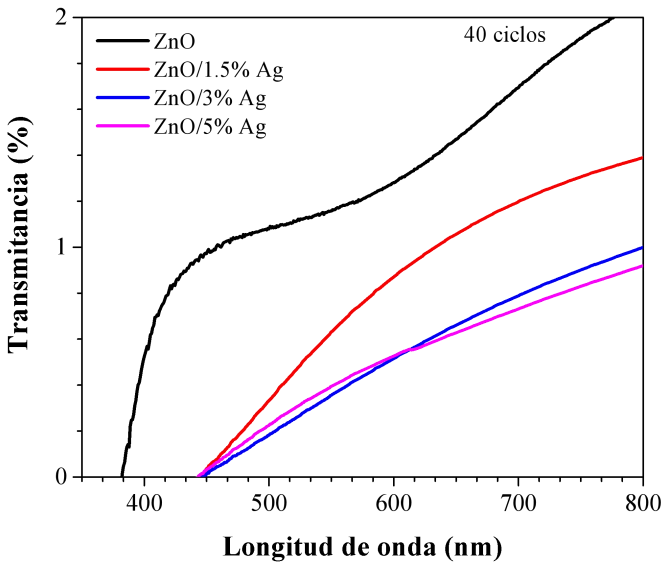


Fig. 7. Espectros de transmitancia para películas delgadas obtenidas a 40 ciclos.

Tabla II. Ancho de banda prohibida estimado en (eV) de las películas delgadas.

Muestra	10 Ciclos	20 Ciclos	40 Ciclos
ZnO	3.45	3.25	3.18
ZnO/1.5% Ag	3.18	3.08	2.72
ZnO/3% Ag	3.00	2.95	2.69
ZnO/5% Ag	3.09	2.84	2.70

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

C. Propiedades estructurales

Las micrografías SEM de las películas delgadas de ZnO obtenidas a 10, 20 y 40 ciclos, mostradas en las Figs. 8-10, exhiben una morfología superficial diversa. Las áreas más oscuras en las imágenes de SEM corresponden a huecos causados por la ausencia de centros de nucleación. Se observa una disminución gradual de los huecos a medida que aumenta el número de ciclos. Sin embargo, la distribución de las estructuras se mantiene y, en consecuencia, se generan inhomogeneidades superficiales que pueden conducir a la formación de capas desordenadas de alta rugosidad. En las películas delgadas de Ag-ZnO con 1.5 % y 5 % de Ag, obtenidas a 40 ciclos, se observaron características similares (ver Figs. 11 y 12).

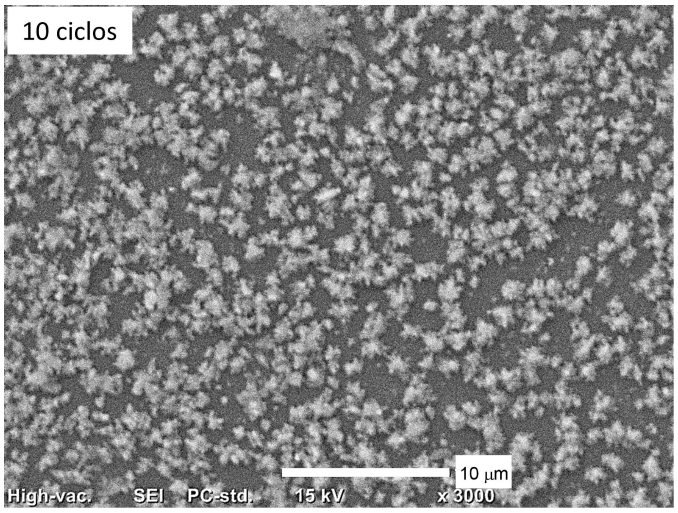


Fig. 8. Micrografía de SEM de películas delgadas de ZnO obtenidas a 10 ciclos.

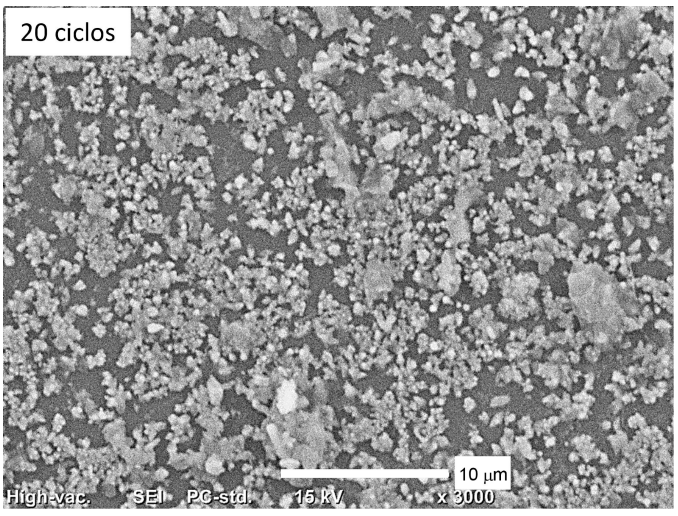


Fig. 9. Micrografía de SEM de películas delgadas de ZnO obtenidas a 20 ciclos.

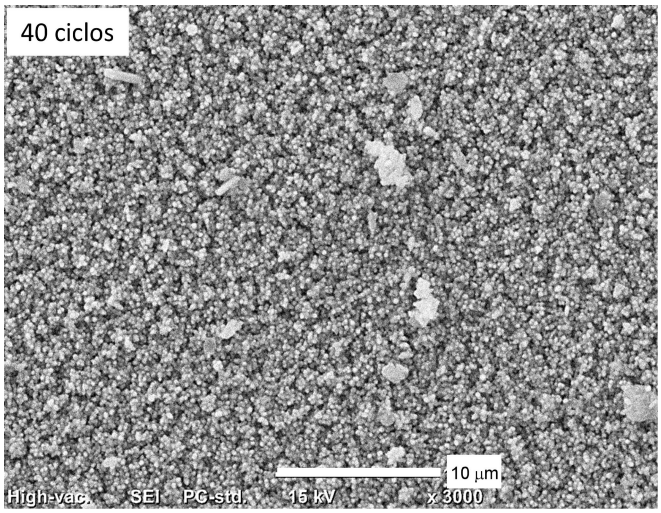


Fig. 10. Micrografía de SEM de películas delgadas de ZnO obtenidas a 40 ciclos.

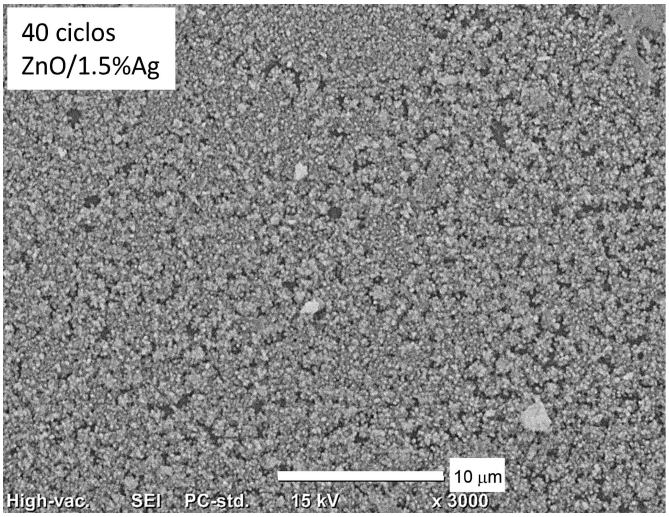


Fig. 11. Micrografía de SEM de películas delgadas de ZnO/1.5%Ag obtenidas a 40 ciclos.

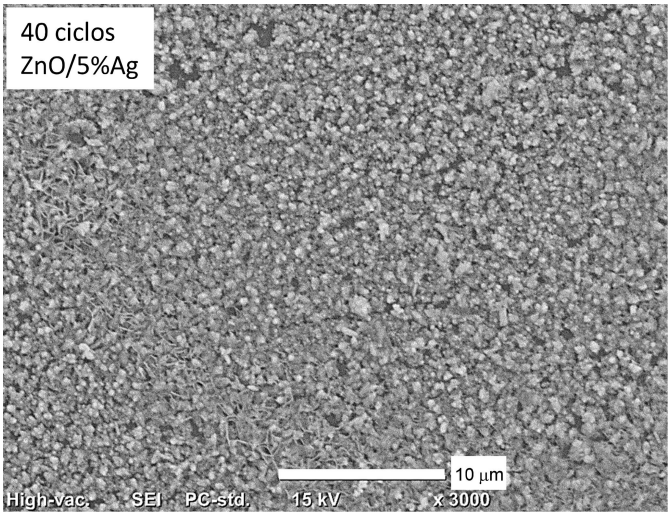


Fig. 12. Micrografía de SEM de películas delgadas de ZnO/5%Ag obtenidas a 40 ciclos.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

IV. DISCUSIÓN

Los patrones de difracción de rayos X mostrados en las Figs. 2-4 confirmaron la formación de películas de ZnO con estructura hexagonal tipo wurtzita. La ausencia de estas fases secundarias asociadas a la Ag en los patrones de XRD indica que no se detectaron mediante esta técnica. Se observó que el incremento en el número de ciclos de depósito favoreció la cristalinidad de las películas, evidenciado por el aumento en la intensidad de los picos de difracción y el crecimiento del tamaño de cristalito. Este comportamiento se atribuye a una mayor nucleación y crecimiento cristalino durante el proceso de depósito, en concordancia con lo reportado para películas de ZnO obtenidas mediante el método SILAR [12].

Por otra parte, el dopaje con plata provocó una disminución gradual de la intensidad de los picos y del tamaño de cristalito. Este efecto puede relacionarse con la sustitución parcial de los iones Zn^{2+} por Ag^{+}, cuyo mayor radio iónico genera tensiones internas y defectos cristalinos que limitan el crecimiento de los dominios cristalinos [13]. Como consecuencia, las películas con 5% de Ag presentaron los tamaños de cristalito más pequeños.

Los espectros obtenidos mediante espectroscopía UV-Visible (Figs. 5-7) mostraron que la incorporación de Ag disminuye la transmitancia y reduce el ancho de banda prohibido. Mientras que el ZnO puro presentó valores de Eg entre 3.45 y 3.18 eV, las películas dopadas alcanzaron valores cercanos a 2.69 eV. Esta reducción puede atribuirse a la formación de niveles de energía asociados a la plata y a defectos estructurales, como vacancias de oxígeno, que facilitan transiciones electrónicas de menor energía [14]. Este comportamiento favorece la absorción en la región visible, lo cual es una característica deseable para aplicaciones fotocatalíticas.

Finalmente, las micrografías SEM (Figs. 8-10) revelaron que el aumento del número de ciclos produce películas más compactas y con menor cantidad de huecos superficiales, lo que indica una mejora en la cobertura del sustrato. Aunque el dopaje con Ag no modificó significativamente la morfología general, sí contribuyó a generar cierta heterogeneidad superficial (Figs. 11-12). En conjunto, los resultados demuestran que el control del número de ciclos y del contenido de plata permite modular las propiedades estructurales y ópticas de las películas delgadas de Ag-ZnO, con potencial para futuras evaluaciones en aplicaciones fotocatalíticas y optoelectrónicas.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se prepararon con éxito películas delgadas de Ag-ZnO con diferentes números de ciclos de depósito y dopajes de Ag mediante el método de adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas (SILAR). Las propiedades estructurales obtenidas a partir de los patrones de difracción de rayos X mostraron que las películas delgadas preparadas presentan una estructura hexagonal de tipo wurtzita. El tamaño de cristalito de las películas delgadas, calculado mediante la ecuación de Scherrer, aumentó con el incremento de los ciclos de depósito y disminuyó con el aumento del dopaje de plata. El estudio morfológico mediante SEM muestra que la superficie de las películas delgadas se vuelve más inhomogénea a medida que aumentan los ciclos de depósito. Los espectros UV-VIS mostraron que la transmitancia de las películas disminuyó a medida que aumentaba el dopaje con Ag. El ancho de banda prohibido, calculado a partir del gráfico de Tauc, mostró que esta propiedad disminuyó con el aumento del número de ciclos de depósito y no es estrictamente continua en todas las concentraciones de Ag. Las propiedades semiconductoras de las películas delgadas muestran potencial para futuras evaluaciones en sistemas de fotocatálisis y sensores de gas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECIHTI por el apoyo económico otorgado mediante el proyecto CBF-2025-I-4395. Asimismo, se agradece a B.A. Puente-Urbina y J.A. Mercado-Silva por su asistencia en el desarrollo de los experimentos y técnicas de caracterización. Edson Edgardo Guipzot Sánchez agradece a CONACYT (ahora SECIHTI) por la beca para maestría (No. CVU 1265386).

DECLARACIONES ÉTICAS Y DE TRANSPARENCIA

Financiamiento: La investigación recibió financiamiento externo mediante el proyecto CBF-2025-I-4395 de la SECIHTI.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autoría: Los autores participaron en la conceptualización, desarrollo metodológico, análisis de resultados, redacción, revisión crítica y aprobación final del manuscrito.

Disponibilidad de datos: Los datos derivados de este estudio están disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia.

Aprobación ética: No aplica.

Consentimiento informado: No aplica.

Uso de herramientas de inteligencia artificial: Los autores declaran que no utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito. Los autores revisaron y validaron el contenido final del manuscrito.

REFERENCIAS

[1] S.K. Dhawale, P.D. Sarvalkar, C.S. Shinde, N.R. Prasad, K.M. Garadkar, K.K.K. Sharma, A.A. Ramteke, "Studies on Photocatalytic and Antioxidant Efficacy of Ag-Embedded ZnO Nanocomposites," ACS Omega, vol. 10, no. 12, pp. 11948-11960, Mar. 2025, doi: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08896

[2] C. Zhu, X. Wang, "Nanomaterial ZnO Synthesis and Its Photocatalytic Applications: A Review," Nanomaterials, vol. 15, no. 9, pp. 1-32, Apr. 2025, doi: https://doi.org/10.3390/nano15090682

[3] K. Punia, G. Lal, S.N. Dolia, S. Kumar, "Defects and oxygen vacancies tailored structural, optical, photoluminescence and magnetic properties of Li doped ZnO nanohexagons," Ceramics International, vol. 46, no. 8, pp. 12296-12317, Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.280

[4] P.T.T. Hoai, N.T.M. Huong, P.T. Huong, N.M. Viet, "Improved the Light Adsorption and Separation of Charge Carriers to Boost Photocatalytic Conversion of CO2 by Using Silver Doped ZnO Photocatalyst," Catalysts, vol. 12, no. 10, pp. 1-10, Oct. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/catal12101194

[5] H. Soonmin, "Recent Advances in the Growth and Characterizations of SILAR-Deposited Thin Films," Applied Science. vol. 12, no. 16, pp. 1-33, Aug. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/app12168184

[6] P. Makuła, M. Pacia, W. Macyk, "How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra," The Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 9, no. 23, pp. 6814-6817. Dec. 2018, doi: https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b02892

[7] D. Dridi, L. Bouaziz, M. Karyaoui, Y. Litaiem, and R. Chtourou, "Effect of silver doping on optical and electrochemical properties of ZnO photoanode," Journal of Materials Science: Materials in Electronics., vol. 29, no. 10, pp. 8267-8278, Mar. 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s10854-018-8835-4

[8] T.A. Alrebdi, H.A. Ahmed, F.H. Alkallas, R.A. Pashameah, S.H. Alrefaee, E. Alsubhe, A.M. Mostafa, E.A. Mwafy, "Ag/ZnO Thin Film Nanocomposite Membrane Prepared by Laser-Assisted Method for Catalytic Degradation of 4-Nitrophenol," Membranes, vol. 12, no. 8, pp. 1-10, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/membranes12080732

[9] N T Abood, P Sable, J Yassen and G Dharne, "The effect of deposition cycles on structural, morphological, optical and gas detection properties of Mg doped ZnO thin films," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2426, pp. 1-13, Feb. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2426/1/012035

[10] S. Vikal, Y.K. Gautam, S. Meena, V. Parewa, A. Kumar, A. Kumar, S. Meena, S. Kumar, B.P. Singh, "Surface functionalized silver-doped ZnO nanocatalyst: a sustainable cooperative catalytic, photocatalytic and antibacterial platform for waste treatment," Nanoscale Advances, vol. 5, no. 3, pp. 805-819, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1039/d2na00864e

[11] Md.S. Mia, O. Farook, Md.T. Hossain, Md.A.S. Azad, S. Bhowmik, Md.A. Alam, "Green synthesis of ZnO and Ag-ZnO nanocrystalline materials: Optical band gap engineering and multi-model XRD size–strain investigation," Results in Chemistry, vol. 20, pp. 1-14, Feb. 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.103022

[12] G. Yergaliuly, B. Soltabayev, S. Kalybekkyzy, Z. Bakenov, A. Mentbayeva, "Effect of thickness and reaction media on properties of ZnO thin films by SILAR". Scientific Reports, vol. 12, article 851, pp. 1-13, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-022-04782-2

[13] V. Amrute, Monika, K.K. Supin, M. Vasundhara and A. Chanda, "Observation of excellent photocatalytic and antibacterial activity of Ag doped ZnO nanoparticles," RSC Advances, vol. 14, no. 45, pp. 32786-32801, Oct. 2024, doi: https://doi.org/10.1039/d4ra05197a

[14] F. Lekoui, S. Hassani, E. Garoudja, R. Amrani, W. Filali, O. Sifi, S. Oussalah, "Elaboration and characterization of pure ZnO, Ag:ZnO and Ag-Fe:ZnO thin films: Effect of Ag and Ag-Fe doping on ZnO physical properties," Revista Mexicana de Física, vol. 69, no. 5, Sep. 2023, doi: https://doi.org/10.31349/RevMexFis.69.051005

ISSN: 3122-4709

INGÉNESIS | VOLUMEN 1 · NÚMERO 2 · MAYO–AGOSTO DE 2026 · PP. 22–27

Análisis del riesgo de corrosión de concretos reforzados empleando técnicas de *machine learning*

Corrosion risk analysis in reinforced concrete using machine learning techniques

Silvia Olivia Ramírez Martínez[1], Esteban López Vázquez[2], Carlos Mauricio Lastre Domínguez[3]* , Marco Antonio Maldonado García[4*]

[1] Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, TecNM / Instituto Tecnológico de Oaxaca, 0009-0004-2001-0772, sramirez@itoaxaca.edu.mx
[2] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, 0000-0002-8771-2291, elopez@itoaxaca.edu.mx
[3] TecNM / Instituto Tecnológico de Oaxaca, 0000-0003-2737-7644, carlos.lastre@itoaxaca.edu.mx (*Autor de correspondencia)
[4] TecNM / ITO, marco.mg@itoaxaca.edu.mx, 0000-0002-9522-6779, marcomaldonado542@gmail.com (*Autor de correspondencia)

Recepción: 26/09/2025 | Aceptación: 22/06/2026 | Publicación: 31/08/2026
ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

Resumen—El potencial de corrosión (Ecorr) en el concreto reforzado es uno de los parámetros más empleados en el monitoreo de la durabilidad. Sin embargo, el Ecorr se ve afectado por diversos factores externos, tales como temperatura y humedad ambientales, el espesor del recubrimiento de concreto, entre otros, lo cual hace que la interpretación de los resultados requiera una gran experiencia. Considerando lo anterior, se puede afirmar que la técnica de Ecorr es robusta y proporciona información que puede interpretarse mediante modelos de análisis comparativo. Por tanto, en esta investigación se ha propuesto un análisis comparativo de modelos de clasificación de riesgo de corrosión mediante algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning). Se compararon algoritmos de Gradient Boosting Machine (GBM), XGBoost, regresión logística (Logistic Regression) y vectores de soporte (SVM). Para el análisis se consideraron las variables de relación agua-cemento, temperatura, precipitación pluvial y tiempo de exposición. Se realizó un balance de clases mediante la técnica de SMOTE. Los resultados indican que el GBM superó a los demás algoritmos teniendo una precisión de 84.6%, mostrando alta capacidad predictiva y robustez, por lo cual se puede recomendar para la predicción del riesgo estructural.

Palabras clave—Aprendizaje automático, Durabilidad del concreto, Potencial de corrosión, Salud estructural.

Abstract— The corrosion potential (Ecorr) is one of the most widely used parameters for durability monitoring in reinforced concrete. However, the Ecorr is influenced by external factors such as environmental moisture, temperature, and the concrete cover thickness, among others, which complicates the data interpretation. Given this, the Ecorr technique is considered robust, and the information obtained can be used for interpretation through comparative analysis models. Consequently, this research proposes a comparative analysis of corrosion risk classification models using Machine Learning algorithms. The techniques compared include the Gradient Boosting Machine (GBM), XGBoost, logistic regression, and support vector machine (SVM). The variables analyzed include water-cement ratio, temperature, rainfall, and concrete exposure time. Class balance was addressed using the SMOTE technique. Results indicate that GBM outperformed the other algorithms, achieving an accuracy of 84.6%, demonstrating high predictive capacity and robustness. Therefore, GBM showed the best performance for corrosion-risk classification under the evaluated conditions.

Keywords—Concrete durability, Corrosion potential, Machine Learning, Structural health.

I. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más empleados en el mundo para satisfacer las necesidades de infraestructura civil. Las estructuras se diseñan con base en diversos criterios, entre ellos el de la durabilidad; es decir, están diseñadas para tener una vida útil sin necesidad de mantenimiento mayor ni reparaciones.

El concreto está compuesto de agua, cemento, arena y grava, los cuales forman un compuesto similar a una roca sedimentaria, por sí solo, es resistente a compresión, pero tiene poca resistencia a la flexión. Por lo anterior, se debe reforzar con varillas de acero al carbono, comúnmente utilizadas en el conocido concreto reforzado. El acero al carbono se produce a partir de procesos metalúrgicos; en realidad, su estado original es en forma de óxidos, los cuales tienden a regresar en presencia de oxígeno y humedad. El concreto es el encargado de proteger el acero y de retardar su proceso de óxido-reducción. Por lo tanto, el concreto debe elaborarse correctamente y presentar una buena impermeabilidad. Estas características harán que el concreto sea más resistente y duradero.

El proceso de corrosión del acero de refuerzo en el concreto puede comenzar debido a diversos factores, uno de ellos es debido a la carbonatación del concreto, la cual ocurre cuando el CO_2 de la atmosfera (mayor concentración en zonas urbanas) comienza a reaccionar con el cemento hidratado, reduciendo el pH en la matriz cementante. La corrosión del acero de refuerzo se considera como una patología grave y ocasiona que el concreto se agriete reduciendo la vida útil de la estructura.

Existen diversos métodos para evaluar la corrosión del acero de refuerzo, entre ellos se encuentra la técnica de potencial de corrosión (Ecorr). Esta técnica consiste en medir la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de referencia (por ejemplo, Cu/CuSO4) y el acero de refuerzo de una estructura. No obstante, los valores de Ecorr solo proporcionan información sobre la probabilidad de corrosión de una armadura, pues no se puede cuantificar la superficie de acero afectada o la cantidad de productos de corrosión, ya que no es un parámetro cinético sino termodinámico [1].

A pesar de dichas limitaciones, el potencial de corrosión es una técnica fácil de realizar, por lo que se puede generar un extenso conjunto de datos en función del tiempo y de esta manera evaluar el riesgo de deterioro a lo largo de la vida útil de una estructura. Sin embargo, el conjunto de datos de Ecorr se ve afectado por factores externos, como la temperatura, humedad ambiente y la precipitación pluvial, entre otros factores, lo que complica la evaluación de la probabilidad de corrosión. Esta complejidad, debido a las diversas variables que afectan las mediciones de Ecorr, puede favorecer el uso de técnicas de análisis comparativo o de predicción de la vida útil.

En general, los valores de Ecorr se analizan de forma cualitativa mediante la gráfica de los potenciales de corrosión a lo largo del tiempo (edad de la estructura). Estos datos se correlacionan con los valores de temperatura y humedad registrados en cada día de la prueba. La frecuencia de medición es clave, dado que las condiciones climáticas pueden cambiar drásticamente el potencial de corrosión de un día a otro, lo que da origen al concepto de la probabilidad de ocurrencia de la corrosión.

Análisis más complejos del conjunto de datos de Ecorr, pueden proporcionar información relevante y no visible a simple vista. Por ejemplo, en una investigación se procesó un conjunto de datos de Ecorr, adquiridos semanalmente durante un año, considerándolos como una señal a lo largo del tiempo

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

y a partir de ahí procesándolos en el dominio tiempo-frecuencia mediante la transformada wavelet [2]. Los autores reportan que a través de este procesamiento es posible identificar cambios en el potencial atribuidos a variaciones estacionales, además, se puede evaluar el tiempo de agrietamiento por corrosión. Otros estudios han empleado técnicas basadas en modelamiento matemático para el procesamiento de conjuntos de datos Ecorr, lo que indica que los valores de potencial estimados se correlacionan estrechamente con las condiciones reales [3].

En otra investigación se empleó la técnica de elementos finitos para analizar los potenciales de corrosión, obteniendo resultados modelados muy cercanos a los valores reales [4].

Estudios recientes han comenzado a proponer y experimentar el uso de algoritmos basados en inteligencia artificial (IA) para la evaluación de la corrosión en elementos estructurales de concreto y de durabilidad [5], [6]. Por lo tanto, las técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) también se empiezan a utilizar para predecir la velocidad de corrosión en compuestos a base de cemento [7]. Sin embargo, se requieren estudios que cuenten con un conjunto de datos obtenidos a lo largo de un periodo prolongado (en edades tardías). Considerando lo anterior, esta investigación propone un estudio preliminar sobre el análisis de riesgo de corrosión en concretos reforzados mediante la aplicación de técnicas de Machine Learning a conjuntos de datos de Ecorr obtenidos a lo largo de distintos intervalos de tiempo durante 20 años.

II. METODOLOGÍA

A. Contextualización del estudio

Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre investigaciones que reportaran aplicaciones de algoritmos de Inteligencia Artificial para la predicción de corrosión en concreto reforzado o salud estructural. Lo reportado en la literatura se comparó con los resultados de la presente investigación.

El trabajo experimental de esta investigación presenta una propuesta de procesamiento, mediante técnicas de análisis comparativo y algoritmos de Machine Learning, de un conjunto de datos de Ecorr de probetas de concreto reforzado expuestas en un ambiente urbano durante un periodo de 20 años. El estudio forma parte del proyecto internacional DURACON [8], que cuenta con estaciones de monitoreo en 11 países, con el fin de evaluar la durabilidad del concreto expuesto a diversos ambientes.

B. Caracterización de las probetas

Las probetas fueron elaboradas con cemento Portland Ordinario, arena de río, grava triturada y agua, considerando dos relaciones agua/cemento (0.45 y 0.65). Se elaboraron 3 probetas prismáticas (15 x 15 x 30 cm) por cada una de las relaciones agua/cemento. En cada probeta se colocaron 6 varillas de refuerzo (3/8 de pulgada) considerando espesores de recubrimientos de 15, 20 y 30mm (2 varillas por cada espesor de recubrimiento). Las varillas fueron pintadas con epóxico, dejando 15cm de metal expuesto dentro de la matriz cementante de las probetas. Se conectaron cables de cobre para tomar las lecturas de Ecorr. La dimensión de las probetas fue de 30cm de largo y 15cm de ancho y altura.

C. Condiciones de exposición ambiental

Las probetas fueron expuestas a un ambiente urbano (Fig. 1), que consistió en colocarlas en la azotea de un edificio de dos niveles, con la finalidad de estar expuestas a condiciones ambientales, como temperatura, humedad relativa, lluvia, sol, viento y CO2. Posteriormente se seleccionaron algunas de estas variables para el procesamiento del conjunto de datos. Las probetas fueron colocadas encima de una base metálica de 1.2 m de altura, lo cual permite que estén expuestas al viento predominante (sureste) y se pueda secar el exceso de humedad en la parte de abajo después de las lluvias. Las pruebas de Ecorr se realizaron empleando un voltímetro de alta impedancia MC Miller L.C. 4.5 y un electrodo de referencia de Cu/CuSO4 (Fig. 2) siguiendo los criterios sugeridos por la red DURAR [9].

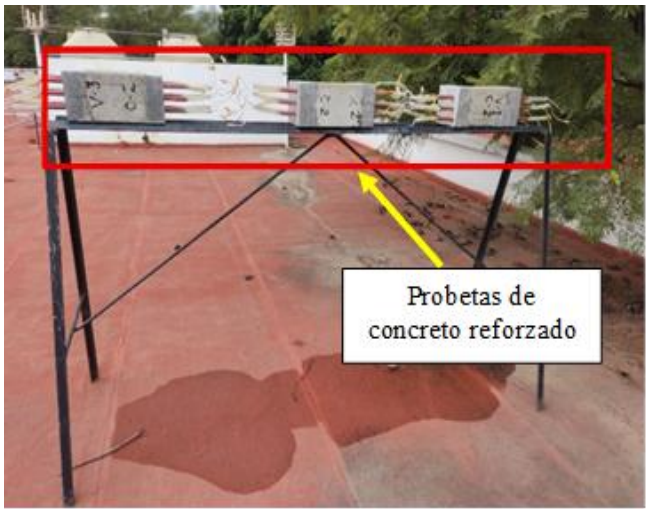


Fig. 1. Probetas de concreto reforzado expuestas en ambiente urbano

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102



Fig. 2. Pruebas de potencial de corrosión en probetas de concreto reforzado expuestas en ambiente urbano

D. Descripción del conjunto de datos

La obtención del conjunto de datos de Ecorr inició en 2003. Se obtuvo un registro de datos de manera anual durante 13 años, independientemente de la estación del año. En seguida se tiene un periodo de 6 años sin lecturas de Ecorr y posteriormente, 1 año de lecturas realizadas semanalmente. El conjunto de datos estuvo conformado por 540 muestras para cada espesor de recubrimiento del acero de refuerzo de las probetas de concreto reforzado, asimismo, se incluyeron datos diarios de temperatura, humedad y precipitación pluvial. Se consideró una mayor frecuencia de toma de lecturas de Ecorr con la finalidad de contar con un conjunto de datos más amplio que abarcara los cambios en el clima de acuerdo con las estaciones del año, su interacción y cambios en el potencial debido a las variaciones de temperatura y precipitación pluvial. Finalmente, el conjunto de datos en estudio incluye las lecturas de Ecorr, tiempo de exposición, temperatura máxima y mínima ambiental del día de cada prueba y precipitación pluvial; asimismo, la relación agua/cemento de las probetas, espesor de recubrimiento del acero de refuerzo y exposición a viento predominante, todas estas como variables de entrada (Features). Se creó la variable de salida (Target) de "riesgo", es decir, si la estructura muestra riesgo en al menos uno de sus puntos de medición (teniendo como criterio valores de Ecorr sugeridos por la red DURAR), se clasifica como riesgo intermedio o bajo. También se tiene como variable de salida la "lógica" con la finalidad de priorizar la seguridad al detectar cualquier indicio de riesgo.

E. Selección de algoritmos de machine learning

Considerando la cantidad de parámetros incluidos en el conjunto de datos se propuso analizar el riesgo de corrosión de las probetas de concreto mediante algoritmos basados en modelos de aprendizaje automático comparativo (Machine Learning). Se compararon algoritmos de Gradient Boosting, XGBoost, regresión logística y vectores de soporte (SVM). Para el procesamiento del conjunto de datos, se realizó un balanceo de clases mediante la técnica SMOTE (Synthetic Minority Over-Sampling Technique)

III. RESULTADOS

A. Análisis de datos desbalanceados

El conjunto de datos mostraba un desbalance de clases, lo cual ocurre cuando un tipo de datos es mucho más frecuente que otro. En el conjunto de datos de esta investigación se registraron lecturas de "bajo riesgo" de corrosión como clase mayoritaria en comparación con las lecturas de "riesgo intermedio" (clase minoritaria). También se corrigió "riesgo de sesgo" en el conjunto de datos, con la finalidad de que el algoritmo no se volviera "deficiente", prediciendo únicamente la clase mayoritaria y fallando en detectar los casos de riesgo intermedio, puesto que existe la posibilidad de que los resultados del modelo estén influenciados por errores sistemáticos que conduzcan a conclusiones incorrectas o poco representativas de la realidad.

Considerando lo anterior, se seleccionó la técnica de SMOTE para evaluar los patrones subyacentes de la clase minoritaria. Se solicitó al algoritmo que duplicara muestras de la clase minoritaria hasta equilibrar el conjunto de datos, esto permitió que el modelo "aprendiera" a distinguir ambas clases sin favoritismos.

B. Preparación de los conjuntos de entrenamiento y prueba

Antes de entrenar el algoritmo de Machine Learning, el conjunto de datos se dividió en dos grupos para asegurar una evaluación sin sesgos (80% de entrenamiento y 20% de prueba seleccionado por periodos). Si el modelo funciona adecuadamente con el 20% de los datos que desconoce, entonces se sabe que el algoritmo no está sobreajustado, es decir, que no memoriza los datos anteriores.

C. Análisis del desempeño de los modelos de Machine Learning

Se presentan resultados preliminares del desempeño de modelos de Machine Learning para clasificar el riesgo de corrosión de probetas de concreto considerando factores climáticos y sus efectos sobre el potencial de corrosión. El modelo propuesto clasifica según se muestra en el diagrama de la Fig. 3. La clasificación permite identificar cuándo se requiere mantenimiento preventivo; y de esta manera tener una optimización de costos, la toma de decisiones y constituyendo una estrategia no invasiva.

ISSN: 3122-4709

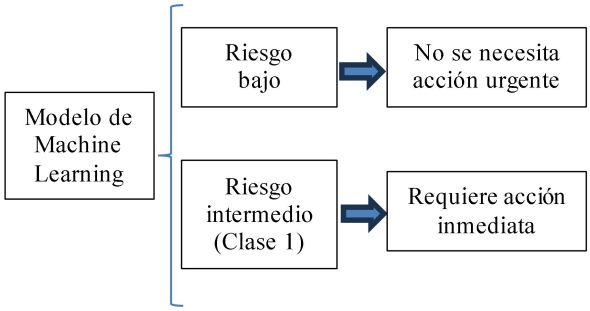


Fig. 3. Clasificación de riesgo de corrosión en probetas de concreto reforzado según el algoritmo de Machine Learning propuesto.

Para el procesamiento del conjunto de datos se compararon los algoritmos Gradient Boosting Machine (GBM), XGBoost, logistic regression, y support vector machine (SVM). El procesamiento se realizó mediante el software Python. La comparativa del procesamiento del conjunto de datos con estos algoritmos se muestra en la Fig. 4. El algoritmo Gradient Boosting superó a los demás algoritmos en las predicciones indicando un desempeño favorable y superior al desempeño de los demás algoritmos. Se logró un desempeño con una precisión del 84.62% lo cual se considera adecuado para los modelos de GBM y un AUC-ROC (el cual mide la capacidad de discriminación del modelo) de 0.845, concluyendo que el modelo es altamente fiable. En contraste, el algoritmo de regresión logística mostró un rendimiento moderado con una precisión del 74.62% y un AUC-ROC de 0.7865. El algoritmo SVM fue el de menor desempeño, con una precisión de 59.23% y un AUC-ROC de 0.7249.

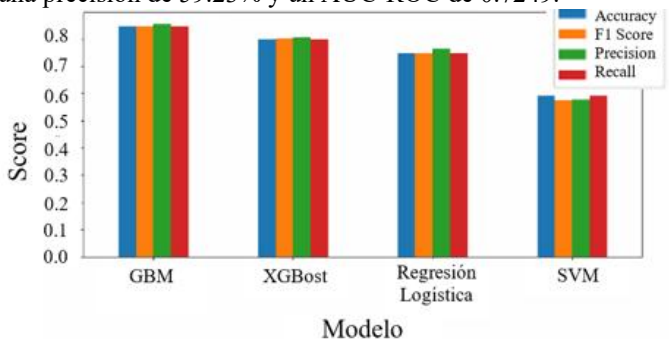


Fig. 4. Comparativa de la eficiencia de los algoritmos GBM, XGBoost, regresión logística y SVM.

La matriz de confusión es el mapa de los aciertos y más importante aún, de los errores del modelo en el conjunto de prueba, para el caso del algoritmo XGBoost muestra que el modelo clasificó correctamente y que tiene una elevada capacidad para diferenciar entre concretos con bajo riesgo de corrosión y concretos con riesgo intermedio de corrosión. En la Tabla 1 se presenta la matriz de confusión.

Tabla 1. Matriz de confusión XGBoost

	Predicción: BAJO (0)	**Predicción: INTERMEDIO (1)**
Valor Real: BAJO (0)	62 verdaderos negativos	6 falsos positivos
Valor Real: INTERMEDIO (1)	8 falsos negativos	48 verdaderos positivos

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran novedad y confiabilidad en el procesamiento del conjunto de datos sobre el potencial de corrosión de probetas de concreto expuestas en un ambiente urbano, mediante algoritmos de inteligencia artificial. En la Tabla 2 se presenta una comparativa entre estudios reportados en la literatura sobre la predicción de la corrosión en concreto reforzado y la salud estructural, y los resultados obtenidos en esta investigación. En dicha tabla se puede observar el tipo de conjunto de datos empleado para modelos basados en Inteligencia Artificial y variables de entrada. Con base en esta comparativa, se puede decir que el conjunto de datos (cantidad de datos seleccionados) y las variables de entrada consideradas en esta investigación son apropiados para un procesamiento empleando técnicas de Machine Learning.

Se sugiere una mayor cantidad de datos del conjunto, esto se puede lograr realizando las lecturas de Ecorr con mayor frecuencia como se ha propuesto recientemente en esta investigación (lecturas semanales). Con un conjunto de datos más amplio, será posible generar regresiones con mayor precisión mediante algoritmos basados en inteligencia artificial para completar las lecturas faltantes del conjunto de datos en el periodo hasta ahora evaluado. De igual manera, un conjunto de datos con mayor frecuencia de toma de lecturas de Ecorr permitirá obtener una predicción del riesgo de corrosión mucho más acertada mediante Machine Learning e incluso realizar predicciones del comportamiento del potencial de corrosión a corto y largo plazo.

Tabla 2. Comparativa de estudios reportados en la literatura y en esta investigación.

Proyecto	**Enfoque**	**Cantidad de datos**	**Modelos de IA y condiciones**
Predicción Inicio de Corrosión en Puentes [10]	Clasificación/Regresión para estimar el tiempo de inicio de la corrosión inducida por cloruros en concreto.	Cientos de muestras de probetas en laboratorio, bases de datos de mezclas de concreto.	Redes Neuronales Artificiales (ANN). Condiciones: Basadas en la mezcla de concreto (relación agua/cemento, tipo de cemento) y el contenido de cloruros.
Tasa de Corrosión en Concreto Reforzado. [11]	Regresión para predecir la tasa de corrosión (icorr) después de la despasivación.	165 datos de pruebas electroquímicas de cilindros de concreto.	Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y Redes Neuronales Artificiales (ANN). Condiciones: Variables de entrada como pH, resistividad del

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

			concreto (ρ), potencial de media celda y concentración de cloruros.
Clasificación de Estado de Corrosión en Pilotes Marinos. [12]	Clasificación del estado de corrosión para evaluar la durabilidad a largo plazo.	196 registros de inspección *in situ* de pilotes de muelles y puentes expuestos al ambiente marino.	Random Forest (RF) y Árboles de Decisión. Condiciones: Datos de campo, incluyendo distancia a la costa, edad de la estructura, tipo de exposición, potencial de media celda, y resistividad del concreto.
Trabajo Propuesto	Clasificación y Regresión para determinar el nivel de riesgo de corrosión o el tiempo de inicio/tiempo de vida restante.	Mínimo 200 datos experimentales, combinando mediciones electroquímicas y condiciones ambientales no controladas.	Algoritmos de Clasificación Gradient Boosting, XGBoost, Logistic Regression y SVM Variables de entrada claves: potencial de corrosión, relación agua-cemento, edad, precipitación pluvial, humedad relativa, temperatura ambiente para generar clase de riesgo.

V. CONCLUSIONES

Los modelos de Boosting, como Gradient Boosting Machine y XGBoost, demostraron ser los más efectivos para clasificar el riesgo, evidenciando una alta capacidad para gestionar relaciones complejas en el conjunto de datos. Por ello, se recomienda utilizar el modelo GBM para predecir el riesgo de corrosión en concreto reforzado expuesto en ambientes urbanos, tomando como variables de entrada la temperatura ambiente, precipitación, edad de la muestra y relación agua/cemento. Además, se sugiere ampliar la base de datos mediante lecturas semanales de Ecorr, como propone este estudio. Con una mayor cantidad de datos, será posible realizar regresiones más precisas empleando algoritmos de inteligencia artificial para estimar las lecturas faltantes. Una mayor frecuencia en la recopilación de datos también mejorará la precisión en la predicción del riesgo de corrosión con Machine Learning, permitiendo anticipar el comportamiento del potencial de corrosión a corto y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación a través del proyecto 22221.25-P.

REFERENCIAS

[1] P. Garcés Terradillos, O. Troconis de Rincón, M. A. Baltazar Zamora, P. Castro Borges, C. Andrade Perdrix. “Recomendaciones sobre el potencial de corrosión”, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, pp. 1-6, 2020.

[2] P. Montes-García, F. Castellanos, J. A. Vásquez-Feijoo. “Assessing corrosion risk in reinforced concrete using wavelets”, Corrosion Science, vol. 52, pp. 555-561, 2010.

[3] S.C. Kranc, A. A. Sagüés. “Detailed modelling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete”, Corrosion Science, vol. 43, pp. 1355-1372, 2001.

[4] O. Burkan Isgor, A. Ghani Razaqpur. “Modelling steel corrosion in concrete structures”, Materials and Structures, vol. 39, pp. 291-302, 2006.

[5] S. Ahmad, S. Ahmad, S. Akhtar, F. Ahmad, A. Ansari. “Data driven assessment of corrosion in reinforced concrete structures embedded in clay dominated soils”, Scientific Reports, vol. 15, 22744, 2025.

[6] A. B. Ragga, F. Al-Neshawy, M. Noureldin. “AI-based framework for concrete durability assessment using generative adversarial networks and Bayesian neural networks”, Construction and Building Materials, vol. 471, 11, 140722, 2025.

[7] H. Ji, Z. Tian, Y. Xia, H. Ye. “Knowledge -driven machine learning for predicting corrosion rate of steel in mortar”, Cement and Concrete Composites, vol. 164, 106299, 2025.

[8]. O. Trocónis de Rincón, J.C. Montenegro, R. Vera, A. M. Carvajal, R.M. de Gutiérrez, A. Del Valle Moreno, M. Martínez, M. Castellote, C. Andrade, M. A. Climent, W. López, A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid, A. Knudsen, A. Durán-Herrera, J. Pérez-Quiroz, M. Villalobos, F. Calderón, O. Troconis, & DURACON Research Group. (2006). Durability of concrete structures: DURACON, an Iberoamerican project. Preliminary results. Building and Environment, 41(7), 952–962. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.005

[9]. O. Troconis de Rincón, A. Romero de Carruyo, C. Andrade, P. Helene, I. Diaz. “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”, Red temática XV.B Durabilidad de la armadura (DURAR).

[10]. N. Gowripalan, J. Chen, P. Dux. “Prediction of chloride-induced corrosion initiation in reinforced concrete structures using neural networks”, Cement and Concrete Composites, vol. 35, 121773. 2005.

[11] W. S. Taffese, T. Z. Teshale. “Prediction of corrosion rate of reinforced concrete structures using machine learning”, Construction and Building Materials, vol. 273, 121773, 2021

[12] Y. Yang, S. Li, S. Zhang, Y. Li, X. Wei. “State prediction of chloride-induced corrosion in marine reinforced concrete piles based on machine learning”, Engineering Failure Analysis, vol. 145, 106977, 2023.

INGÉNESIS | VOLUMEN 1 · NÚMERO 2 · MAYO–AGOSTO DE 2026 · PP. 28–33

Estudio de la polarización en PEDOT:PSS bajo diferentes longitudes de onda para aplicaciones optoelectrónicas

Study of polarization in PEDOT:PSS at different wavelengths for optoelectronic applications

Alinne Estefania Espinosa Lozoya[1], Rubén Grajales Coutiño[2]*, Jorge Luis Camas Anzueto[3], Alfredo Rossel Morales Navarro[4], Claudia Ivette Ruiz Suárez[5]

[1] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, alinneestefania29@gmail.com
[2] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx
[3] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, jcamas@tuxtla.tecnm.mx
[4] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, moralesnavarroalfredo@gmail.com
[5] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, claudia.rs@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 20/09/2025 | Aceptación: 19/08/2026 | Publicación: 31/08/2026
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102
ISSN: 3122-4709
https://www.oaxaca.tecnm.mx/revista

Resumen—En este artículo se presenta un estudio polarimétrico comparativo de muestras de PVA/PEDOT a diferentes longitudes de onda, con el objetivo de analizar la rotación relativa del plano de polarización. La caracterización se realizó mediante un arreglo polarizador–analizador basado en la Ley de Malus, empleando fuentes LED de 470, 525 y 650 nm. Para cada longitud de onda se determinó primero el ángulo de máxima transmisión sin muestra y posteriormente se registró el desplazamiento angular producido por muestras preparadas con 40, 140, 240 y 340 µL de PEDOT. Bajo iluminación verde, la rotación relativa fue negativa y disminuyó en magnitud conforme aumentó el volumen de PEDOT, pasando de −3.691° a −0.615°. Con luz azul, los valores permanecieron próximos a cero, mientras que con luz roja se obtuvieron rotaciones negativas entre −1.670° y −1.055°, sin una tendencia definida. Estos resultados permitieron identificar diferencias en la respuesta polarimétrica del material según la longitud de onda empleada.

Palabras clave—PEDOT, PVA, polarimetría, Ley de Malus, rotación relativa.

Abstract—This article presents a comparative polarimetric study of PVA/PEDOT samples at different wavelengths, with the aim of analyzing the relative rotation of the polarization plane. Characterization was performed using a polarizer–analyzer setup based on Malus' law and LED sources at 470, 525, and 650 nm. For each wavelength, the angle of maximum transmission was first determined without a sample, and the angular shift produced by samples prepared with 40, 140, 240, and 340 µL of PEDOT was subsequently recorded. Under green illumination, the relative rotation was negative and decreased in magnitude as the PEDOT volume increased, ranging from −3.691° to −0.615°. Under blue illumination, the values remained close to zero, whereas red illumination produced negative rotations ranging from −1.670° to −1.055°, without a defined trend. These results allowed differences in the polarimetric response of the material to be identified according to the wavelength used.

Keywords—PEDOT, PVA, polarimetry, Malus' law, relative rotation.

I. INTRODUCCIÓN

Materiales como el PEDOT:PSS, un compuesto polimérico conductor que combina el polímero conjugado PEDOT y el polímero aniónico PSS, han sido ampliamente estudiado debido a sus propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas, así como a su aplicación en celdas solares orgánicas, diodos emisores de luz, dispositivos termoeléctricos, fotodetectores y otros sistemas optoelectrónicos [1-4]. Asimismo, el PEDOT:PSS presenta un comportamiento electrocrómico, caracterizado por cambios reversibles de color y transmitancia cuando el material se somete a estímulos eléctricos o procesos de oxidación-reducción [5].

La combinación de PEDOT:PSS con alcohol polivinílico (PVA) también se ha utilizado como medio sensible en sensores ópticos, lo que demuestra el potencial del compuesto PVA/PEDOT:PSS para aplicaciones de detección [6]. Sin embargo, su respuesta óptica puede depender de factores como la proporción de sus componentes, el método de preparación, el espesor, la morfología y la organización interna del material. Estudios recientes han demostrado que las propiedades ópticas del PEDOT:PSS pueden presentar comportamientos isotrópicos o anisotrópicos dependiendo de su formulación y procesamiento [7]. En este contexto, el análisis mediante luz polarizada constituye una herramienta útil para evaluar comparativamente la respuesta óptica de las muestras.

La polarización describe la orientación de la oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética. Cuando un haz linealmente polarizado atraviesa un sistema compuesto por un polarizador y un analizador, la intensidad óptica transmitida varía en función del ángulo relativo entre sus ejes de transmisión. Esta relación se describe mediante la Ley de Malus, representada por la ecuación (1) [8-9],

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \tag{1}$$

donde I corresponde a la intensidad de un haz linealmente polarizado al pasar por un polarizador, I_0 es la intensidad de la luz de entrada y θ es el ángulo entre los ejes de transmisión del polarizador y el analizador. La posición angular correspondiente al máximo de transmisión puede utilizarse como referencia para identificar desplazamientos producidos al introducir una muestra en el sistema.

Además, se han propuesto formulaciones derivadas de la Ley de Malus para describir la transmisión de haces parcialmente polarizados o coherentes a través de polarizadores lineales y no uniformes [10]. Este principio se ha aplicado en dispositivos avanzados para el control y la multiplexación de la polarización de la luz [11]. No obstante, para el presente trabajo se utiliza la formulación convencional, debido a que el sistema experimental emplea una fuente linealmente polarizada y un analizador rotatorio.

En el estudio de materiales cromoactivos, Fong González [12] analizó la transmisión de potencia mediante películas polarizadoras, proporcionando un antecedente para el uso de arreglos polarizador–analizador en la evaluación de la respuesta óptica de estos materiales. Por otra parte, Aly et al. [13] caracterizaron películas de PEDOT:PSS modificadas con nanopartículas de Sn mediante mediciones de transmisión, reflexión y elipsometría, obteniendo parámetros como el índice de refracción y el coeficiente de extinción. De manera complementaria, Kong et al. [14-15] emplearon elipsometría espectroscópica de ángulo variable y espectroscopia Raman para analizar el espesor, las constantes ópticas y la anisotropía de películas de PEDOT:PSS.

Aunque estas técnicas permiten obtener una caracterización óptica más completa, requieren instrumentación especializada y modelos de ajuste para determinar las propiedades del material. En contraste, el presente trabajo propone una evaluación polarimétrica comparativa mediante un arreglo polarizador–analizador basado en la Ley de Malus.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

Para ello, se prepararon muestras de PVA/PEDOT:PSS mediante la incorporación de 40, 140, 240 y 340 µL de PEDOT:PSS en 2 mL de solución de PVA. Las muestras se evaluaron utilizando fuentes LED de 470 nm (azul), 525 nm (verde) y 650 nm (rojo). El objetivo fue analizar el desplazamiento angular del máximo de transmisión y determinar la rotación relativa del plano de polarización en función de la longitud de onda y del volumen de PEDOT:PSS añadido. El alcance del estudio se limita a una comparación polarimétrica relativa y no contempla la determinación del índice de refracción, el coeficiente de extinción ni el espesor de las muestras.

II. METODOLOGÍA

A. Preparación de las muestras

Para la preparación de las muestras se utilizó una solución de alcohol polivinílico (PVA) en una proporción de 1 g de PVA por cada 100 mL de agua desionizada. La solución se preparó mediante agitación constante a una temperatura de 90 °C hasta obtener una mezcla homogénea.

Posteriormente, se tomaron 2 mL de la solución de PVA y se añadieron diferentes volúmenes de PEDOT:PSS: 40, 140, 240 y 340 µL. Cada una de las mezclas obtenidas se depositó sobre un portaobjetos de vidrio y se dejó secar a temperatura ambiente bajo condiciones controladas hasta obtener las muestras sólidas empleadas en la caracterización óptica, en la Fig. 1 se visualizan las muestras sólidas utilizadas durante los experimentos.

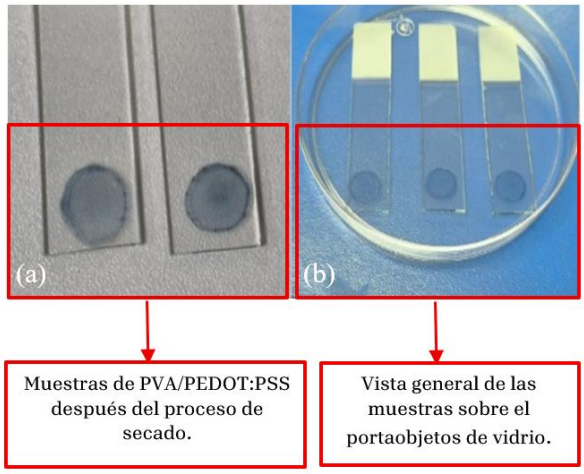


Fig. 1. Muestras de PVA/PEDOT:PSS: (a) muestras después del secado y (b) disposición para la caracterización óptica.

B. Arreglo experimental

La caracterización óptica de las muestras se realizó mediante un arreglo polarizador–analizador diseñado para evaluar la variación de la potencia óptica transmitida y el desplazamiento angular del máximo de transmisión producido por las muestras.

El sistema experimental, mostrado en la Fig. 2, estuvo constituido por una fuente de alimentación controlada; módulos LED intercambiables con longitudes de onda de 470 nm (azul), 525 nm (verde) y 650 nm (rojo); un polarizador lineal de entrada para definir el estado inicial de polarización; un portamuestras con control de temperatura QPod; un analizador rotatorio accionado mediante un servomotor Dynamixel; una lente colimadora; una fibra óptica; y un medidor de potencia óptica para registrar la potencia transmitida.

Asimismo, se utilizó un espectrómetro HR4000CG-UV-NIR (Ocean Optics) para la verificación espectral de las fuentes de iluminación y el monitoreo de su estabilidad durante las mediciones. La adquisición y el procesamiento de los datos experimentales se realizaron mediante una interfaz desarrollada en Python.

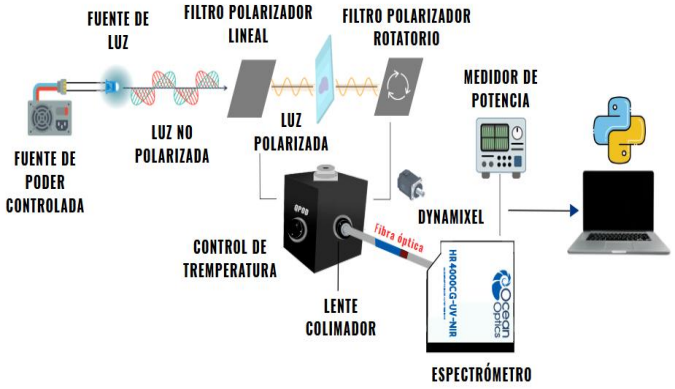


Fig. 2. Arreglo experimental polarizador-analizador.

C. Proceso de adquisición de datos

Para cada una de las longitudes de onda empleadas se realizó inicialmente una medición de referencia sin muestra. Durante esta etapa, el analizador se rotó progresivamente mientras se registraba la potencia óptica transmitida. La posición angular correspondiente al valor máximo de transmisión se definió como el ángulo de referencia, θ_{ref}.

Una vez determinado el ángulo de referencia para cada fuente LED, se colocaron individualmente las muestras preparadas con 40, 140, 240 y 340 µL. Para cada muestra se repitió el barrido angular del analizador y se registró nuevamente la potencia óptica transmitida.

La posición angular correspondiente al máximo de transmisión obtenido con la muestra se definió como θ_m . Este procedimiento se realizó de manera independiente para las fuentes LED de 470, 525 y 650 nm, permitiendo comparar la respuesta de las muestras en función tanto de la longitud de onda de iluminación como del volumen de PEDOT añadido.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

D. Determinación de la rotación relativa del plano de polarización

El comportamiento óptico de las muestras se determinó a partir del desplazamiento de la posición angular correspondiente a la máxima transmisión respecto a la medición de referencia y se calculó mediante la ecuación (2),

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_{ref} \quad (2)$$

donde $\Delta\theta$ representa el desplazamiento angular producido por la muestra, θ_m corresponde al ángulo de máxima transmisión obtenido con la muestra y θ_{ref} corresponde al ángulo de máxima transmisión determinado previamente sin muestra.

Un valor negativo de $\Delta\theta$ indica que el máximo de transmisión se desplazó hacia ángulos menores con respecto a la referencia, mientras que un valor positivo indica un desplazamiento hacia ángulos mayores.

Este procedimiento permitió realizar una comparación relativa del efecto sobre el plano de polarización de las muestras de PVA/PEDOT bajo las diferentes longitudes de onda utilizadas, sin requerir la determinación de parámetros ópticos adicionales como el índice de refracción o el espesor de las películas.

III. RESULTADOS

A. Determinación de los ángulos de referencia

Los barridos angulares realizados sin muestra permitieron identificar la posición correspondiente al máximo de potencia óptica transmitida para cada fuente de iluminación. Esta posición se estableció como el ángulo de referencia empleado posteriormente para calcular la rotación relativa producida por las muestras de PVA/PEDOT.

Para la fuente verde de 525 nm, el máximo de transmisión se registró en un ángulo de 135.264°, como se muestra en la Fig. 3.

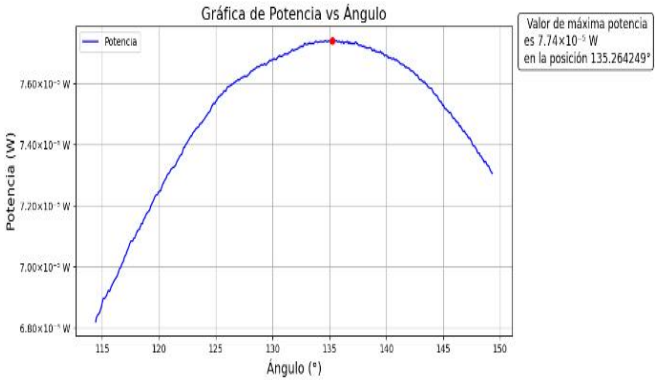


Fig. 3. Ángulo de alineación de los filtros polarizadores con luz verde.

Para la fuente azul de 470 nm, la posición angular correspondiente al máximo de transmisión se localizó en 135.352°, como se observa en la Fig. 4.

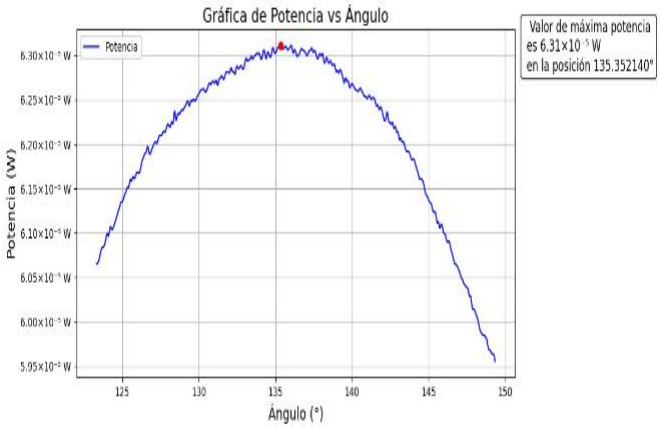


Fig. 4. Ángulo de alineación de los filtros polarizadores con luz azul.

En el caso de la fuente roja de 650 nm, el máximo de transmisión se registró en un ángulo de 136.407°, como se presenta en la Fig. 5.

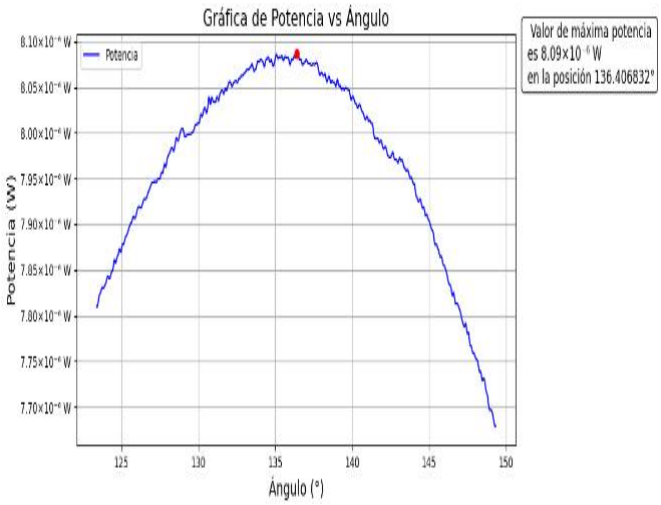


Fig. 5. Ángulo de alineación de los filtros polarizadores con luz roja.

B. Rotación relativa del plano de polarización

Después de colocar individualmente las muestras de PVA/PEDOT en el arreglo experimental, se determinó nuevamente la posición angular correspondiente al máximo de transmisión. La rotación relativa, Δθ, se obtuvo mediante la diferencia entre el ángulo medido con la muestra y el ángulo de referencia determinado previamente sin muestra.

En la Tabla 1 se presentan los valores de rotación relativa obtenidos para las muestras preparadas con diferentes volúmenes de PEDOT bajo las tres longitudes de onda estudiadas.

Tabla 1. Rotación relativa del plano de polarización en muestras de PEDOT:PSS

Volumen añadido (µL)	Verde (°)	Azul (°)	Rojo (°)

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

40	-3.691	+0.352	-1.318
140	-2.988	0.000	-1.494
240	-1.318	+0.352	-1.670
340	-0.615	-0.439	-1.055

Para la fuente verde, todas las muestras presentaron valores negativos de rotación relativa. La mayor magnitud se obtuvo con la muestra preparada con 40 µL de PEDOT, con un valor de −3.691°, mientras que la menor correspondió a la muestra de 340 µL, con −0.615°. Se observó una disminución progresiva de la magnitud de la rotación conforme aumentó el volumen de PEDOT añadido.

Bajo iluminación azul, los valores de rotación relativa permanecieron próximos a cero, dentro de un intervalo de −0.439° a +0.352°. En este caso no se observó una tendencia monotónica respecto al volumen de PEDOT añadido y los desplazamientos angulares fueron menores que los registrados con la fuente verde.

Para la fuente roja se obtuvieron rotaciones negativas en todas las muestras, con valores comprendidos entre −1.670° y −1.055°. La respuesta no presentó una tendencia monotónica respecto al volumen de PEDOT añadido y mostró una variación menor que la observada bajo iluminación verde.

La comparación gráfica de la rotación relativa obtenida con las tres fuentes de iluminación se presenta en la Fig. 6, y se observa que la fuente verde produjo la mayor variación de la rotación relativa respecto al volumen de PEDOT añadido. En contraste, la fuente azul presentó desplazamientos angulares próximos a cero, mientras que la fuente roja mantuvo valores negativos dentro de un intervalo comparativamente menor.

Estos resultados muestran respuestas polarimétricas diferentes en función de la longitud de onda empleada.

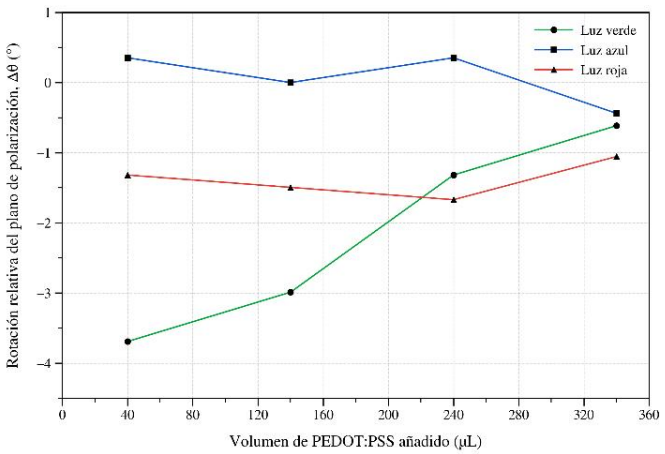


Fig. 6. Rotación relativa en función del volumen de PEDOT añadido.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos sugieren que la respuesta polarimétrica relativa de las muestras de PVA/PEDOT varía en función de la longitud de onda utilizada y del volumen de PEDOT añadido. Las mediciones se repitieron bajo las mismas condiciones experimentales y los registros obtenidos se utilizaron para localizar la posición angular correspondiente al máximo de transmisión. Sin embargo, debido a que no se calcularon parámetros estadísticos de dispersión, el análisis se limita a la comparación descriptiva de las tendencias observadas.

Con la fuente verde de 525 nm se registró la mayor variación angular. La rotación relativa permaneció negativa, pero su magnitud disminuyó progresivamente de −3.691° a −0.615° conforme aumentó el volumen de PEDOT añadido. En contraste, con la fuente azul de 470 nm se obtuvieron valores próximos a cero y sin una tendencia definida. Para la fuente roja de 650 nm también se registraron rotaciones negativas, aunque dentro de un intervalo menor y sin un comportamiento monotónico respecto al volumen añadido.

El signo negativo de Δθ indica que el máximo de transmisión se desplazó hacia ángulos menores con respecto al ángulo de referencia. Por consiguiente, este signo representa la dirección del desplazamiento dentro del sistema experimental y no debe interpretarse como evidencia directa de actividad óptica negativa del material.

Las diferencias observadas entre las tres fuentes sugieren que la respuesta angular de las muestras depende de la longitud de onda empleada. No obstante, debido a que no se determinaron el espesor, el índice de refracción, la morfología ni la uniformidad de las muestras, no es posible atribuir este comportamiento exclusivamente al volumen de PEDOT. Por ello, los resultados deben considerarse como una comparación polarimétrica relativa.

La comparación con trabajos relacionados se presenta en la Tabla 2. Aunque los estudios considerados emplean materiales o principios ópticos relacionados con el presente trabajo, existen diferencias en la composición de las muestras, las técnicas de caracterización y los parámetros analizados.

Tabla 2. Comparación del presente estudio con trabajos relacionados

Estudio	Método de caracterización	Alcance principal
Presente trabajo	Arreglo polarizador–analizador con fuentes LED de 470, 525 y 650 nm	Determinación de la rotación relativa mediante el desplazamiento angular del máximo de transmisión.
Megchum-Ruedas et al. [6]	Sensor de fibra óptica con PVA/PEDOT	Evaluación del material como medio sensible al pH.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102

Velasco Davoise et al. [7]	Caracterización del índice de refracción complejo	Identificación de comportamientos ópticos isotrópicos y anisotrópicos en PEDOT.
Fong González [12]	Transmisión mediante películas polarizadoras	Análisis de la transmisión de potencia en un material cromoactivo.
Aly et al. [13]	Transmisión, reflexión y elipsometría	Determinación de propiedades ópticas de películas de PEDOT modificadas con nanopartículas de Sn.
Kong et al. [15]	Elipsometría espectroscópica y espectroscopia Raman	Determinación del espesor, las constantes ópticas y la anisotropía de películas de PEDOT.

En comparación con estos trabajos, el arreglo polarizador–analizador utilizado en el presente estudio proporciona una medición relativa basada en el desplazamiento angular del máximo de transmisión. Aunque no permite determinar constantes ópticas ni realizar una caracterización completa del material, ofrece una configuración experimental sencilla para comparar la respuesta de las muestras bajo longitudes de onda específicas.

Como áreas de oportunidad y trabajo futuro, se propone incorporar muestras de PVA sin PEDOT y portaobjetos de vidrio sin recubrimiento como referencias, así como cuantificar la dispersión de las mediciones mediante la desviación estándar y barras de error. Cuando se disponga del equipamiento necesario, la caracterización podrá complementarse con la medición del espesor y técnicas como la elipsometría espectroscópica o la espectroscopia Raman.

A pesar de estas limitaciones, el método empleado permitió identificar diferencias en la respuesta angular de las muestras bajo las tres longitudes de onda. En particular, la mayor variación obtenida con la fuente verde permite señalar esta región espectral como un punto de interés para posteriores estudios de materiales basados en PVA/PEDOT.

V. CONCLUSIÓN

El arreglo polarizador–analizador basado en la Ley de Malus permitió evaluar comparativamente la respuesta de las muestras de PVA/PEDOT bajo tres longitudes de onda. La fuente verde de 525 nm presentó la mayor variación de la rotación relativa conforme aumentó el volumen de PEDOT, mientras que la fuente azul mostró valores próximos a cero y la roja no presentó una tendencia definida. Estos resultados identifican la región verde como un punto de interés para posteriores estudios polarimétricos del material.

REFERENCIAS

[1] [X. Fan et al., "PEDOT:PSS materials for optoelectronics, thermoelectrics, and flexible and stretchable electronics," J. Mater. Chem. A, vol. 11, no. 35, pp. 18561-18591, 2023, doi: 10.1039/D3TA03213B.

[2] J.-D. Huang et al., "Super-resolution fluorescence imaging of PEDOT:PSS films," Mater. Horiz., vol. 11, no. 24, pp. 6497-6503, 2024, doi: 10.1039/D4MH01223B.

[3] L. V. Kayser and D. J. Lipomi, "Stretchable conductive polymers and composites based on PEDOT and PEDOT:PSS," Adv. Mater., vol. 31, no. 10, Art. no. 1806133, 2019, doi: 10.1002/adma.201806133.

[4] L. Groenendaal, F. Jonas, D. Freitag, H. Pielartzik, and J. R. Reynolds, "Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: Past, present, and future," Adv. Mater., vol. 12, no. 7, pp. 481-494, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(200004)12:7<481::AID-ADMA481>3.0.CO;2-C.

[5] Z. Wang and R. Liu, "PEDOT:PSS-based electrochromic materials for flexible and stretchable devices," Mater. Today Electron., vol. 4, Art. no. 100036, 2023, doi: 10.1016/j.mtelec.2023.100036.

[6] C. A. Megchum-Ruedas, P. M. Velasco-Bolom, R. Grajales-Coutiño, J. L. Camas-Anzueto, M. Pérez-Patricio, and C. A. Hernández-Gutiérrez, "A film composed of PEDOT:PSS/PVA as a sensitive medium for pH sensor in optical fiber," Measurement, vol. 233, Art. no. 114750, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114750.

[7] L. Velasco Davoise, R. Peña Capilla, and A. M. Díez-Pascual, "Isotropic and anisotropic complex refractive index of PEDOT:PSS," Polymers, vol. 15, no. 15, Art. no. 3298, 2023, doi: 10.3390/polym15153298.

[8] E. Hecht, Optics, 5th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2017.

[9] D. H. Goldstein, Polarized Light, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003, doi: 10.1201/9780203911587.

[10] J. Xu, G. Gbur, and T. D. Visser, "Generalization of Malus' law and spatial coherence relations for linear polarizers and non-uniform polarizers," Opt. Lett., vol. 47, no. 21, pp. 5739-5742, 2022, doi: 10.1364/OL.474267.

[11] L. Deng et al., "Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing," Light Sci. Appl., vol. 9, Art. no. 101, 2020, doi: 10.1038/s41377-020-0327-7.

[12] A. Fong González, "Análisis de transmisión de potencia de un material cromoactivo a través de películas polarizadoras," Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 2022.

[13] K. A. Aly et al., "Effect of Sn nanoparticles on the optical properties of PEDOT:PSS thin films," Front. Phys., vol. 12, Art. no. 1331133, 2024, doi: 10.3389/fphy.2024.1331133.

[14] M. Kong, "Thermal conductivity and advanced optical characterization of PEDOT:PSS based films," Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España, 2022. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/10803/687662.

[15] M. Kong, M. Garriga, J. S. Reparaz, and M. I. Alonso, "Advanced optical characterization of PEDOT:PSS by combining spectroscopic ellipsometry and Raman scattering," ACS Omega, vol. 7, no. 43, pp. 39429-39436, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c05945.

ISSN: 3122-4709
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2025-120309551700-102


INGÉNESIS

INGÉNESIS

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA

CRÉDITOS DE PORTADA

VOLUMEN 1, NÚMERO 2

IMAGEN DE PORTADA

Micrografía electrónica de barrido de carbón obtenido de la especie arbórea *Alnus acuminata* Kunth, procedente de la Sierra Norte de Oaxaca y activado químicamente con ácido fosfórico.

Magnificación: 5100×
Ancho del campo horizontal: 52.6 µm
Barra de escala: 10 µm
Voltaje de aceleración: 10 kV

En la imagen se observan poros de diversos tamaños y estructuras con contornos hexagonales bien definidos.

OBTENCIÓN DE LA IMAGEN

Imagen obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido Phenom ProX (Thermo Fisher Scientific), equipado con un detector de espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS).

CRÉDITO DE LA IMAGEN DE PORTADA

ROSSY FERIA REYES

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico del Valle de Etla, en colaboración con la Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca, México.

NOTA SOBRE EL TRATAMIENTO ORIGINAL DE LAS IMÁGENES

Las imágenes de portada y contraportada fueron recortadas para adaptarlas al ancho de la página. Para su utilización en la contraportada, la micrografía original fue sometida a una mejora de nitidez. La versión intervenida se emplea exclusivamente con fines gráficos y no sustituye la micrografía original presente en este número como registro experimental.

IMAGEN DE CONTRAPORTADA

Adaptación gráfica de una micrografía electrónica (SEM) de una película delgada de óxido de zinc (ZnO) obtenida de 20 ciclos mediante la técnica SILAR.

En su superficie se observa una distribución heterogénea de estructuras y zonas oscuras asociadas con huecos originados por la ausencia de centros de nucleación.

Magnificación: 3 000x.
Campo horizontal de visión: 10 µm.

En la imagen se observan poros de diversos tamaños y estructuras con geometrías hexagonales.

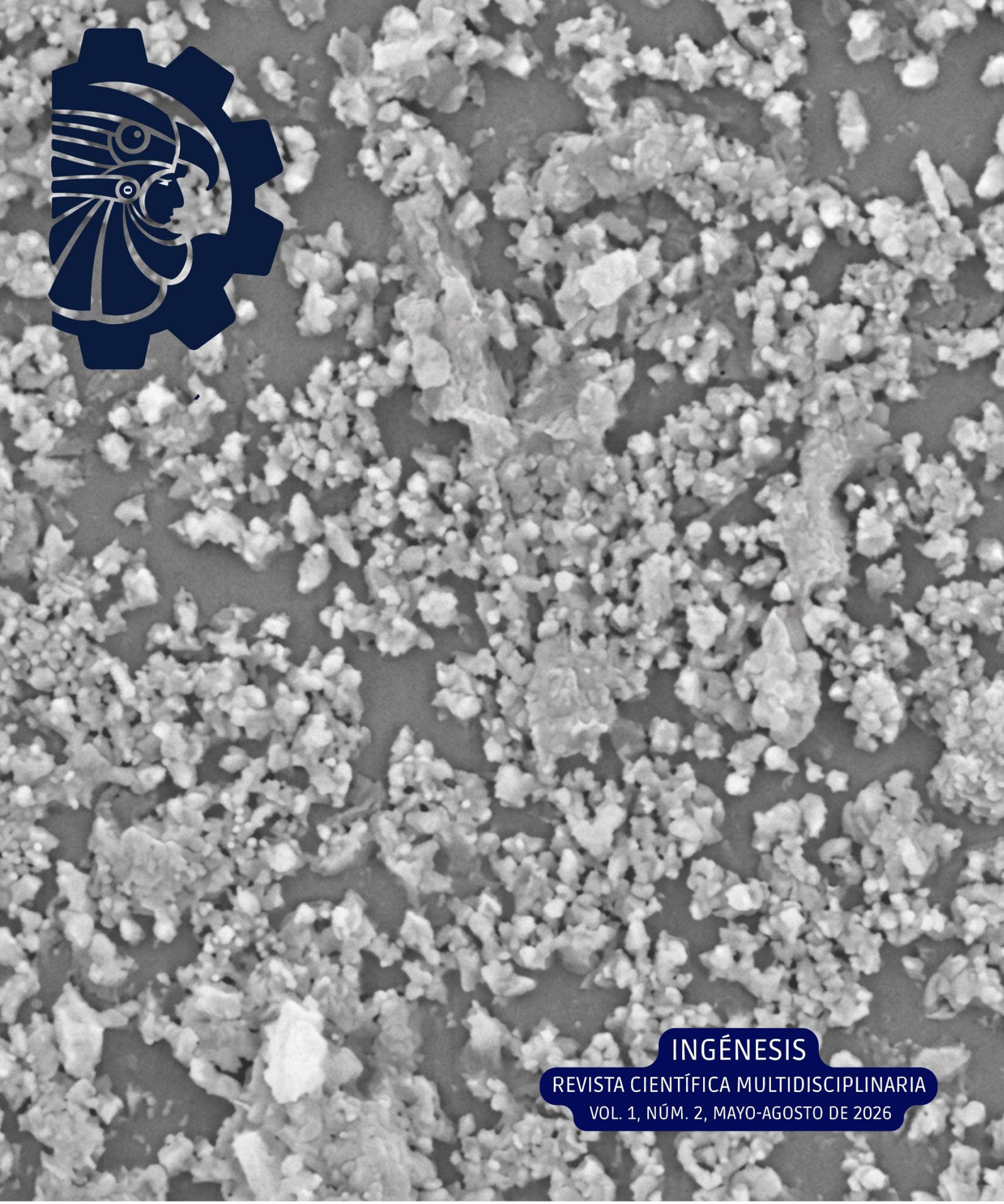
Fuente: Efecto de ciclos SILAR y dopaje de plata en películas delgadas de ZnO

CRÉDITO DE LA IMAGEN DE CONTRAPORTADA

LUIS ALFONSO GARCÍA CERDA

Centro de Investigación en Química Aplicada


INGENESIS



INGÉNESIS

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA

VOL. 1, NÚM. 2, MAYO-AGOSTO DE 2026

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

División de estudios de Posgrado e Investigación