ISSN: **2448** - 7775

IDENTIDAD Energética 2025

REVISTA PARA
LA DIFUSIÓN DE LA
INVESTIGACIÓN EN CIENCIA & TECNOLOGÍA

VOLUMEN 8
No. 1

IDENTIDAD Energética 2025

REVISTA PARA
LA DIFUSIÓN DE LA
INVESTIGACIÓN EN CIENCIA & TECNOLOGÍA

ISSN: **2448 -** 7775

VOLUMEN 8
No. 1

Identidad Energética
Todo sobre energía

Equipo Editorial

Editores en Jefe

Dr. Iván Abel Hernández Robles
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dra. Xiomara González Ramírez
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Editores Asociados

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo
Sistemas Eléctricos de Potencia
CINVESTAV del IPN - Unidad Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

Dr. Juan Carlos Olivares Galván
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
CDMX, México

Dr. Nestor Daniel Galán Hernández
Unidad Académica de Ingeniería en Energía
Universidad Politécnica de Sinaloa
Mazatlán, Sinaloa, México

Dr. Juan Segundo Ramírez
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
San Luis Potosí, SLP, México

Consejo Editorial

Dr. Jesús Martínez Patiño
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dr. Alejandro Pizano Martínez
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dr. José Merced Lozano García
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dr. Rafael Guzmán Cabrera
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dr. Luis Ramón Merchán Villalba
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Dr. Víctor Javier Gutiérrez Martínez
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Guanajuato
Salamanca, Guanajuato, México

Coordinación Editorial

Dra. Xiomara González Ramírez
Coordinadora Editorial y Seguimiento

M.E.D. Juanita del Carmen Mendoza Ornelas
L.A.D. Lesli Yared Villegas Fonseca
Edición, Diseño y Cuidado de Edición

Carta del editor

Estimados autores y lectores:

Desde 2018 la revista *IDENTIDAD ENERGÉTICA* ha sido una plataforma de divulgación para la Investigación en el área de energía, su contenido tiene características de transversalidad multidisciplinaria brindado un espacio no lucrativo para todos los interesados en aportar investigaciones científicas y tecnológicas originales enfocadas al sector energético.

La revista *IDENTIDAD ENERGÉTICA* está respaldada por un grupo de profesores investigadores de varias áreas de la Ingeniería adscritos a la Universidad de Guanajuato, así como también de profesores investigadores reconocidos a nivel nacional, así como cuenta con el apoyo Editorial del Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato (CINERGIA UG).

Nuestro Comité Editorial trabaja arduamente para que *IDENTIDAD ENERGÉTICA* se consolide, siga creciendo y pueda indexarse en una base datos reconocida a nivel nacional e internacional, por lo que a los investigadores autores y lectores que han participado se les agradece su confianza para que la revista *IDENTIDAD ENERGÉTICA* sea su instrumento de divulgación para su conocimiento, investigación, desarrollo tecnológico y experiencia dentro del tema energético, y se continue impulsando el ahorro y la eficiencia energética, crear conciencia y disminuir malos hábitos o desperdicio de energía. Deben ser aliados para fomentar, para impulsar, y porque no, desarrollar nuevas tecnologías de generación de energía limpia y eficiente, todo esto con el objetivo común de mitigar el impacto del calentamiento global, entonces es imperante que debemos seguir con ese compromiso de divulgación en la sustentabilidad, ahorro y eficiencia energética en todo el mundo, por lo que este tipo de plataformas, sin duda, deberán de divulgarse y fortalecerse para crear una red de colaboración en las Universidades y atender los retos energéticos y ambientales.

Es de agradecer a los autores y lectores que han participado en nuestras ediciones pasadas, así como se les agradece su interés por buscar participar y colaborar en ediciones futuras y mantener la calidad del contenido de *IDENTIDAD ENERGÉTICA.*

"Divulgación y Cooperación para Transcender en conocimiento y avance tecnológico"
Iván Abel Hernández Robles

Iván Abel Hernández Robles

2025

CONTENIDO

Caracterización y Simulación del Recurso Energético Solar-Eólico en Saltillo, México 7

Lidia M. Flores-López, Guillermo J. Rubio-Astorga, Néstor D. Galán-Hernandez.

TecNM-Instituto Tecnológico de Culiacán-CIIDETEC.
Universidad Politécnica de Sinaloa.

Modelado de un Transformador para la Detección de Fallas por Medio del Análisis de la Respuesta a la Frecuencia 15

Evelin Naomi Gallardo-Licea, Adrián González Parada, Rubén Jaramillo Vacío.

DICIS Universidad de Guanajuato.
LAPEM CFE

Evaluación y Validación Experimental del Modelo de Relé de Sobre Corriente de Tiempo Inverso 51 en EMTP-ATP 23

José Jesús Contreras Peréz, Juan Manuel Cano Gallardo, Daniel Peña Pérez, Osvaldo Rodríguez Villalón, Luis Ramon Merchan Villalba.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías
LAPEM

Batería Li-Ion 2D con Líneas 1D de Electrolito Sólido Ta-LLZO y Ánodo/Cátodo de Materiales Compuestos 30

Aldo Elizarraraz Perez, José de Jesús Pérez Bueno, Iván A. Hernández Robles.

CIDETEQ
DIE-UG

Aprovechamiento Bioenergético de los Residuos Agroindustriales de Chile Mirasol (Capsicum Annum CV Mirasol) 34

Janeth Daniel-Casesus, Karina Gonzalez-Ramírez, Gabriela Aguilar-Zárate, Karla Denisse Luna-Avelar, Miguel Betancourt-Lozano, David Ulises Santos-Ballardo.

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Mazatlán, Sinaloa, México.
Universidad Autónoma del Estado de México, México.
SECIHTI-CIAD Mazatlán, Sinaloa, México.

CONTENIDO

Efecto de la Fermentación de Residuos Agroindustriales sobre el Crecimiento y el Potencial Metanogénico de Subproductos (frass) del Cultivo de Larvas de Hermetia Illucens.....40

Angela Joanne Villela-Rosas, Verónica Vanessa Hernández-Hernández, Erick Josue Navarro-Barrón, Bruno Gómez-Gil, Miguel Betancourt-Lozano, Karla Denisse Luna-Avelar.

Universidad Autónoma de Occidente. Mazatlán, Sinaloa, México.
SECIHTI, Ciudad de México, México.
Centro de Investigación de Alimentación y Desarrollo de la Unidad Mazatlán Sinaloa, México.

Análisis del Potencial Metanogénico de Residuos Agroindustriales de Semillas de Chile Mirasol (Capsicum Annuum Var. Mirasol).....48

Karina González Ramírez, Janeth Daniel Casesus, Karla Denisse Luna-Avelar, Miguel Bentacourt-Lozano, Liliana Ivette Ávila-Córdoba, David Ulises Santos-Ballardo..

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México.
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán, Sinaloa, México.
SECIHTI-CIAD Mazatlán, Sinaloa, México.

Panorama para la Reutilización de Agua Gris en Viviendas del Estado de Guanajuato.....55

D.D. Vázquez-Ramírez, P.S. Basurto-Camarillo, E.S. Pizano-Orozco, I.W. Reyes-Buenfil, X.González Ramírez, J.M. Lozano-García, O. Pizano-Martínez y A. Pizano-Martínez.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Unversidad de Guanajuato.
Departamento de Arte y Empresa, Universidad de Guanajuato.
Centro Universitario de Ciencias de la Salud, Universidad de Guadalajara.

Estudio Experimental de Recubrimientos con Óxido de Cobre para Placas Absorbedoras Planas en SAH.....61

Roberto Carlos Salmorán Salgado, José Enrique Botello Álvarez, Brenda Rios Fuentes.

Tecnológico Nacional de México en Celaya.
Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Guanajuato, Celaya, Guanajuato, México.

Recibido 28 de junio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Caracterización y Simulación del Recurso Energético Solar-Eólico en Saltillo, México

LIDIA M. FLORES LÓPEZ[1*], GUILLERMO J. RUBIO ASTORGA[1], NÉSTOR D. GALÁN HERNANDEZ[2].
[1]TecNM-Instituto Tecnológico de Culiacán-CIIDETEC
[2]Universidad Politécnica de Sinaloa
*Autor de Correspondencia: lm24171312@culiacan.tecnm.mx

RESUMEN El aprovechamiento eficiente de recursos renovables es esencial para mitigar la intermitencia energética en sistemas híbridos. Este trabajo presenta un análisis combinado del recurso eólico y solar en la ciudad de Saltillo durante el año 2024, con datos obtenidos del Observatorio RUOA. Para el recurso eólico se realizaron análisis estadísticos detallados, al ajustar distribuciones de Weibull, al extrapolar a distintas alturas y al simular series temporales mediante modelos de Von Karman y Van der Hoven. Para el recurso solar, se emplearon datos de irradiación diaria (25 días de cada mes), al generar curvas promedio mensuales de horas sol pico (HSP), una curva anual de energía e irradiancia, y un diagrama de trayectoria solar al considerar la latitud local. Los resultados permiten caracterizar de forma robusta ambos recursos, al proporcionar una base sólida para el diseño de sistemas híbridos más estables y eficientes en la región.

PALABRAS CLAVE — Recurso renovable, Sistemas híbridos, Estimación del recurso eólico, Horas sol pico (HSP).

I. INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia fuentes limpias y sostenibles ha impulsado la integración de sistemas híbridos como la energía solar y eólica [1]. Estos sistemas permiten aprovechar la complementariedad entre ambos recursos. Contribuyen a una mayor estabilidad en la producción energética y a la mitigación de la intermitencia de cada fuente. Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas depende de un estudio de los recursos disponibles, al considerar las características climatológicas del sitio de interés.

El estudio del recurso eólico se aborda mediante análisis estadísticos de largo plazo, donde se destaca la aplicación de la función de distribución de Weibull para caracterizar el comportamiento del viento [2], así como la extrapolación vertical mediante la ley de Hellman, para estimar velocidades a distintas alturas [3]. Además, la simulación estocástica de la velocidad del viento mediante modelos espectrales propuestos por Von Karman y Van der Hoven que permiten generar series temporales sintéticas que representan condiciones realistas de variabilidad horaria y diaria.

En cambio, el recurso solar se analiza mediante la estimación de la irradiancia global, de donde se derivan las horas sol pico (HSP). Esta métrica es fundamental para dimensionar sistemas fotovoltaicos y permite representar la energía solar diaria en términos de equivalencia a irradiancia estándar (1 kW/m²). La construcción de curvas promedio mensuales de HSP y su representación anual permite entender la distribución estacional de la energía solar, complementándose con el análisis geométrico de la trayectoria solar, útil para la optimización del ángulo de inclinación de módulos solares [4].

Este estudio presenta una caracterización conjunta del recurso solar y eólico en la ciudad de Saltillo, México, a partir de los datos medidos in situ por el observatorio atmosférico RUOA [5] durante el año 2024. Lo cual permite capturar la variabilidad local, efectos microclimáticos y fluctuaciones horarias reales que no son visibles en plataformas globales de estimación como NASA POWER o Global Wind Atlas.

Para el recurso eólico se desarrollan análisis de frecuencia absoluta y relativa, histogramas mensuales, curvas de Weibull y simulaciones de velocidad de viento. Para el recurso solar se procesan series de irradiancia de 25 días por mes, obteniéndo curvas mensuales de HSP, una curva anual suavizada de energía solar diaria y un diagrama solar que muestra la trayectoria aparente del Sol. Este enfoque integral tiene como objetivo proporcionar una base técnica sólida para el diseño de sistemas híbridos más robustos, capaces de reducir los efectos de intermitencia y mejorar la eficiencia energética en zonas con alta variabilidad estacional.

II. DESARROLLO

Se detalla la metodología empleada para la caracterización y simulación de los recursos eólico y solar en la ciudad de Saltillo, México. Se describen los modelos y las

herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de los datos, al dividir el desarrollo en dos subsecciones principales, una dedicada al recurso eólico y otra al recurso solar.

A. RECURSO EÓLICO

A continuación, se presenta el análisis del recurso eólico a partir de un conjunto de datos medidos a una altura de 20 metros. Se describen los análisis estadísticos de frecuencia, la extrapolación de la velocidad del viento a diferentes alturas mediante la ley de Hellman, la aplicación de la función de probabilidad de Weibull para caracterizar el potencial energético del viento, y la simulación estocástica del recurso mediante modelos de Von Karman y Van der Hoven.

1. Análisis de los datos

El análisis de la base de datos inicia con la determinación de métricas de estadística como la velocidad media, desviación estándar y la intensidad de turbulencia; al igual que la determinación de frecuencias absolutas de clase.

2. Ley de Hellman

El modelo de cálculo se basa en la ley potencial de Hellman Ec. (1) para la extrapolación de velocidad a una altura distinta de interés

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

Donde $\bar{v}$ es la velocidad media deseada (m/s), $\bar{v}_r$ la velocidad media de referencia (m/s), h la altura deseada (m), h_r la altura de referencia (m) y α el coeficiente dependiente de la longitud de rugosidad del terreno.

Al obtener los datos extrapolados se realiza un análisis idéntico al propuesto en la sección anterior.

3. Función de probabilidad de Weibull

La función de probabilidad de Weibull Ec. (2) predice potencial energético con la distribución de la velocidad del viento [6].

$$p(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^{k}} \tag{2}$$

En donde $p(v)$ es la función de densidad de probabilidad de Weibull, k el factor de forma (adimensional), c el factor de escala (m/s) y v_w la velocidad del viento (m/s).

Para deducir los valores de k y c es necesario calcular la curva de densidad de probabilidad mediante la Ec. (3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(v_w - \bar{v})^2}{n-1}} \tag{3}$$

Al obtener σ se sustituye en la Ec. (4) para obtener el factor de forma.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \tag{4}$$

Posteriormente se reemplaza k en la Ec. (5) para conseguir el último valor necesario para realizar la Ec. (2).

$$c = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \tag{5}$$

Al realizar las Ec. (2), Ec. (3), Ec. (4), Ec. (5) se obtiene una tabla donde se visualizan los parámetros pertinentes y se desarrolla un histograma de las frecuencias relativas y la curva que representa el ajuste de Weibull respecto a los datos.

4. Función de probabilidad de Weibull extrapolada

De manera generalizada los parámetros de la distribución de Weibull en la altura original medida no son los necesarios para condiciones óptimas de generación [7], por lo que se utilizan las Ec. (6), Ec. (7), Ec. (8) para extrapolar sus valores a otra altura deseada.

$$k = k_r\left(\frac{1-0.088ln\left(\frac{h_r}{10}\right)}{1-0.088ln\left(\frac{h}{10}\right)}\right) \tag{6}$$

$$c = c_r\left(\frac{h}{h_r}\right)^{\beta} \tag{7}$$

$$\beta = \frac{0.37-0.088\ln(c_r)}{1-0.088ln\left(\frac{h_r}{10}\right)} \tag{8}$$

En donde k_r, k son los parámetros de forma para las alturas h_r y h. Y c_r, c son los parámetros de escala para las alturas h_r y h, en (m/s).

Al desarrollar se obtienen los parámetros y la curva de probabilidad de Weibull extrapolada.

5. Modelo matemático de Von Karman-Van der Hoven

El modelo de Von Karman-Van der Hoven [8] integra en la Ec. (9); la aproximación de velocidad de viento a corto plazo Ec. (10) y a mediano-largo plazo Ec. (11).

$$v_w(t) = v_g(t) + v_t(t) \tag{9}$$

$$v_g(t) = \sum_{i=0}^{N} A_i \cos\left(\omega_i t + \varphi_i\right) \tag{10}$$

$$v_t^{(i)}(t) = T_s \cdot \sum_{p=0}^{N} h_F^{(i)}(k)\omega_c(t-k) \tag{11}$$

Las cuales al graficar proporcionan una curva de estimación de velocidad de viento a corto, mediano y largo plazo y datos estimados que fungen como simulador del recurso eólico para casos con baja disponibilidad de datos.

B. RECURSO SOLAR

La caracterización del recurso solar emplea datos de irradiancia minútales correspondientes a los primeros 25 días de cada mes. A partir de esto, se calcula la irradiancia promedio y las horas sol pico (HSP) para cada mes, se generan curvas promedio y un resumen anual del recurso solar. Y se incluye la construcción de un diagrama de trayectoria solar que considera la latitud de Saltillo.

1. Horas sol pico

Se toman los datos minutales de irradiancia correspondientes a los primeros 25 días de cada mes del año 2024. Y se calcula la irradiancia promedio diaria por mes y las horas sol pico (HSP) mediante la Ec. (12).

$$HSP = \frac{1}{1000}\sum_{i=1}^{1440}\frac{Irradiancia}{60} \quad (12)$$

Donde la Irradiancia representa W/m^2 para cada minuto del día. Se generan las curvas promedio mensuales de HSP, la curva anual suavizada de HSP, y la curva anual de energía solar diaria acumulada. Lo cual, representa un factor clave para cuantificar el recurso solar del sitio [9].

2. Curva anual

Al emplear los datos anteriormente mencionados se procede a procesarlos mediante una interpolación por tramos Ec. (13).

$$E(t) = E_n + \frac{E_{n+1}-E_n}{(t_{n+1}+365)-t_n}(t-t_n), \quad (13)$$

$$t_n \le t \le t_1 + 365$$

Sean t_n los días del año con mediciones disponibles y $E_n$la energía medida en esos días. Para obtener una serie continua de energía diaria a lo largo del año, se aplica la interpolación por tramos entre los puntos consecutivos.

3. Trayectoria solar

Se construye un diagrama de trayectoria solar para la latitud de Saltillo (25° N), al calcular los ángulos de altura solar (α) en la Ec. (14). y azimut solar (Az) en la Ec. (15).

$$sin(\alpha) = sin(\varphi)sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(H) \quad (14)$$

$$sin(Az) = \frac{\cos(\delta)\sin(H)}{\cos(\alpha)} \quad (15)$$

Donde φ es la latitud, δ la declinación solar y H el ángulo horario. Esto permite determinar la distribución de la radiación solar que incide sobre una superficie a lo largo del día y del año, lo cual es esencial para optimizar el diseño y la orientación de sistemas fotovoltaicos [10].

III. RESULTADOS

Se presentan los hallazgos obtenidos a partir de la metodología descrita. Los resultados están organizados para mostrar de manera progresiva los análisis estadísticos, las extrapolaciones y simulaciones para ambos recursos.

A. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Al analizar los datos a 20 m se determinan las estadísticas básicas de velocidad de viento para el sitio dentro de la Tabla I. Donde la velocidad media de viento se adapta a escenarios de micro generación y posee una desviación estándar moderada para el recurso evaluado.

TABLA I. ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL VIENTO.

Velocidad media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	Intensidad de Turbulencia
2.996	**1.584**	**52.88%**

Como siguiente paso se obtienen las estadísticas específicas del perfil de viento como se observa en la Tabla II. Donde la mayor frecuencia de velocidad de viento presentada pertenece a la marca de clase de 2.5 m/s.

Con las estadísticas de la Tabla II se realizan las representaciones gráficas para visualizar el comportamiento eólico al representar el histograma de frecuencias relativas y la curva de frecuencia absoluta en la Fig. 1.

Se observa la Fig. 2 el comportamiento de las frecuencias acumuladas y la presencia de pendientes mayoritarias de 1 a 5 m/s.

TABLA II. ANÁLISIS DEL VIENTO.

Marca (m/s)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada Menor Que	Frecuencia Relativa Acumulada Mayor Que
0.5	**545**	**0.0667**	0.667	1.0000
1.5	**1820**	**0.2226**	0.2893	0.9333
2.5	**2161**	**0.2643**	0.5536	0.7107
3.5	**1834**	**0.2243**	0.7779	0.4464
4.5	**1003**	**0.1227**	0.9006	0.2221
5.5	**423**	**0.0517**	0.9523	0.0994
6.5	**185**	**0.0226**	0.9749	0.0477
7.5	**118**	**0.0144**	0.9894	0.0251
8.5	**51**	**0.0062**	0.9956	0.0106
9.5	**17**	**0.0021**	0.9977	0.0044
10.5	**11**	**0.0013**	0.9990	0.0023
11.5	**6**	**0.0007**	0.9998	0.0010
12.5	**2**	**0.0002**	1.0000	0.0002
13.5	**0**	**0.000**	1.0000	0.0000

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

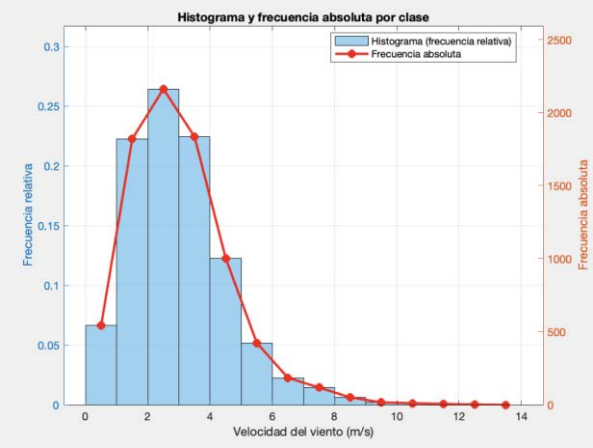


Fig. 1. Histograma y frecuencia absoluta por clase.

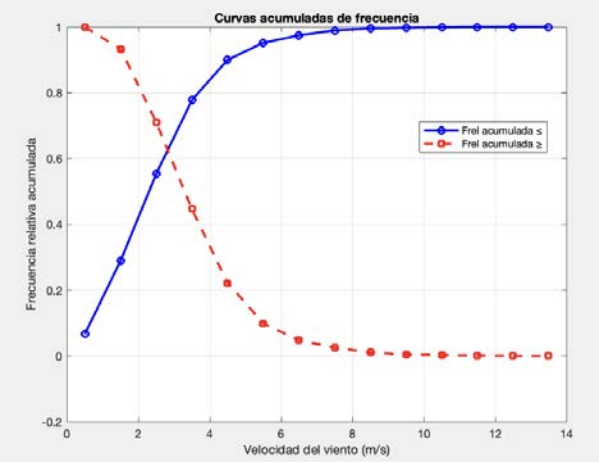


Fig. 2. Curvas acumuladas de frecuencia.

B. LEY DE HELLMAN

Se utiliza la Ley de Hellman para extrapolar los datos a una altura de interés de 100 m lo que permite evaluar el incremento de velocidad de viento en su perfil vertical y la diferencia contra la altura original.

De las estadísticas básicas evaluadas en la Tabla III los datos extrapolados presentan un aumento de 1 m/s en la velocidad media del viento, pero también un aumento en la desviación estándar que indica una mayor variabilidad en la velocidad del viento, y reduce la confiabilidad del recurso.

En las estadísticas específicas del viento extrapolado expuestas en la Tabla IV se detecta una amplitud en las velocidades de la marca de clase, la cual se extiende hasta 16.5 m/s a diferencia de la presentada en la Tabla II que indicaba un máximo de 12.5 m/s y la frecuencia absoluta de velocidades aumenta a la siguiente marca de clase de 3.5 m/s.

Se determinan el histograma de frecuencias relativas y la curva de frecuencia absoluta en la Fig. 3 que brinda una representación visual del aumento de estas velocidades.

Se grafican las curvas de frecuencias acumuladas en la Fig. 4 donde se visualiza que ambas pendientes aumentan el rango de estabilización el cual se amplía de 1 a 8 m/s y representa un aumento de 3 m/s con respecto a la Fig. 2

TABLA III. ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL VIENTO EXTRAPOLADO

Velocidad media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	Intensidad de Turbulencia
4.002	**2.116**	**52.88%**

TABLA IV. ANÁLISIS DEL VIENTO EXTRAPOLADO

Marca (m/s)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada Menor Que	Frecuencia Relativa Acumulada Mayor Que
0.5	**168**	**0.0205**	0.0205	1.0000
1.5	**1247**	**0.1525**	0.1731	0.9795
2.5	**1466**	**0.1793**	0.3524	0.8269
3.5	**1645**	**0.2012**	0.5536	0.6476
4.5	**1484**	**0.1815**	0.7351	0.4464
5.5	**958**	**0.1172**	0.8523	0.2649
6.5	**542**	**0.0663**	0.9185	0.1477
7.5	**274**	**0.0335**	0.9521	0.0815
8.5	**153**	**0.0187**	0.9708	0.0479
9.5	**112**	**0.0137**	0.9845	0.0292
10.5	**57**	**0.0070**	0.9914	0.0155
11.5	**34**	**0.0042**	0.9956	0.0086
12.5	**16**	**0.0020**	0.9976	0.0044
13.5	**10**	**0.0012**	0.9988	0.0024
14.5	**2**	**0.0002**	0.9990	0.0012
15.5	**6**	**0.0007**	0.9998	0.0010
16.5	**2**	**0.0002**	1.0000	0.0002
17.5	**0**	**0.0000**	1.0000	0.0000

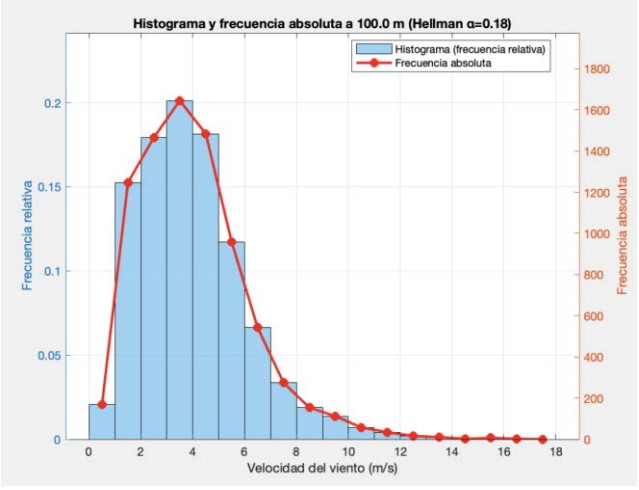


Fig. 3. Histograma y frecuencia absoluta por clase a 100 m.

 ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

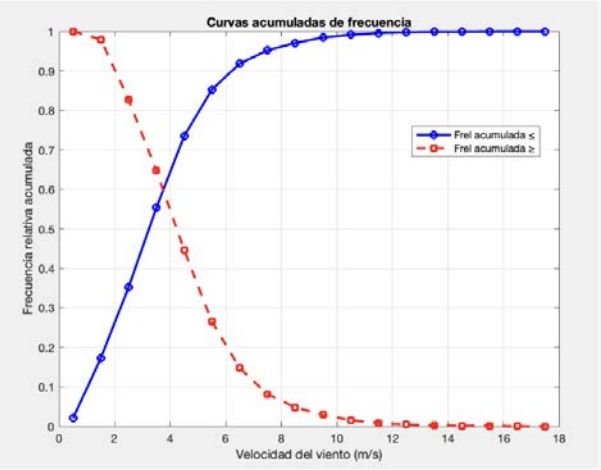


Fig. 4. Curvas acumuladas de frecuencia a 100 m.

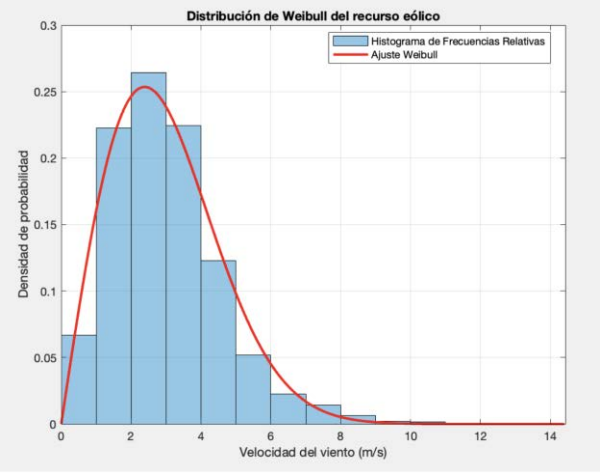


Fig. 5. Distribución de Weibull del recurso eólico.

C. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

Se determinan los parámetros *k* y *c* de Weibull para la altura original del sitio de 20 m en la Tabla V.

Se crea el ajuste de Weibull en la Fig. 5 de acuerdo con el histograma de frecuencias relativas de los datos donde se observa un ajuste adecuado al validar la función de probabilidad de Weibull para este escenario.

D. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EXTRAPOLADA

Se comparan los parámetros de Weibull desde la altura original del sitio de 20 m y los extrapolados a la altura de referencia de 100 m en la Tabla VI. Donde se observa el crecimiento de los nuevos parámetros con respecto a los originales.

Al graficar la curva de función de probabilidad de Weibull extrapolado en la Fig. 6 se observa una mayor amplitud en las velocidades de viento estimadas ya que finaliza hasta 12 m/s comparada con la Fig. 5 de 9 m/s.

TABLA V. PARÁMETROS ESTIMADOS DE WEIBULL

Velocidad media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	Parámetro K	Parámetro C (m/s)
2.996	**1.584**	**1.998**	**3.380**

TABLA VI. COMPARATIVA DE PARÁMETROS DE WEIBULL EXTRAPOLADOS

Parámetro Kr	Parámetro K	Parámetro Cr (m/s)	Parámetro C (m/s)
1.998	2.352	3.380	5.304

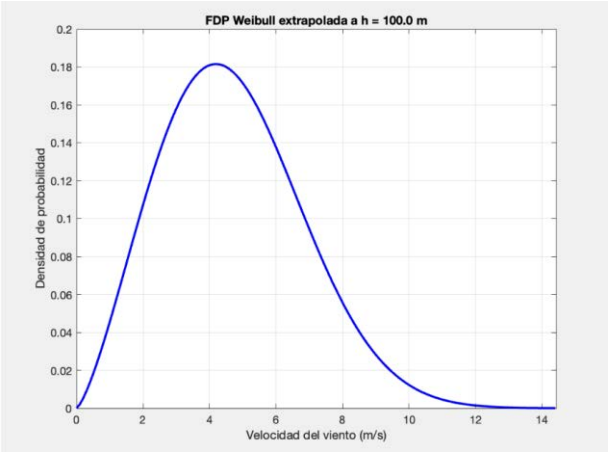


Fig. 6. Distribución de Weibull extrapolada a 100 m.

E. MODELO MATEMÁTICO DE VON KARMAN-VAN DER HOVEN

Se desarrollan las Ec. (9) Ec. (10) y Ec. (11) para generar una simulación estocástica del viento basada en la velocidad media observada en el análisis inicial en la Fig. 7. Esta simulación permite representar variaciones aleatorias realistas del recurso eólico durante un periodo de 200 horas.

El propósito de este modelo es utilizar la señal de viento generada como entrada dinámica para evaluar el comportamiento de un aerogenerador ante fluctuaciones del recurso, que pueden afectar su operación en estado estable y transitorio. Y se busca estimar el potencial energético bajo condiciones futuras más realistas y analizar la respuesta del sistema ante eventos típicos de variabilidad eólica.

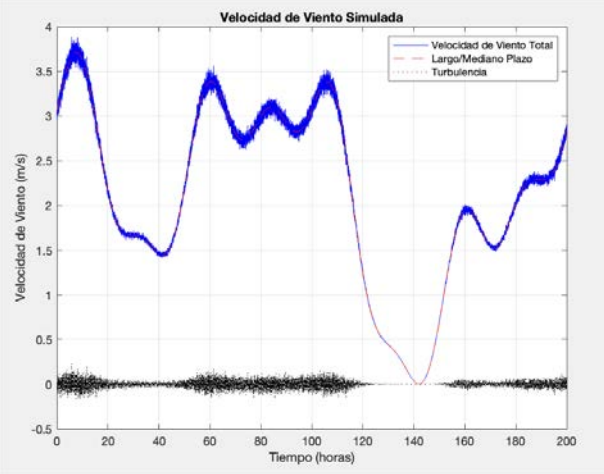


Fig. 7. Velocidad de viento simulada con Von Karman-Van der Hoven.

F. HORAS SOL PICO

Se utiliza la Ec. (9) para determinar las curvas mensuales de recurso solar mediante Horas Sol Pico y permiten analizar las diferencias en irradiación mensual en horas específicas en la Fig. 8. Donde los meses con mayor variabilidad es julio en la Fig. 8 (g) y septiembre en la Fig. 8 (i) los cuales corresponden a la temporada de lluvias de la ciudad de Saltillo [11].

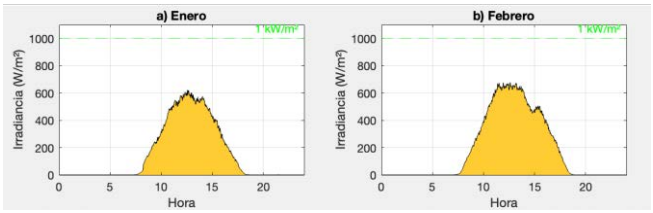


Fig. 8. (a) y (b). Curva mensual de Horas Sol Pico Enero-Febrero.

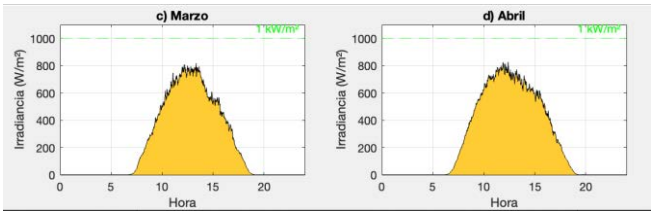


Fig. 8. (c) y (d). Curva mensual de Horas Sol Pico Marzo-Abril.

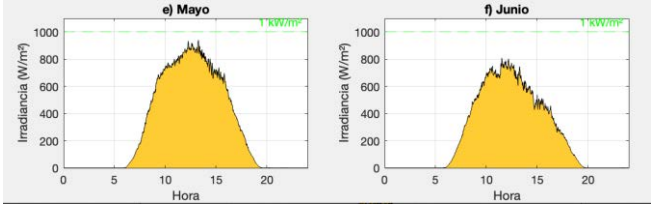


Fig. 8. (e) y (f). Curva mensual de Horas Sol Pico Mayo-Junio.

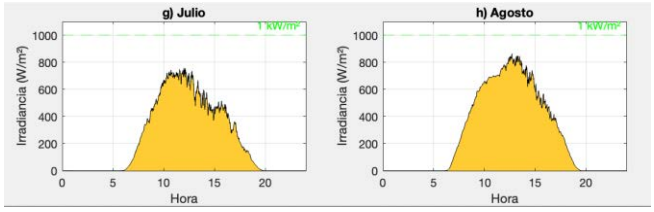


Fig. 8. (g) y (h). Curva mensual de Horas Sol Pico Julio-Agosto.

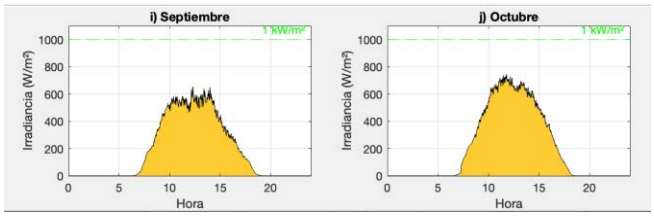


Fig. 8. (i) y (j). Curva mensual de Horas Sol Pico Septiembre-Octubre.

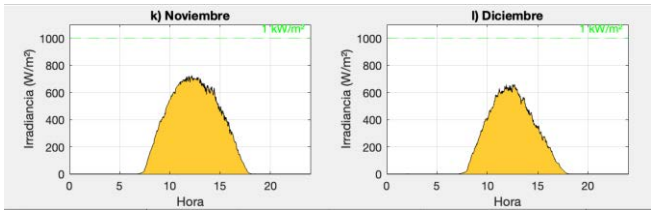


Fig. 8. (k) y (l). Curva mensual de Horas Sol Pico Noviembre-Diciembre.

En la Fig. 9 esta el resumen mensual de Horas Sol Pico, en el cual se establecen los meses de mayo y agosto con la mayor cantidad de HSP donde se puede considerar un promedio de 4 HSP anuales.

G. Curva anual de energía solar diaria

Se determina la curva anual de energía solar diaria y el potencial solar que tendría cada etapa del año en la Fig. 10 que coincide con los meses representados en la Fig. 9.

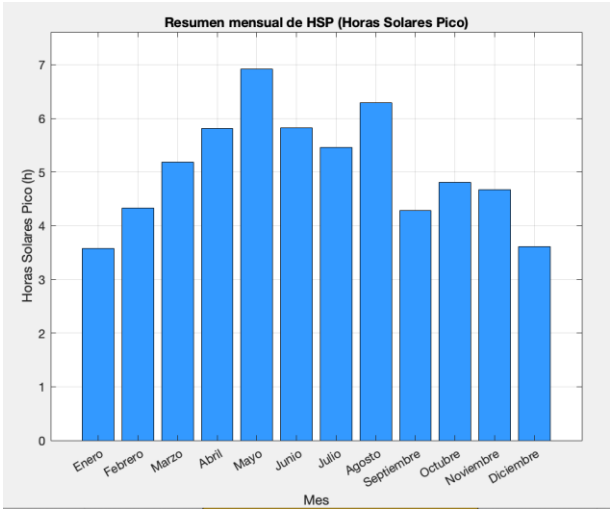


Fig. 9. Resumen anual por mes de Horas Sol Pico.

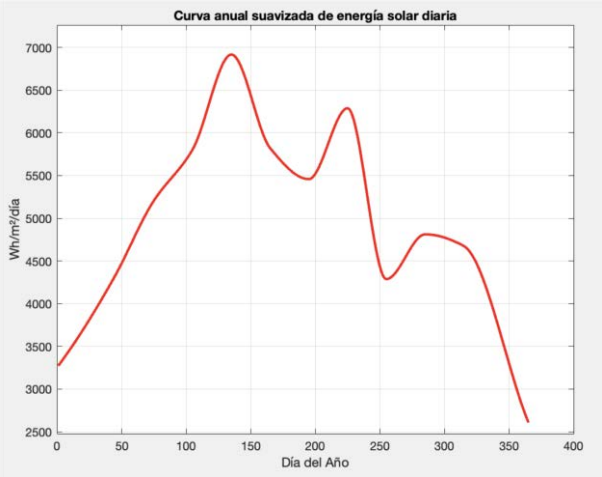


Fig. 10. Curva anual de energía solar diaria.

H. TRAYECTORIA SOLAR

La trayectoria solar en la Fig. 11 representa la variación estacional. En el solsticio de verano, el Sol tiene alturas mayores y un recorrido diario más largo, lo que aumenta la irradiancia disponible. En el solsticio de invierno la altura del Sol es menor y el tiempo de exposición solar disminuye.

Este análisis coincide con los resultados de irradiancia de la Fig. 8 y horas sol pico en la Fig. 9. Donde los periodos con trayectorias solares más altas corresponden a los meses con mayor energía solar disponible.

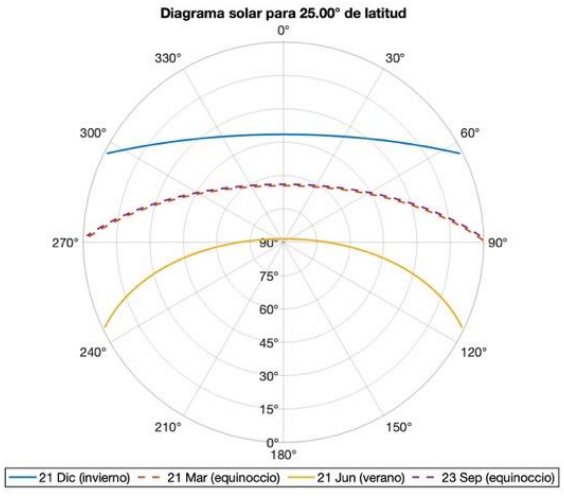


Fig. 11. Diagrama de trayectoria solar para Saltillo.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la caracterización de los recursos solar y eólico establecen una base sólida para el diseño de sistemas híbridos. A partir del análisis estadístico del recurso eólico, se define una velocidad media de 2.996 m/s a 20m, con un comportamiento modelado mediante la distribución de Weibull, lo que valida su uso para estimaciones de frecuencia y variabilidad del viento.

La extrapolación vertical de la velocidad media a 100m mediante la ley de Hellman alcanza 4.002 m/s, lo que representa una mejoría del 33.6%. Lo cual, resulta esencial en el dimensionamiento de aerogeneradores. Al igual, la generación de series sintéticas mediante los modelos espectrales de Von Karman y Van der Hoven permiten simular la variabilidad temporal del viento, y ofrecen una herramienta útil en escenarios con datos limitados.

En cuanto al recurso solar, el uso de datos minútales permite construir curvas promedio mensuales de horas sol pico (HSP), que oscilan entre < 4 h/día en invierno y > 6 h/día en verano y una estimación de disponibilidad anual de 1,803 HSP. El análisis del diagrama de trayectoria solar confirma alturas solares de 85° en verano y 45° en invierno. Esto permite optimizar los sistemas solares, con la inclinación adecuada del panel, sombras minimas y periodos de menor disponibilidad energética.

Ambos recursos muestran patrones estacionales, lo que refuerza la viabilidad de los sistemas híbridos como solución ante la intermitencia. Se concluye que una caracterización detallada y complementaria de los recursos renovables es fundamental para diseñar soluciones energéticas eficientes y resilientes en contextos con alta variabilidad climática.

REFERENCIAS

[1] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, y M. Jaszczur, "A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications", *Results Eng.*, vol. 20, p. 101621, dic. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101621.

[2] M. Santhosh, C. Venkaiah y D. M. Vinod Kumar, "Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: A review", Eng. Rep., vol. 2, n.º 6, may 2020. https://doi.org/10.1002/eng2.12178

[3] I. Tizgui, H. Bouzahir, F. E. Guezar, y B. Benaid, "Wind speed extrapolation and wind power assessment at different heights", en *2017 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, nov. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/EITech.2017.8255215.

[4] P. Megantoro, M. A. Syahbani, I. H. Sukmawan, S. D. Perkasa, y P. Vigneshwaran, "Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system", *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 11, núm. 5, Art. núm. 5, oct. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i5.3962.

[5] Atmosférico, UNAM Observatorio. "Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM." *Obtenido de Observatorio Atmosférico UNAM: http://www. ruoa. unam. mx/UNAM/index_UNAM. html* (2015).

[6] F. H. Mahmood, A. K. Resen y A. B. Khamees, "Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq", *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 79–87, feb 2020. doi: 10.1016/j.egyr.2019.10.021

[7] A. Chauhan y R. P. Saini, "Statistical analysis of wind speed data using Weibull distribution parameters," 2014 1st International Conference on Non-Conventional Energy (ICONCE 2014), Kalyani, India, 2014, pp. 160-163, doi: 10.1109/ICONCE.2014.6808712.

[8] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo and E. Ceanga, "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no. 4, pp. 523-529, Dec. 2002, doi: 10.1109/TEC.2002.805216.

[9] P. P. Vergara-Barrios, J. M. Rey-López, G. A. Osma-Pinto y G. Ordóñez-Plata, "Evaluación del potencial solar y eólico del campus

central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia", Revista UIS Ingenierías, vol. 13, no. 2, pp. 49–57, jul.-dic. 2014.

[10] J. J. Ontiveros, C. D. Ávalos, F. Loza, N. D. Galán y G. J. Rubio, "Evaluation and Design of Power Controller of Two-Axis Solar Tracking by PID and FL for a Photovoltaic Module", *Int. J. Photoenergy*, vol. 2020, pp. 1–13, jul 2020. doi:10.1155/2020/8813732

[11] M. D. Arauz-Solís, J. G. Salas-Alemán, M. S. Florencio-Martínez, E. Colunga-Urbina y I. M. De la Garza-Rodríguez, "Análisis de la composición de agua de lluvia en la ciudad de Saltillo, Coahuila", PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, vol. 11, pp. 121–125, 2023.

BIOGRAFÍAS



LIDIA M. FLORES-LÓPEZ Recibió el título de Ingeniera en Energías Renovables por la Universidad Tecnológica de Culiacán, en 2022. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias de la Ingeniería en el TecNM-ITC-CIIDETEC. Sus intereses de investigación incluyen la caracterización de recursos renovables, el diseño de sistemas híbridos de generación energética y el desarrollo de soluciones en el área de la electromovilidad.



GUILLERMO J. RUBIO ASTORGA Recibió el título de Ingeniero en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Culiacán, en 1998, en 2001 obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y el grado de Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Campus Guadalajara, México, en 2013. Sus líneas de investigación actuales incluyen el control no lineal de máquinas eléctricas.



NÉSTOR D. GALÁN HERNÁNDEZ Obtuvo el grado de Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Acapulco, México. La Maestría y el Doctorado en Ciencias en Ing. Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN CINVESTAV-Guadalajara, México. Sus líneas de investigación actuales incluyen máquinas eléctricas, sistemas eléctricos de potencia, generación distribuida con fuentes renovables y calidad de la energía.

Recibido 25 de junio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Modelado de un Transformador para la Detección de Fallas por Medio del Análisis de la Respuesta a la Frecuencia

EVELIN NAOMI GALLARDO-LICEA[1], ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA[1*], RUBÉN JARAMILLO VACÍO[2].
[1]Universidad de Guanajuato.
[2]LAPEM CFE.
*Autor de Correspondencia: gonzaleza@ugto.mx

RESUMEN El análisis del estado en que se encuentra los transformadores en la red eléctrica, es de vital importancia porque dependiendo de las características y el impacto que este tenga en el sistema, una avería en este puede representar una falla catastrófica en todo el sistema. La disponibilidad del servicio es clave para la continuidad del servicio, porque lo que los sistemas de monitoreo, detección de falla y estado en que se encuentra el transformador es primordial para poder establecer las condiciones de uso y tomar las acciones necesarias para asegurar su operación. Actualmente se ha estado desarrollando una prueba que consiste en el análisis de la condición física en la que se encuentra el transformador por medio de una prueba de la respuesta a la frecuencia del transformador, FRA (por sus siglas en inglés), en donde se analiza su estado, al hacer un barrido en frecuencia de todo el devanado y los componentes que lo conforman. En este trabajo se presenta un circuito de un transformador determinado a partir de las mediciones reales de todos sus componentes, se ha introducido estos parámetros para hacer la simulación del barrido en frecuencia por medio de MatLab; así como el desarrollo del equipo utilizado para poder hacer un estudio de diferentes tipos de fallas, realizando el comparativo entre el transformador sin falla y con diferentes tipos de falla.

PALABRAS CLAVE — Detección de fallas, respuesta a la frecuencia, circuito de transformador.

I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son un elemento clave dentro de un sistema eléctrico, ya que proporcionan el nivel de tensión requerido y la potencia necesaria. Estos son diseñados con diferentes componentes, como son: el núcleo de material ferromagnético, los embobinados primario y secundario, aislamientos para cada uno de estos embobinados y la transición para la conexión, ya sea por medio de boquillas o terminales, y todos estos pueden estar embebidos en un aceite dieléctrico.

Dada la diversidad de componentes que constituyen un transformador, puede variar su forma de operación debido a las diferentes formas de operación y/o eventos que se pueden presentar durante su vida útil. Estos eventos son de diversa indole como ambientales, contaminación externa, humedad, descargas atmosféricas o debido a la operación del sistema eléctrico en donde se encuentran instalados, como pueden ser: sobrecargas, impulsos por maniobras y corto circuitos, entre otros. Sus componentes, pueden verse afectados y si no se presenta una falla directamente ocasionada por cualquier de estos eventos, si ocasiona que se redusca la vida útil de algunos de sus componentes y en un momento dado conducir a una falla

Por tal motivo, el monitoreo del comportamiento en operación de un transformador viene a ser prioritario y crítico dependiendo de la potencia de este y las cargas que se encuentren conectadas; por lo que se han implementado una serie de técnicas de monitoreo [1-3] y herramientas de diagnóstico para evaluar las condiciones de operación en las que se encuentra el transformador.

Los transformadores fallan debido a razones como la degradación del aislamiento, el desplazamiento y la deformación mecánica, etc. Las fallas que pueden ocurrir incluyen pérdida de presión, sujeción, entre discos del devanado, en los devanados de alta tensión (AT), en las terminales de alta y baja tensión, desplazamiento axial o radial del devanado, por corriente de fuga y fallas por cortocircuito. Las tensiones de envejecimiento del transformador pueden causar deformación en los devanados [4]. Por lo tanto, las pruebas para detectar el desplazamiento y la deformación de los devanados son importantes para la operación segura de los transformadores. Un tipo de deformación que se produce en un transformador es la deformación mecánica de sus devanados. Por lo tanto, la integridad mecánica de un transformador es un aspecto importante que determina su estado. Un transformador con daños menores en los devanados puede permanecer en

funcionamiento, pero esto ocasiona una falla en el futuro. Además, una deformación en los devanados, inicialmente no intrusiva, provoca un cortocircuito después de un cierto período de operación [5].

Una de estas técnicas para determinar las condiciones en que se encuentra el equipo, es la prueba de FRA (Frequency Response Analysis), por sus siglas en inglés, que considera las condiciones iniciales del transformador al salir de fábrica y después de haber cumplido todas las pruebas de prototipo y de calidad, he irlas comparando con las condiciones que se van presentando durante su vida útil, detectando cualquier variación de las condiciones iniciales y que, dependiendo de estas variaciones, puede ser el indicativo de algún tipo de falla en el transformador. Con esta técnica de prueba, se pueden detectar anomalías tanto físicas como eléctricas en el transformador [6], [7].

II. FALLAS PRESENTES EN TRANSFORMADORES

En México, la estadística de fallas de transformadores de potencia de CFE, indica que el 49 % de las fallas se refieren a problemas de aislamiento en devanados; 26 % a boquillas; 10 % al cambiador de derivaciones; 3 % a explosiones con incendio, 2 % al núcleo y 10 % a otras causas [8], Fig. 1.

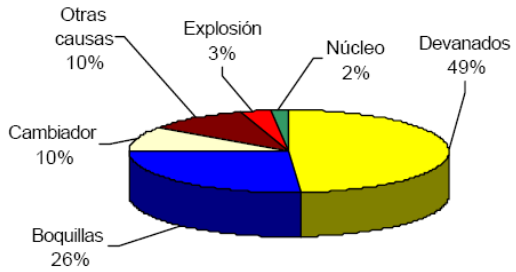


Fig. 1. Porcentaje de distribución de fallas en un transformador.

Básicamente se pueden presentar dos tipos de problemas que ocasionan fallas en los transformadores, una es debida a las condiciones de instalación, que se ven reflejadas en fallas mecánicas o estructurales, debidas a la operación del transformador y la otra a fallas eléctricas provocadas por eventos transitorios en el sistema en el cual se encuentra instalado.

Aunado a esto se presentan cambios en su estructura interna, debido a problemas que se presentan durante su traslado e instalación, ya que estos afectan de manera estructural el arreglo interno y/o externos del transformador. A continuación, se describen los tipos de fallas más representativos.

A. FALLAS MECÁNICAS

Este tipo de fallas se presentan debido a transitorios eléctricos que se ven reflejados en esfuerzos mecánicos y se deben principalmente a los conductores por los que circula una corriente, que a su vez se genera un campo magnético y esto genera una fuerza mecánica de acuerdo con la Ec. (1) [9].

$$\vec{F} = \vec{I}L \; X \; \vec{B} \tag{1}$$

En donde B es el vector de la densidad de flujo magnético (T), I es el vector de corriente (A) y L es la longitud del conductor (m). De donde se observa que el devanado está sujeto a una fuerza que depende de la corriente y la densidad de flujo. Sin embargo, B depende directamente de la corriente de acuerdo con:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{2}$$

En donde μ_0, es la permeabilidad de espacio libre y r es el radio del devanado (m).

De lo anterior se observa que la fuerza será proporcional al cuadrado de la corriente, por lo que en situaciones transitorias o de corto circuito, se presentan fuerzas mecánicas grandes en los devanados que afectan la estructura e integridad de este.

Básicamente se presentan tres tipos de falla:

1. Desplazamiento axial del devanado.
2. Desplazamiento radial del devanado.
3. Pandeo o doblez del devanado.

1. Desplazamiento axial del devanado

Esta falla se debe cuando en el transformador se presentan sobrecargas o corto circuito en donde se presentan grandes corrientes, provocando una fuerza axial o vertical entre los conductores provocando un desplazamiento y un aplastamiento de los devanados, que a la larga puede representar una falla. Este tipo de falla los podemos ver en la Fig. 2.



Fig. 2. Falla por aplastamiento debido a fuerzas axiales en un transformador

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

2. Desplazamiento radial del devanado

Debido a esfuerzos de corto circuito o transitorios, ya sean por descargas atmosféricas o impulsos de maniobra en la red eléctrica, y debido a las grandes corrientes presentes, se provocan desplazamientos en la dirección radial u horizontal del devanado, causando aplastamientos y/o contacto entre los conductores, tal y como se muestra en la Fig. 3.

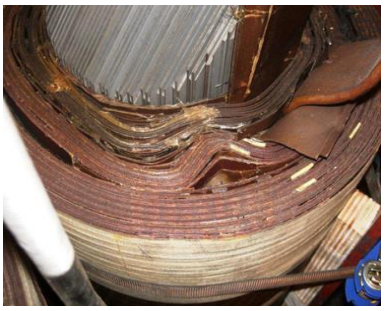


Fig. 3. Deformación radial del devanado secundario en un transformador.

3. Pandeo o doblez del devanado

Este defecto es provocado por una alta circulación de corriente, debido a un incremento transitorio, que es provocado por una sobrecarga o un corto circuito en la línea, esta oscilación se encuentra dentro de las frecuencias naturales y provoca una oscilación de las fuerzas sobre el devanado, sacando a este de su posición original, tal y como se muestra en la Fig. 4.

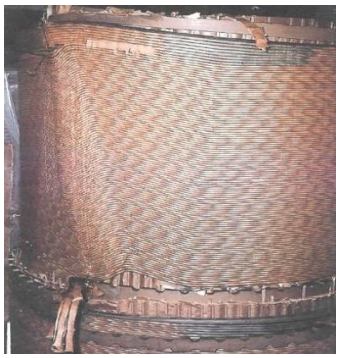


Fig. 4. Pandeo del devanado primario de un transformador de potencia.

B. FALLAS ELECTRICAS

Al igual que las fallas mecánicas son provocadas principalmente por fenómenos transitorios que son una combinación de una sobre tensión y una sobre corriente o únicamente una sobretensión, afectando directamente la estructura dieléctrica de los devanados, dejando al descubierto los conductores y/o eliminando las barreras dieléctricas entre los puntos más cercanos entre tierra y el conductor [10], [11], [12], básicamente se presentan dos tipos:

1. Corto circuito entre espiras

Se presenta principalmente cuando ocurre una sobretensión transitoria de gran magnitud y que afecta directamente al transformador; esta sobretensión puede ser debida a un impulso de rayo o un impulso de maniobra afectando directamente las primeras vueltas del devanado al recibir el impacto de la descarga, tal y como se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Corto circuito entre espiras en la parte superior del devanado primario de un transformador.

2. Falla a tierra

Debido a una sobretensión que degrada el dieléctrico provocando una ruptura y una conexión del conductor con algún punto de tierra, o por degradación del dieléctrico debido a las condiciones de operación del equipo, como el ingreso de humedad o sobrecalentamiento ocasionado pérdida del aislamiento y tener una conexión cercana a tierra.

En la Fig. 6, se observa la degradación del aislamiento cercano a un punto de tierra, observándose residuos blancos debido a la degradación del aislamiento del devanado.



Fig. 6. Falla a tierra del dieléctrico de un transformador.

III. CARACTERÍSTICA DE LA PRUEBA DE FRA

El análisis de respuesta en frecuencia consiste en la medición de la función de transferencia entre terminales del transformador, aplicando una señal periódica sinusoidal en un amplio rango de frecuencias SFRA o una señal tipo impulso IFRA. Esta medición proporciona una curva de respuesta en frecuencia única de cada transformador, que puede ser repetida en el tiempo, para que mediante comparación proporcione información útil en el diagnóstico de la condición del transformador.

Este se basa principalmente en el arreglo geométrico de los devanados del transformador y su interacción con los diferentes elementos que lo conforman. En general, el devanado de un transformador cuenta con componentes de resistencia R, inductancia L y capacitancia C que interactúan entre sí y con puntos de referencia a tierra como puede ser: el tanque, núcleo, boquillas e intercambiadores de derivaciones. Estas referencias se pueden representar por medio de elementos eléctricos por medio de circuitos RLC.

En la Fig. 7, se presenta los diversos componentes RLC de un devanado de un transformador y la referencia con respecto a los diferentes elementos capacitivos contra el tanque y el núcleo, así como la capacitancia entre espiras del devanado [10].

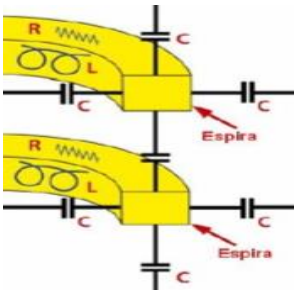


Fig. 7. Circuito RLC del devanado de un transformador.

En donde el análisis FRA, se realiza con la comparación de la curva obtenida cuando el transformador ha salido de fabrica en condiciones óptimas, comparándola con la o las curvas obtenidas a través del tiempo. En donde cualquier variación de estas curvas con respecto a una variación en la parte estructural o la parte eléctrica del transformador representaría una falla [13], [14].

A. MODELO IMPLEMENTADO

Se consideró un modelo con las principales características dimensionales y eléctricas del transformador, considerando las siguientes variables que se describen en la Tabla I.

En el caso del devanado secundario, se toman en cuenta los mismos parámetros que para el devanado primario considerando únicamente la capacitancia del devanado con respecto al núcleo y una capacitancia de acoplamiento entre el devanado primario y secundario (C_{DS}), la descripción de estos componentes se muestra en la Tabla II.

TABLA I. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL MODELO DEVANADO PRIMARIO

Parámetro	Descripción
R_{D1}	Resistencia Devanado (serie)
L_{D1}	Inductancia Devanado (serie)
C_{D1}	Capacitancia Devanado (paralelo)
C_{T1}	Capacitancia Devanado vs Tanque (paralelo)

TABLA II. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL MODELO DEVANADO SECUNDARIO.

Parámetro	Descripción
R_{D2}	Resistencia Devanado (serie)
L_{D2}	Inductancia Devanado (serie)
C_{D2}	Capacitancia Devanado (paralelo)
C_{N2}	Capacitancia Devanado vs Tanque (paralelo)
C_{DS}	Capacitancia devanado primario vs devanado secundario (serie)

B. CIRCUITO ELÉCTRICO

La representación esquemática del circuito considerado para el análisis se muestra en la Fig. 8, en donde se muestra el arreglo para cada uno de los elementos considerados. La descripción de cada uno de los elementos es de acuerdo con la Tabla I y Tabla II.

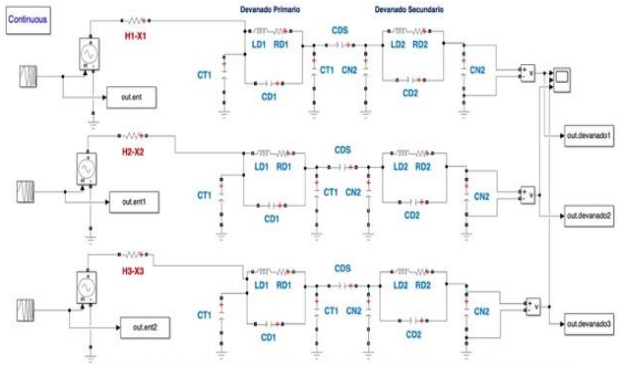


Fig. 8. Circuito eléctrico empleado en el modelado del transformador

En donde se emplearon las características del devanado H_N, del transformador (R_D, L_D, C_D) y su interacción con el tanque (C_T), el devanado secundario X_N, se tomaron los mismos parámetros que en devanado primario y se consideró la interacción de este contra el núcleo (C_N); adicionalmente a esto se consideró el acoplamiento capacitivo que existe entre el devanado primario y secundario (C_{DS}), con lo que se completó el modelo físico del transformador, por medio de un circuito eléctrico.

IV. IMPLEMENTACIÓN EN LABORATORIO

Para poder validar el circuito propuesto, se utilizó un transformador de distribución del tipo seco de 5 kVA, con una conexión Δ-Y, a 240 V en el primario y 100 /58 V en el secundario, con un 2.1 %Z. En donde se realizó la desconexión de cada una de las fases, con el objetivo de poder medir los parámetros individualmente sin interferencia de las otras fases y posteriormente, se realizaron modificaciones físicas para simular las fallas de Corto Circuito entre espiras (*CC*), falla a tierra, pandeo de los devanados contra el tanque y contra el núcleo, para cada una de las fases.

A. CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

Cuando se presenta una falla de corto circuito entre espiras, el devanado tiene una reducción del número de vueltas, lo que se ve reflejado en el cambio de la resistencia (R_D), la inductancia (L_D) y la capacitancia (C_D), afectando también la relación de transformación y, por ende, se presentará una sobre carga en el devanado afectado.

Para llevar a cabo esto se modificaron ciertos aspectos de cada elemento del transformador, realizando el CC, en cada una de las fases del lado de alta (H_n), por facilidad de acceso, descubriendo cada una de las fases y soldando alambres para poder hacer el corto circuito entre espiras al reducir el número de vueltas en cada devanado.

B. FALLA A TIERRA

Para este caso, se consideró que una sección del devanado pudiera llegar a hacer contacto con algún elemento que se encontrara conectado a tierra, por lo que, para simular esta falla, se conectó por medio de un cable, las espiras descubiertas de H_1 contra algún elemento de tierra del tanque, esto por la facilidad de poder acceder únicamente al devanado primario del transformador.

En la Fig. 9, se observan las modificaciones realizadas al transformador, con la colocación de los electrodos en CC y las modificaciones realizadas a cada una de las fases, estas modificaciones fueron conectadas a una caja de conexiones con interruptores para activar o desactivar las fallas que se pueden simular en el transformador.



Fig. 9. Modificaciones realizadas en el devanado para la simulación de las fallas.

C. PANDEO DEL DEVANADO

Para este problema se pueden presentar dos opciones, una del pandeo del devanado primario contra el tanque del transformador, y otra del pandeo de los devanados de cada una de las fases contra sí mismas, provocando una inclinación y acercamiento, ya sea con la otra fase o contra el tanque. Para simular esta falla, se realizó la colocación de un electrodo en el aislamiento y entre cada fase simulando la falla con la conexión del electrodo con un punto de tierra, provocando el acercamiento del devanado contra tierra.

D. TRANSFORMADOR DE PRUEBA

Para el control de estas modificaciones, todas las conexiones se reunieron en una caja de conexiones con interruptores y bornes de conexión para poder simular cada una de las fallas, estas fallas se pueden quitar y poner con la simple operación de los interruptores de acuerdo con el tipo de falla que se quiera analizar, y con la desconexión de esta, se puede realizar el comparativo de cada uno de los elementos para ver el comportamiento en situación de falla y sin falla.



Fig. 10. Bornes de conexión y caja para la activación de las fallas.

De la Fig. 10, se observan las cajas de bornes y de interruptores, siendo la parte superior la caja de bornes para la medición de los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia (RLC) de cada uno de los elementos del transformador, y en la parte inferior se encuentran los interruptores para la activación de los diferentes tipos de falla en el transformador.

Para la determinación de cada uno de los parámetros de los diferentes componentes del transformador, ya sea con falla y sin falla, se hizo la medición con un puente RLC de la marca AGILENT modelo E4980A, con un rango de medición de 20 Hz a 1 MHz, y dependiendo del tipo de falla se conecta entre las terminales de H_n, X_n, y tierra, tal y como se observa en la Fig. 11.

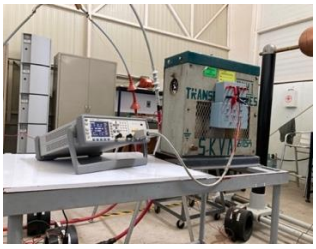


Fig. 11. Medición de los parámetros con el puente RLC

Las mediciones se realizaron para cada una de las fases, en donde se determinaron los valores RLC de cada devanado, considerando los parámetros de sin falla y con falla (CC), para cada una de las de las piernas del transformador (H-X), se consideró la capacitancia entre ellas y la referida a tierra, en el caso de H_n, se considera la capacitancia C_T, contra el tanque y en el caso de X_n, se consideró la capacitancia C_N, contra el núcleo.

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

Un ejemplo de los valores medidos en el transformador sin falla y con falla se muestran en la Tabla III, para la fase 1 ($H_1 – X_1$).

TABLA III. PARÁMETROS MEDIDOS PARA LA FASE 1

Parámetro	Sin Falla	Con Falla
H_1 R_D	1.09 Ω	1.021 Ω
H_1 C_D	469.81 nF	469.81 nF
H_1 L_D	957.98 µH	769.99 µH
H_1 C_T	164.02 pF	200.72 pF
X_1 R_D	111.07 Ω	--
X_1 C_D	462.35 nF	--
X_1 L_D	51.61 µH	--
X_1 C_N	194.40 pF	233.28 pF

La capacitancia C_{DS} entre $H_1 – X_1$ se encontró en un valor de 225.47 pF.

V. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se realizaron las simulaciones del comportamiento y la interacción de los tres devanados entre sí con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas de acuerdo con la sección IV, introduciendo los valores y analizando la respuesta a la frecuencia mediante MatLab.

La simulación de la falla en corto circuito del devanado primario de la fase 2 y la simulación de la falla por pandeo del devanado secundario contra el núcleo, observándose variaciones con respecto a la gráfica sin falla.

A. SIMULACIÓN DE LOS TRES DEVANADOS

Se realizó para conocer la interacción de los tres devanados entre sí y su comportamiento general en el circuito del transformador, ya que las mediciones realizadas muestran pequeñas diferencias entre cada devanado. La simulación obtenida de acuerdo con el circuito de la Fig. 8, se muestra en la Fig. 12.

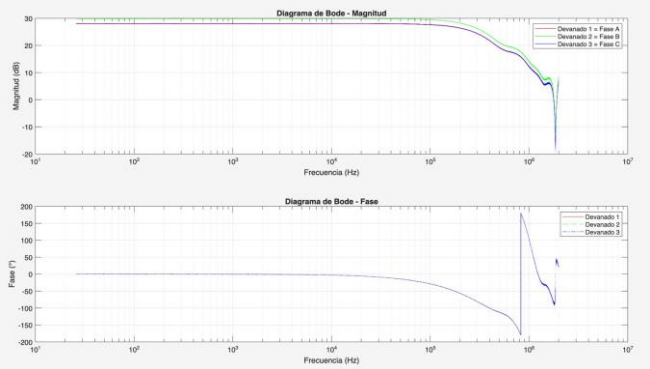


Fig. 12. Simulación de los tres devanados del transformador.

En la Fig. 12 se observa la simulación de la magnitud y la fase de los tres devanados, en su respuesta a la frecuencia. Observándose diferencia entre el devanado 2, respecto a los otros dos devanados, esto es debido que existe una interacción capacitiva entre los devanados de los extremos (1 y 3), con respecto al devanado central; analizando la parte de la fase se observa que los tres devanados se encuentran en fase entre si al tener las características similares en cuanto a su construcción, como son: relación de transformación y dimensiones generales de cada uno de los devanados primario y secundario.

B. CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

El corto circuito entre espiras únicamente se realizó en el devanado primario de acuerdo con los elementos mencionados y para esta simulación únicamente se consideró el devanado H_2 como ejemplo y de acuerdo con el circuito de la Fig. 13, en donde únicamente se consideró el devanado primario.

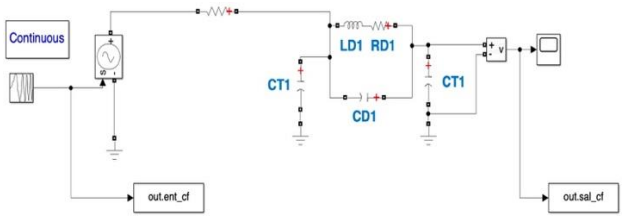


Fig. 13. Circuito de prueba para la evaluación de CC en H2

Realizando la comparación ambas curvas sin la falla y con la falla, en donde se tiene resultados evidentes del daño presente, tal y como se muestran en la Fig. 14.

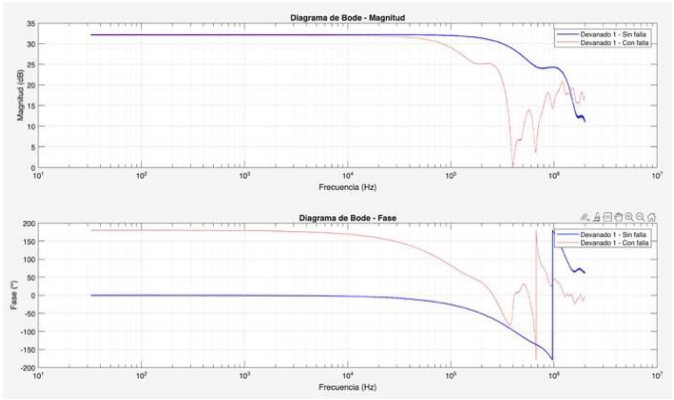


Fig. 14. Simulación del corto circuito entre espiras en H2

La Fig. 14 muestra los resultados obtenidos de la simulación, observándose los cambios tanto en la magnitud como la frecuencia de aparición del estado sin falla y con falla. Siendo la frecuencia de falla de CC en este devanado del orden de 700 kHz, para el cambio de fase con la falla y del 1 MHz, para el cambio de fase sin la falla. Esto se observa

también en el pico sobre la magnitud de la falla que se presenta a los 400 kHz.

C. PANDEO DEL DEVANADO

En este caso como el tipo de falla no es tan evidente y no se simula un CC en el devanado, únicamente existe un cambio estructural en él, lo que ocasiona que cambie la magnitud, pero no la frecuencia a la que se presenta. En la Fig. 15, se presenta la simulación para cada una de las fases considerando la falla en el devanado secundario X_N.

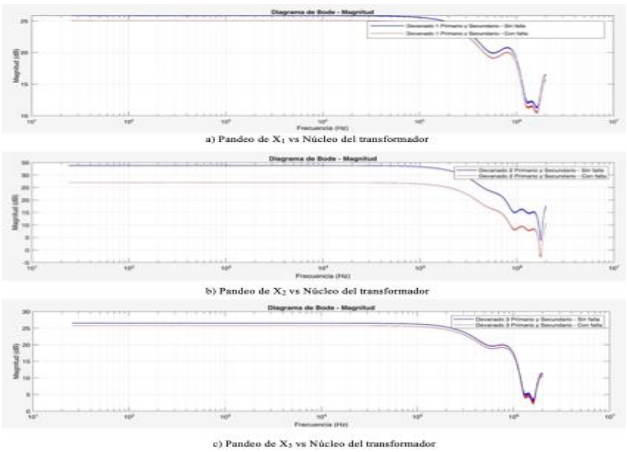


Fig. 15. Pandeo del devanado Secundario vs Núcleo del transformador

En la Fig. 15, se observan las diferentes curvas para cada una de las fases del secundario del transformador; hay que considerar que, de acuerdo con la construcción del transformador, cada fase se encuentra en una de las piernas del núcleo, por lo que las diferencias de construcción y la interacción de las capacitancias entre devanados se ve reflejada en las curvas para cada elemento.

VI. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado para el análisis de fallas en transformadores demuestra que se pueden detectar diferentes tipos de fallas, con respecto a la situación sin falla y con falla, que dependiendo del tipo de falla se van a presentar los cambios en la magnitud y la frecuencia en donde se presentan. El modelo es similar al modelo utilizado en [14], por lo que se espera que las pruebas que se realicen con un equipo especializado para FRA sean similares en cuanto a su comportamiento, necesariamente en la magnitud, ya que dependerá de la calibración y especificaciones del equipo de medición, que es un parámetro importante en el desarrollo de la prueba.

El equipo desarrollado para la simulación y medición de los diferentes tipos de fallas en transformadores ha resultado de gran utilidad, ya que permite la comprensión, control y medición de los diferentes tipos de fallas que se presentan en un transformador, pudiéndose realizar diferentes de fallas en el transformador.

REFERENCIAS

[1] Beheshti Asl, M., Fofana, I., Meghnefi, F., Brahami, Y., & Souza, J. P. D. C. (2025). A comprehensive review of transformer winding diagnostics: Integrating frequency response analysis with machine learning approaches. *Energies*, *18*(5), 1209.
[2] Peñafiel, S., Otero, P., & Pérez, F. (2023). Diagnóstico del Estado de Transformadores de Distribución Mediante el Ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia. *Revista Técnica Energía*, *20*(1), 26-32.
[3] S. Alsuhaibani, et all, "A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics"**,** *Energies* 2016, 9(11), 879.
[4] Hosseini, A., Abbasi, A., Abbasi, A. R., & Mahmoudi, M. (2025). Transformer windings defects identification using frequency response analysis and advanced data visualization techniques. *Scientific Reports*, *15*(1), 40595.
[5] Pérez Hernández, R., & Hernández Areu, O. (2024). Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia. *Ingeniería Energética*, *45*(1), 25-33.
[6] Razzaq, A. S. A., Yousof, M. F. M., Al-Ameri, S. M., Talib, M. A., & Mshkil, A. J. (2022). Interpretation of inter-turn fault in transformer winding using turns ratio test and frequency response analysis. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, *11*(3), 218-225.
[7] Hernández Areu, O., García del Sol, D., Díaz Alfonso, E., & Olivares Galván, J. C. (2022). Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados. *Ingeniería Energética*, *43*(2), 119-128.
[8] Estadísticas de falla de transformadores de potencia, reactores de potencia y transformadores de instrumentos 2018-2023, CFE Coordinación de Transmisión, Subdirección de Transmisión, Mayo 2024.
[9] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. *Transformer Engineering: Design and Practice*, 1st ed.; Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 2004.
[10] Mahvi, M., Behjat, V., & Mohseni, H. (2020). Analysis and interpretation of power auto-transformer winding axial displacement and radial deformation using frequency response analysis. *Engineering Failure Analysis*, *113*, 104549.
[11] Li, Z., He, Y., Xing, Z., & Chen, M. (2023). Minor fault diagnosis of transformer winding using polar plot based on frequency response analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *152*, 109173.
[12] Rojas, C. P., & Martínez, S. G. (2021). Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia. *Ciencia Nicolaita*, (82).
[13] Zhang, Z. (2024). Derivation of transformer winding equivalent circuit by employing the transfer function obtained from frequency response analysis data. *IET Electric Power Applications*, *18*(7), 826-840.
[14] IEEE C57.149-2024, *Guide for the applicaction and interpretation of frequency response analysis for oil-inmersed transformers*. Feb 2025.

BIOGRAFÍAS



EVELYN NAOMI GALLARDO LICEA Estudiante de Ingeniería en Sistemas Computacionales con interés en el desarrollo de software y soluciones tecnológicas. Colaborador en el proyecto de detección de fallas en transformadores trifásicos mediante análisis de respuesta en frecuencia (FRA). Manejo herramientas de desarrollo web, MATLAB, Simulink, C/C++ y Python.



ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro. Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Salamanca México. Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España, en diseño y construcción de motores superconductores. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos, el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos y la confiabilidad en la red eléctrica.



RUBÉN JARAMILLO VACIO Recibió el grado de ingeniero electromecánico en ITESI (2002), grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la UASLP (2005), grado de Maestría en Ingeniería Administrativa y Calidad en la ULSB (2010). Doctor en Ciencias en el CIATEC (Centro de Investigación de CONACYT) en 2015. Desde 2005 es ingeniero de pruebas en CFE-LAPEM. Sus áreas de interés son la evaluación y diagnóstico de equipo primario, minería de datos, inteligencia artificial y teoría de aprendizaje competitivo.

Recibido 4 de julio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Evaluación y Validación Experimental del Modelo de Relé de Sobre Corriente de Tiempo Inverso 51 en EMTP-ATP

JOSÉ JESÚS CONTRERAS PERÉZ[2], JUAN MANUEL CANO GALLARDO[1], DANIEL PEÑA PÉREZ[2], OSVALDO RODRÍGUEZ VILLALÓN, LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA[1*]

[1]Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías.
[2]LAPEM.
*Autor de correspondencia: lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta la evaluación, simulación y validación de un modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso tipo 51 utilizando el software EMTP-ATP. El modelo es contrastado con resultados experimentales obtenidos mediante pruebas en un relé físico SEL-451, ampliamente utilizado en sistemas de protección modernos. Se emplean curvas IEC estándar para ajustar el comportamiento del relé virtual, simulando diversas condiciones de operación. Posteriormente, se realiza la configuración equivalente en el SEL-451, evaluando la correlación entre ambos resultados. Los resultados muestran una alta concordancia en los tiempos de operación, validando la capacidad de EMTP-ATP como plataforma efectiva para estudios de coordinación de protecciones. Este trabajo ofrece una base práctica para ingenieros en el diseño y prueba de esquemas de protección utilizando herramientas digitales y relés comerciales.

PALABRAS CLAVE — Protecciones, sobrecorriente, simulación EMT.

I. INTRODUCCIÓN

La protección de sistemas eléctricos es una función crítica para garantizar la continuidad del servicio, la integridad de los equipos y la seguridad de las personas. Dentro de las múltiples funciones de protección, la sobrecorriente temporizada cumple un rol esencial en redes de media y baja tensión, proporcionando una respuesta escalonada y coordinada frente a fallas. El relé tipo 51, basado en una lógica de tiempo inverso, es ampliamente utilizado para garantizar selectividad, permitiendo que las fallas sean despejadas por el dispositivo más cercano antes de que afecten al sistema completo [1], [2]. Su versatilidad y aplicabilidad lo han convertido en una herramienta estándar para la protección radial y escalonada en sistemas eléctricos industriales y de distribución.

El desarrollo tecnológico ha llevado a que gran parte de los estudios de protección se trasladen a entornos digitales de simulación, donde se pueden modelar, analizar y validar esquemas de protección sin los riesgos inherentes a las pruebas físicas. Diversas plataformas permiten modelar la operación de relés de protección, tanto mediante ecuaciones lógicas como mediante bloques funcionales predefinidos. El modelado de estos dispositivos debe considerar no solo los parámetros eléctricos, sino también las curvas de disparo temporizadas normalizadas, como las definidas en la norma IEC 60255-151 [3]. La simulación de protecciones bajo condiciones de transitorios electromagnéticos es particularmente importante, ya que estos eventos reflejan el comportamiento más exigente y crítico de los sistemas eléctricos [4], [5], [6], [7].

El software EMTP-ATP se ha establecido como una herramienta fundamental para el análisis detallado de transitorios electromagnéticos y la simulación de sistemas de protección [8]. Su capacidad para representar fenómenos dinámicos complejos, como fallas, saturaciones y disparos de relés, lo ha convertido en una referencia tanto en ambientes académicos como industriales [9], [10]. Diversos estudios han demostrado su aplicabilidad para modelar dispositivos de protección con alta precisión, así como para evaluar propuestas de esquemas de protección [11], [12], [13]. En [14] modelaron un relé de distancia y validaron su comportamiento mediante pruebas de laboratorio, lo que demostró la capacidad del entorno EMTP para reproducir fielmente la respuesta transitoria de protecciones digitales. De forma similar, en [15] desarrollaron una metodología de pruebas de relés basada en transitorios generados en EMTP, destacando su potencial para evitar errores de diseño en etapas tempranas. En [14] propusieron una metodología para crear y validar modelos de protección eléctrica en ATP, con aplicaciones prácticas en relés de sobrecorriente. En [16], se integró EMTP con pruebas físicas end-to-end para verificar

la lógica de operación de relés. Además, estudios como los presentados en [17] y [18] profundizan en la simulación de eventos reales y su correlación con la lógica de disparo en relés comerciales, reafirmando que EMTP-ATP permite modelar, simular y validar protecciones con un alto grado de confiabilidad, convirtiéndose así en una plataforma idónea para estudios como el que se plantea en este trabajo.

En este trabajo se aborda el modelado y simulación del relé 51 de tiempo inverso en EMTP-ATP, configurado con parámetros definidos por la norma IEC. Posteriormente, se realiza la validación experimental mediante un banco de pruebas con un relé físico SEL-451, el cual permite implementar curvas IEC similares y registrar los tiempos de operación bajo condiciones equivalentes. Esta comparación busca comprobar la fidelidad del modelo simulado respecto al dispositivo real, aportando evidencia empírica sobre la confiabilidad del entorno EMTP-ATP para el diseño y análisis de sistemas de protección.

II. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO

El relé 51 responde ante sobrecorrientes cuya magnitud supera un umbral de disparo, con un tiempo de actuación que varía en función inversa de la magnitud de la corriente. Según la norma IEC 60255-151 [3], las curvas normalizadas más utilizadas para estos relés son:

- Curva inversa estándar (Standard Inverse)
- Curva muy inversa (Very Inverse)
- Curva extremadamente inversa (Extremely Inverse)

La expresión general definida por la IEC 60255-151 para estas curvas es la siguiente

$$t = TMS\left(\frac{K}{\left(\frac{I}{Ip}\right)^{\alpha}-1}+c\right) \quad (1)$$

Donde, TMS es el ajuste de multiplicador de tiempo, t es el tiempo de operación, I es la corriente medida, Ip es la corriente de disparo ajustada en el relé, K, α y c son constantes que dependen del tipo de curva seleccionada.

En la Fig. 1 se presenta una tabla con los valores que conforman las diversas curvas de la IEC 60255-151 para la protección 51 de tiempo inverso.

Curve type	Operating time $t(G)=TMS\left[\frac{k}{\left(\frac{G}{G_S}\right)^{\alpha}-1}+c\right]$			Reset time $t_r(G)=TMS\left(\frac{t_r}{1-\left(\frac{G}{G_S}\right)^{\alpha}}\right)$		Commonly used name
	k s	c s	α	t_r s	α	
A	0,14	0	0,02	*	*	Inverse
B	13,5	0	1	*	*	Very inverse
C	80	0	2	*	*	Extremely inverse
D	0,0515	0,1140	0,02	4,85	2	IEEE Moderately inverse
E	19,61	0,491	2	21,6	2	IEEE Very inverse
F	28,2	0,1217	2	29,1	2	IEEE Extremely inverse
* For curves A, B and C, the manufacturer shall declare if dependent time reset characteristic is implemented and provide the appropriate information.						

Fig. 1. Parámetros de las curvas IEC 60255-151 [19].

III. MODELADO PROTECCIÓN 51 en EMTP-ATP

El modelado de la protección 51 de sobrecorriente de tiempo inverso en el software EMTP-ATP comprende el uso de dos bloques, uno de obtención de valores RMS de corriente (ABC2RMS) y otro de implementación de la curva respectiva (W1RELAY51I). Los elementos mencionados se presentan en la Fig. 2, teniendo como entrada la medición se las señales de corriente (Iabc) y como salida la señal de disparo del relé (Trip).

Los bloques de medición RMS y de protección 51 inversa son implementados mediante la herramienta MODEL en el software. La descripción de los bloques ABC2RMS y W1RELAY51I se muestran en las Fig. 3 y 4, donde se pueden identificar los algoritmos implementados en EMTP-ATP.

El bloque ABC2RMS toma valores de la señal de entrada para calcular el respectivo valor RMS, debido indicar como parámetro de entrada la frecuencia fundamental de la medición y la frecuencia de muestreo con la cual se tomarán los valores para el cálculo.

EL bloque W1RELAY51I toma los valores RMS de la señal y los compara con la respectiva curva para generar la señal de disparo. Para este bloque se configuran las constantes de la curva a utilizar, y se tiene como salida la señal de disparo. Adicionalmente, este bloque presenta una herramienta para graficas las respuestas de una forma que favorezca la coordinación de protecciones, lo cual se explorará en la sección de resultados.

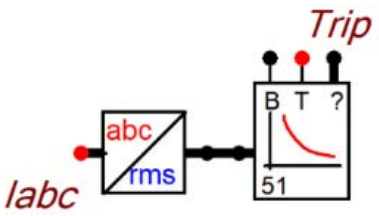


Fig. 2. Bloques para implementación de protección 51 en EMTP-ATP.

```
MODEL ABC2RMS
comment-------------------------------------------------------------------
Calculates the true rms value of a 3-phase signal based on integration.
SampleFreq frequency should be whole multiple of power frequency.
-------------------------------------------------------------------endcomment
DATA
  freq          -- base frequency
  xrms_ini {dflt:-1} -- initial rms value
  scale {dflt:1} --multiply output by this number
  SampleFreq    -- sample frequency in Hz
INPUT
  x[1..3]       -- monitored signal
OUTPUT
  xrms[1..3]    -- rms value of monitored signal
VAR
  xrms[1..3]
  x2[1..3]      -- internal, x*x
  ix2[1..3]     -- internal, integral of x2
  period        -- 1/freq
  n
TIMESTEP min:recip(SampleFreq) --this restricts local timestep to avoid overflow
DELAY CELLS(ix2[1..3]): recip(freq*timestep) +2
INIT
  period       := recip(freq)
  histdef(ix2[1..3]) := 0
  integral(x2[1..3]) := 0
  IF xrms ini <0 THEN xrms[1..3]:=0 ELSE xrms[1..3]:=xrms ini ENDIF
ENDINIT
EXEC
  FOR n:=1 TO 3 DO
    x2[n]  := x[n]*x[n]
    ix2[n] := integral(x2[n])
    IF t>period THEN
      xrms[n] := sqrt((ix2[n] - delay(ix2[n], period))*freq)*scale
    ENDIF
  ENDFOR
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Fig. 3. Descripción en MODEL de ABC2RMS.

El bloque W1RELAY51I toma los valores.

```
MODEL W1RELAY51I
comment-------------------------------------------------------------------
  Inverse time overcurrent relay.
  ts= D*(A/((Irms/Is)^Q -1 )+B)
-------------------------------------------------------------endcomment
DATA Is   --Starting current
     D    --time multiplier
     -- IEC:  NI    VI    EI   IEEE:    NI     VI     EI
     A  --  0.14  13.5  80.0        0.0515  19.61  28.20
     B  --    0     0     0        0.1140  0.491  0.1217
     Q  -- 0.02     1     2          0.02      2       2
     Tr --                         4.85    21.6    29.1
     DownSampl  -- Write out every DownSampl
     t_init     -- Time before relay starts sampling
     Idx        -- Unique identifier (managed by ATPDraw)
INPUT
  irms[1..3]
  Block {dflt:0}-- Blocking signal TRUE or 1 = Block
OUTPUT Trip
       Zone[1..3] --Shows which zone (0 or 1 here) trips in which phase (1..3)
VAR trip,Zone[1..3],ts[1..3],M,j,n
INIT
  trip:=1
  Zone[1..3]:=0
  ts[1..3]:=0
  j:=0
ENDINIT
EXEC
  if (t>t init) and (Block=FALSE)
  then
  FOR n:=1 TO 3 DO
    M:=ABS(Irms[n]*recip(Is))
    if M>1
    then
      ts[n]:=ts[n]+timestep
      if ts[n]>D*(A*recip(M**Q-1)+B)
      then
        Zone[n]:=1
      endif
    else
      ts[n]:=ts[n]-timestep
      if ts[n]<-D*Tr*recip(M**2-1)
      then
        ts[n]:=0
      endif
    endif
  ENDFOR
  trip:=not OR(Zone[1],Zone[2],Zone[3],not trip)
  if (j mod DownSampl) = 0
  then
    write('BEGIN WRITE @W1RELAY51I',round(Idx))                  --Do not modify
    write(Irms[1], ts[1], Irms[2], ts[2], Irms[3], ts[3], trip)  --Add multiple
    write('END WRITE @W1RELAY51I',round(Idx))                    --Do not modify
  endif
  j:=j+1
  endif

ENDEXEC
ENDMODEL
```

Fig. 4. Descripción en MODEL de W1RELAY51I.

IV. RESULTADOS

Para la evaluación del modelo se seleccionó una curva inversa tipo A, a la cual se le establecieron los parámetros para poder desarrollar la simulación y posteriormente la validación experimental. El desarrollo de la prueba de simulación y experimental corresponde con obtener varios puntos de operación a través de la inyección de señales de corriente de prueba, debiendo responder con la señal de disparo según lo indica la curva seleccionada.

En este trabajo, se consideró la curva expresada en (2), correspondiente al tipo inverso A. La representación gráfica de la curva se presenta en la Fig. 5, indicando los puntos que serán considerados para las pruebas 1 y 2 que se describirán a continuación.

$$t = 0.1\left(\frac{0.14}{\left(\frac{I}{Ip}\right)^{0.02}-1}+0\right) \tag{2}$$

La simulación del relé se realiza mediante la inyección de señales de corriente, lo cual se implementa con sistema de fuentes de corriente ideales las cuales son inyectadas directamente al relé. La implementación del sistema de prueba en EMTP-ATP se presenta en la Fig. 6, donde se hace uso de elementos TACS. Para la medición RMS de la corriente se establece una frecuencia de muestreo de 480 Hz, correspondiente a 8 veces la frecuencia fundamental. Se considera este parámetro que viene por defecto dentro del modelo ABC2RMS.

Para la simulación se consideran dos pruebas. Como prueba 1 se inyecta una corriente de 0.5 Arms seguido de 1 Arms, y como prueba 2, se inyecta una corriente de 0.5 Arms seguido de 3.5 Arms. Los resultados de las pruebas 1 y 2 mostrados a través de las señales temporales de corriente instantánea, corriente rms y señal de disparo Trip (negada) se tienen en las Fig. 7 y 8, donde se puede observar que en el tiempo de 0.3 s aparece el aumento en las señales de corriente, y transcurriendo un tiempo de 1.002 s y 0.352 s las señales de disparo se activas para las pruebas 1 y 2 respectivamente.

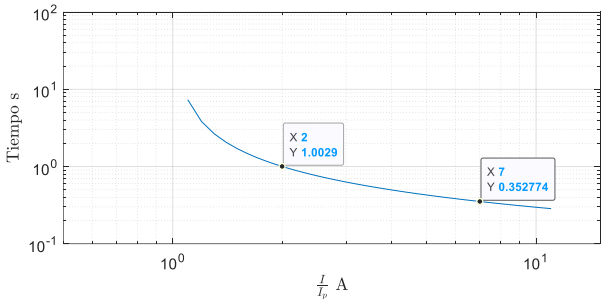


Fig. 5. Gráfica curva (2) en escala logarítmica.

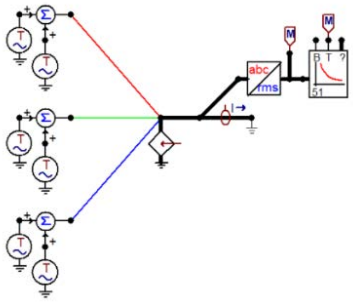


Fig. 6. Implementación en EMTP-ATP prueba del relé 51.

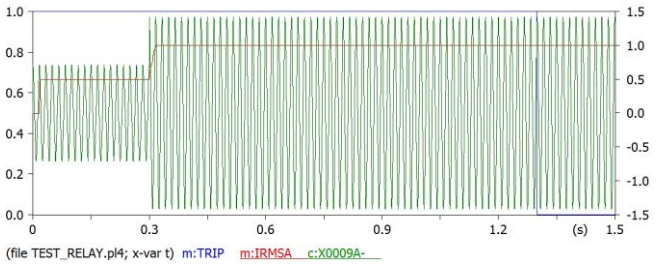


Fig. 7. Señales temporales prueba 1.

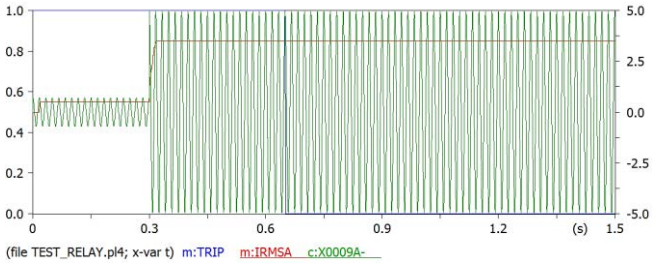
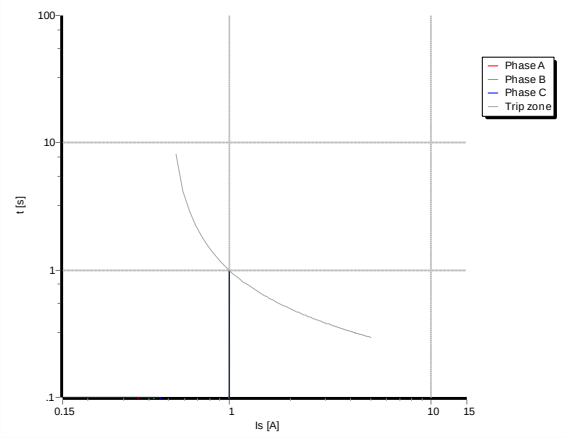


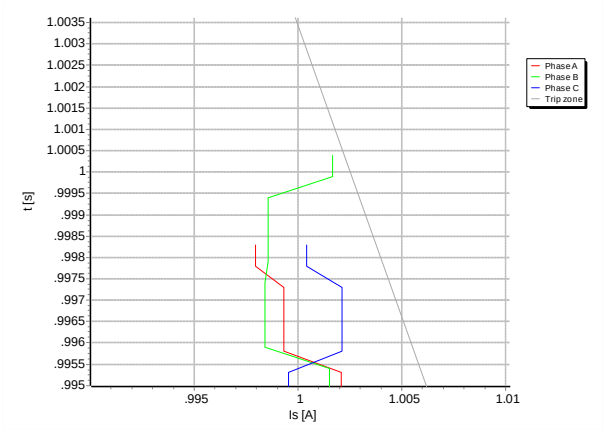
Fig. 8. Señales temporales prueba 2.

Adicionalmente, el bloque W12RELAY51I tiene una herramienta que permite observar de una forma más adecuada las señales del relé para el desarrollo de una coordinación de protecciones, teniendo así de las curvas registradas en las Fig. 9 y 10 para las pruebas 1 y 2 respectivamente. Según la Fig. 5, para la prueba 1 el disparo debería será de un tiempo de 1.0029 s, y para la prueba 2 de 0.352 s, teniendo de los resultados presentados en las Fig. 9 y 10 son tiempos de 1.002 s y 0.352 s, respectivamente. De este modo se puede notar que el comportamiento del sistema simulado respecto del teórico es adecuado.

Para la prueba experimental se hace uso del relé SEL 451[20] estableciendo las configuraciones para que la respuesta sea como la ecuación (2). Adicionalmente se utiliza el equipo JHS903 [21] para la inyección de señales de corriente en el relé que permitan validar su operación. El montaje de la prueba experimental se presenta en la Fig. 11.

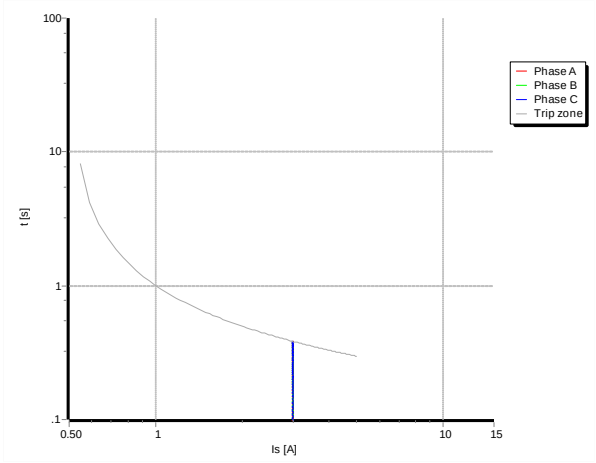


a)

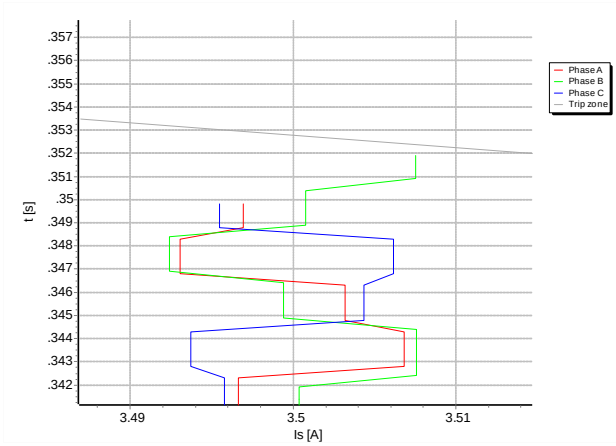


b)

Fig. 9. Curvas del bloque W1RELAY51I para la prueba 1, **a)** prueba completa y **b)** acercamiento.



a)



b)

Fig. 10. Curvas del bloque W1RELAY51I para la prueba 2, **a)** prueba completa y **b)** acercamiento.

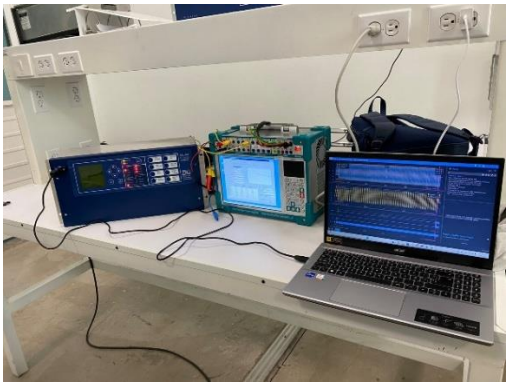


Fig. 11. Montaje experimental prueba relé SEL 451.

En el equipo JHS903 se realiza la configuración para la validación del relé mediante la aplicación de seis señales de prueba con valores de corriente desde 1 Arms hasta 3.5 Arms en pasos de 0.5 Arms. La configuración del equipo y resultado de la prueba se presenta en la Fig. 12, teniendo que el relé responde según lo establecido en las curvas.

De la validación experimental, se tiene que las pruebas No 1 y 6 de la Fig. 12, corresponden a las evaluaciones consideradas para la simulación. La respuesta del relé SEL-451 ante estas pruebas se muestra en la Fig. 13, cuyos resultados fueron obtenidos directamente desde el relé a través del software Accselerator QuickSet [22]. En éstos resultados se tienen los tiempos de disparo de 1.019 s y 0.359 s para las pruebas realizadas.

Finalmente, en la Tabla I se registran los resultados de las pruebas desarrolladas, teniendo que los tiempos teóricos y simulados presentan una gran similitud, mientras que los resultados experimentales, aunque difieren en mayor medida tienen un valor de error aceptable, validando así que el modelado del relé de protección 51 tiene un comportamiento adecuado según lo establece la curva teórica y los resultados experimentales.

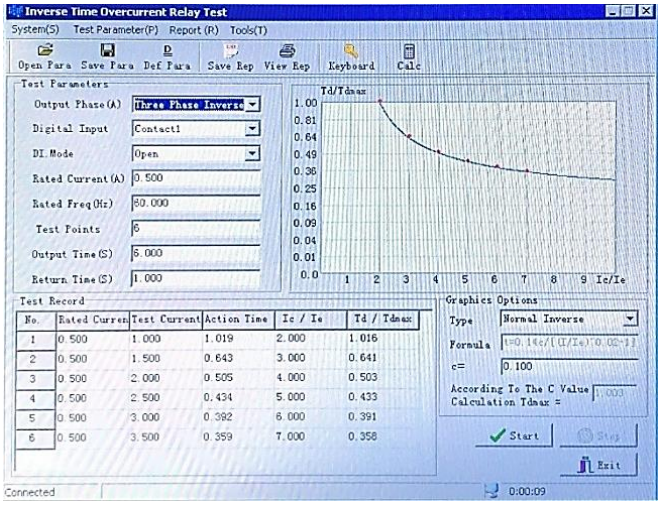
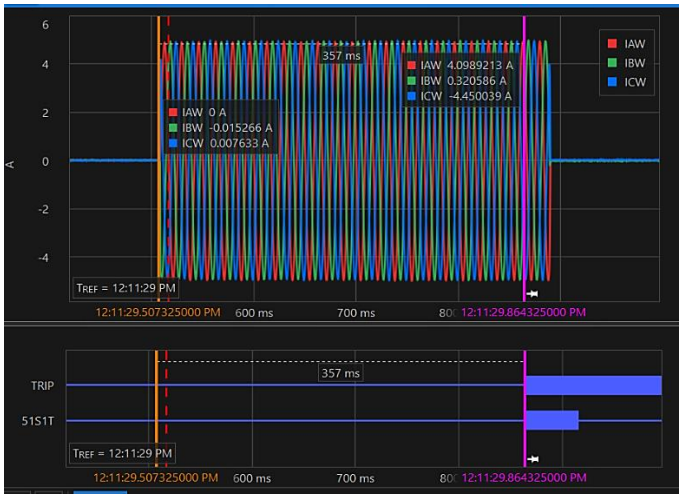
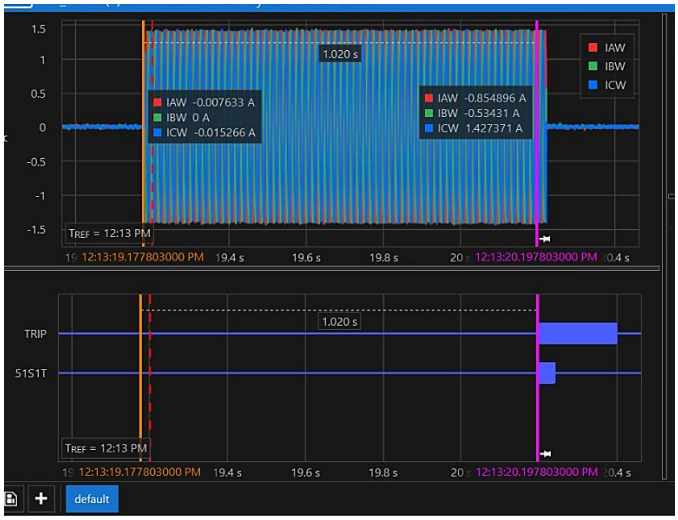


Fig. 12. Configuración y resultado de prueba en el equipo JHS903.



a)



b)

Fig. 13. Señales temporales relé SEL-451 prueba experimental, **a)** pruebas 1 y **b)** prueba 6.

TABLA I. RESULTADOS.

Corriente Arms	Tiempo disparo (s)		
I prueba	Teórico	Simulación	Experimental
1.0	1.0029	1.002	1.019 (1.6%)
3.5	0.352	0.352	0.359 (1.9%)

Aunque los resultados son adecuados, se deben desarrollar evaluaciones exhaustivas considerando elementos detallados tanto del modelado en EMTP-ATP como de los algoritmos y tiempo de muestreo en el equipo SEL-451

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el modeló del relé de sobrecorriente de tiempo inverso tipo 51 utilizando el software EMTP-ATP, siguiendo los parámetros definidos

por la norma IEC 60255-151. El modelo utilizado hace uso de los bloques funcionales ABC2RMS y W1RELAY51I, los cuales permitieron implementar las curvas de disparo y simular su comportamiento frente a distintos niveles de corriente.

La simulación computacional arrojó resultados altamente coherentes con la curva teórica esperada. Las pruebas realizadas en el entorno EMTP-ATP mostraron errores inferiores al 0.1%, validando la precisión del modelo desarrollado. En la validación experimental utilizando el relé SEL-451, los tiempos de disparo registrados estuvieron dentro de un margen de error del 1.6% al 1.9% respecto a los valores teóricos. Esta pequeña desviación se considera aceptable y puede atribuirse a tolerancias internas del dispositivo físico, tiempo de procesamiento del microcontrolador, o errores de muestreo del equipo de inyección de corriente.

Los resultados obtenidos confirman que el software EMTP-ATP es una herramienta robusta y confiable para el análisis de esquemas de protección, permitiendo modelar relés con alta fidelidad y evaluar su comportamiento antes de su implementación en campo. Se concluye que la metodología de validación aquí planteada puede ser extendida a otros tipos de protecciones y constituye una base sólida para proyectos de coordinación de protecciones en entornos industriales y educativos, además, de permitir la evaluación ante condiciones como la presencia de armónicos, corrientes de inrush, desbalances, entre otros.

REFERENCIAS

[1] O. S. E. Atwa, “Power System Elements,” in *Practical Power System and Protective Relays Commissioning*, Elsevier, 2019, pp. 1–7. doi: 10.1016/B978-0-12-816858-5.00001-0.

[2] R. Leelaruji and L. Vanfretti, “Power System Protective Relaying : basic concepts, industrial-grade devices, and communication mechanisms.,” *Internal Report*, p. 35, 2011, [Online]. Available: http://www.vanfretti.com

[3] IEC, *IEC 60255-151 Measuring relays and protection equipment - Part 151: Functional requirements for over/under current protection*. 2009.

[4] Aldo Daniel Marreros Grillo, “Estudio de los fenómenos transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia, y su influencia en los sistemas de protección.” Accessed: Jul. 05, 2025. [Online]. Available: https://pirhua.udep.edu.pe/item/8dd4c3d5-8320-4712-be51-c16441a59a45

[5] “IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays,” Dec. 05, 2018, *IEEE, Piscataway, NJ, USA*: 112–1996. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8635630.

[6] S. Grogan, M. Richwine, R. Quint, and J. Matevosyan, “Electromagnetic Transient Models: Applications, Limitations, and Enablers in Power Systems [Feature],” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 27–39, Jul. 2025, doi: 10.1109/MPE.2024.3512494.

[7] Y. Dan, K. Sun, C. Wang, X. Zhang, and L. Yu, “Inverse-Time Overcurrent Protection Scheme for Smart Grids Based on Composite Parameter Protection Factors,” *Electronics (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 4204, Oct. 2025, doi: 10.3390/electronics14214204.

[8] European EMTP Users Group, “ATP-EMTP.” Accessed: Jan. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.atp-emtp.org/

[9] L. Zhang *et al.*, “Research on the Lightning Protection for the Pumped Storage Power Substation Using GIL Outgoing Line Design,” in *2025 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, IEEE, Apr. 2025, pp. 2006–2011. doi: 10.1109/ACPEE64358.2025.11040180.

[10] A. Y. Hadjicostas, E. T. Staikos, Z. G. Datsios, G. D. Peppas, and T. Tsovilis, “Surge Protection of Charging Stations Against Impinging Overvoltages Due to Lightning Strikes to Incoming Medium Voltage Overhead Line,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 61, no. 2, pp. 2324–2335, Mar. 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3524952.

[11] J. R. Lima, F. B. Costa, and F. V. Lopes, “Two-terminal traveling-wave-based non-homogeneous transmission-line protection,” *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109622, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109622.

[12] M. L. S. Almeida and K. M. Silva, “An investigation of distance protection function applied for shunt reactors,” *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109579, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109579.

[13] C. C. S. Silva, V. R. Serpa, and K. M. Silva, “A new negative-sequence cross-differential algorithm for double-circuit line protection,” *Electric Power Systems Research*, vol. 251, p. 112219, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.epsr.2025.112219.

[14] Orlys Ernesto Torres Breffe, “ Desarrollo de herramientas para la creación, modelación y comprobación de protecciones eléctricas ,” 2005.

[15] Nan Zhang, Hongbiao Song, and M. Kezunovic, “Transient Based Relay Testing: A New Scope and Methodology,” in *MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, IEEE, pp. 1110–1113. doi: 10.1109/MELCON.2006.1653294.

[16] Diego Iván Clavijo Rey, “METODOLOGÍA PARA REALIZACIÓN DE PRUEBAS END-TO-END PARA PROTECCIONES EN LABORATORIO,” 2016.

[17] M. Kezunovic and J. Ren, “New test methodology for evaluating protective relay security and dependability,” in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, Jul. 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/PES.2008.4596541.

[18] J. G. S. Carvalho, A. G. C. Ménézés, A. R. Almeida, O. M. Almeida, F. S. Bartolomeu, and L. H. P. Vasconcelos, “Modeling and simulation of reclosers of real distribution feeder using software ATP,” in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, IEEE, May 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395781.

[19] Andrea Bonetti; Klaus Spitzenberg; Lennart Schottenius; Stefan Larsson; Megger Sweden A, “Testing self-powered relays with SVERKER 900 - V01,” Sep. 2020. Accessed: Jul. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344340419_Testing_self-powered_relays_with_SVERKER_900_-_V01

[20] Schweitzer Engineering Laboratories, “SEL-451 Sistema de protección, automatización y control de bahía.” Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: https://selinc.com/es/products/451/

[21] Wuhan Jiuhua Jingce Power Equipment, “JHS903 Relay Protection Tester Microcomputer Secondary Current Injection Relay Test Set 3 Phase.” Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: https://jiuhuajingce.en.made-in-china.com/product/mQLrgpRYFSWz/China-Relay-Protection-Tester-Microcomputer-Secondary-Current-Injection-Relay-Test-Set-3-Phase.html

[22] Schweitzer Engineering Laboratories SEL, “SEL-5030 Software acSELerator QuickSet.” Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: https://selinc.com/es/products/5030/

BIOGRAFÍAS



JOSÉ JESÚS CONTRERAS PÉREZ Actualmente se encuentra en la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, cursando sus últimos semestres. Sus intereses abarcan temas de electrónica de potencia, energías renovables, análisis de flujos de potencia, protecciones eléctricas y micro redes, entre otros.



JUAN MANUEL CANO GALLARDO Recibió el título de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en el año 2022 por parte de la Universidad de Guanajuato. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la electrónica de potencia, las energías renovables, las microrredes y el diseño de máquinas eléctricas.



DANIEL ALBERTO PEÑA PÉREZ Es Ingeniero Mecatrónico por la Universidad de Guanajuato (2014) y Maestro en Ingeniería en Energías Renovables por la University of Aberdeen, en Escocia, Reino Unido (2018), grado obtenido con honores. Desde 2018, se desempeña como Ingeniero de Protecciones Eléctricas y Calidad de la Energía en el Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM) de la Comisión Federal de Electricidad, donde realiza evaluaciones técnicas de sistemas fotovoltaicos, análisis de calidad de potencia conforme al Código de Red, inspección de relevadores, pruebas a transformadores de instrumentación y análisis de fallas en interruptores, transformadores y esquemas de protección.
Ha participado en proyectos de evaluación de equipos en plantas solares, geotérmicas, hidroeléctricas, termoeléctricas, ciclos combinados y en la Central Nuclear Laguna Verde. Sus líneas de interés incluyen energías renovables, electrónica de potencia, calidad de energía, integración de sistemas fotovoltaicos, protecciones eléctricas, automatización, mecatrónica, manufactura CAD/CAM, grid forming, sistemas HVDC y electromovilidad, entre otras.



OSVALDO RODRIGUEZ VILLALON Obtuvo su grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, UMSNH, 2012. Realizó estancia posdoctoral en el Power Systems Laboratory ETH-Zurich, Suiza, 2014 al 2016. Es profesor investigador de tiempo completo adscrito al programa de Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato.



LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA Realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga Colombia obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.

Recibido 7 de julio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Batería li-ion 2d con líneas 1d de electrolito sólido llzto y ánodo/cátodo de materiales compuestos

ALDO ELIZARRARAZ PEREZ[1], JOSÉ DE JESÚS PÉREZ BUENO1[1], IVÁN A. HERNÁNDEZ ROBLES[2]
[1]CIDETEQ.
[2]Universidad de Guanajuato.
*Autor de correspondencia: aelizarraraz@cideteq.mx

RESUMEN El estudio se centra en el desarrollo y la evaluación de baterías de iones de litio con un diseño bidimensional (2D), dispuestas en el mismo plano X-Y, que incorporan líneas unidimensionales (1D) de electrolito sólido LLZTO (Óxido de zirconio litio-lantano dopado con tantalio). Para el cátodo y el ánodo se emplearon nanomateriales y materiales compuestos, incluidos materiales reciclados procedentes de baterías Li-ion desechadas.

PALABRAS CLAVE — Batería de iones de litio, batería de estado sólido, electrolito sólido.

I. INTRODUCCIÓN

Las baterías de iones de litio (Li-ion) son actualmente la tecnología dominante en el almacenamiento de energía para dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Estas baterías destacan por su alta densidad de energía, larga vida útil y baja tasa de autodescarga, lo que las hace ideales para una amplia gama de aplicaciones.

En 2020, el mercado global de baterías de iones de litio se valoró en USD 30.2 mil millones, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) proyectada del 18.0% para alcanzar USD 92 mil millones en 2026 [1]. Sin embargo, el rápido crecimiento de esta tecnología ha puesto de manifiesto una serie de problemas asociados a su producción, rendimiento y reciclaje.

PROBLEMÁTICA DE LAS BATERÍAS DE LITIO

A. Degradación del rendimiento y seguridad

Uno de los principales desafíos técnicos de las baterías de litio es la degradación de su rendimiento con el tiempo. La capacidad de una batería de litio en algunos vehículos eléctricos puede disminuir hasta un 35% después de 500 ciclos [2], lo que conduce, eventualmente, a una reducción de su vida útil. Además, problemas como el sobrecalentamiento, la formación de dendritas y el riesgo de fuga térmica representan amenazas para la seguridad.

B. Sobrecalentamiento y riesgos de incendio

Las baterías de litio pueden presentar fugas térmicas al sobrecalentarse, lo que puede provocar incendios o explosiones. La producción de baterías depende de materiales escasos como el litio, el cobalto y el níquel, cuya extracción tiene implicaciones ambientales y sociales importantes. Según estimaciones, la demanda de litio se cuadruplicará para 2040 [1].

C. Impacto ambiental

La extracción de estos materiales también genera impactos ambientales relevantes, como la contaminación del agua y la destrucción de hábitats naturales, especialmente en países donde se extraen estos metales, como Bolivia y la República Democrática del Congo [1].

La demanda de baterías de litio se ha disparado debido a la adopción masiva de vehículos eléctricos. Se espera que la demanda global de litio (como mineral) para baterías alcance 1.79 millones de toneladas métricas de equivalente de carbonato de litio para 2030 [1].

Se estima que para 2040 la demanda de litio aumentará un 600% y la de cobalto crecerá un 500%, debido al incremento de la producción de vehículos eléctricos y de sistemas de almacenamiento de energía [1].

Actualmente, aún no existe una norma mexicana específica que regule la disposición de los desechos de baterías de litio ni su adecuado reciclaje.

II. BATERÍAS DE DOS DIMENSIONES

A. Desarrollo de baterías de litio en dos dimensiones

El desarrollo de baterías de litio basadas en materiales bidimensionales (2D) ha emergido como un enfoque prometedor para superar las limitaciones de las baterías tradicionales de iones de litio en términos de densidad de energía, flexibilidad y estabilidad estructural. En este contexto, los materiales bidimensionales, como el grafeno, el disulfuro de molibdeno (MoS_2) y otros compuestos como el LLZTO (óxido de zirconio litio lantano dopado con tantalio), ofrecen propiedades únicas que pueden mejorar el desempeño electroquímico de las baterías actuales [2], [3].

B. LLZTO como electrolito sólido

El $Ta - Li_7La_3Zr_2O_{12}$ (LLZTO, óxido de zirconio Lantano Litio dopado con Tantalio) es un electrolito sólido ampliamente investigado para su uso en baterías de iones de litio, debido a sus atractivas propiedades físicas y electroquímicas, tales como su alta conductividad iónica [4], [5], alta estabilidad química y electroquímica [6]–[8], baja reactividad con el litio metálico y estructura cristalina estable a temperatura ambiente [4], [5], [9].

El LLZTO actúa como electrolito sólido debido a su capacidad para mantener la movilidad de los iones de litio dentro de su estructura cristalina. A diferencia de los electrolitos líquidos, los sólidos mejoran la estabilidad y la seguridad de la batería al reducir riesgos, como los cortocircuitos provocados por la formación de dendritas [10].

C. Diseño de la batería de litio 2D

Como propuesta de diseño, se emplean tres materiales: un ánodo, un cátodo y el electrolito sólido de LLZTO, como se muestra en la Fig. 1.

Para este diseño inicial se seleccionó un sustrato rígido e inerte para depositar las películas de los diferentes materiales. Se utilizaron portaobjetos de vidrio, dado que presentan adecuada rigidez mecánica, soportan un amplio rango de temperaturas, tienen muy baja rugosidad y son eléctricamente aislantes.

Como material anódico, se usó $LiFePO_4$, el cual, al ser reemplazado por el litio metálico, permite un manejo más estable y seguro a temperatura ambiente y en atmósfera de aire. Como material catódico se utilizó grafito, ampliamente empleado en baterías de litio [11].

III. METODOLOGÍA

La implementación del diseño 2D se logró mediante la deposición de electrolitos y electrodos con plasma a presión atmosférica (APPJ).

A. Deposición individual de componentes por plasma

Para depositar el material sobre el sustrato, fue necesario preparar una solución que contuviera el material que conformaría la película. Para ello, se empleó agua desionizada con una concentración de 0.2 g del material, el cual se agitó en un baño ultrasónico durante 1 h.

Como segundo paso, se evaluó si la solución era adecuada para el proceso de deposición por plasma. La prueba consistió en verificar que se generara una niebla uniforme a través de un tubo de plástico de medio metro de largo y una pulgada de diámetro. Para esta prueba se utilizó un nebulizador ultrasónico tipo hospitalario, modelo WH-2000, marca YUE HUA. Como sustrato, se utilizaron portaobjetos de vidrio sin tratamiento adicional.

Previo a la deposición, se realizó una limpieza del sustrato con el mismo plasma para eliminar polvo o suciedad no visibles a simple vista. Para todas las muestras, se aplicó una limpieza e hidrofilización, con tratamiento de superficie mediante un jet de plasma durante 1 min.

Una vez realizada la limpieza e hidrofilización por APPJ, para el depósito y la formación de la película se activan el chorro de plasma y el nebulizador.

El protocolo para la deposición fue el siguiente: (i) 60 s de limpieza, (ii) 20 s de plasma con la niebla del nebulizador y (iii) 40 s solo de plasma. Estos dos últimos pasos se repitieron cuatro veces. Las películas de (a) LLZTO, (b) $LiFePO_4$ y (c) grafito se muestran en la Fig. 2.

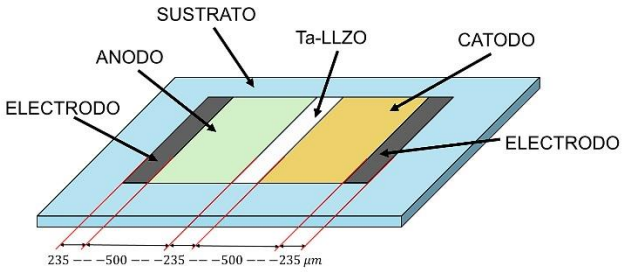


Fig. 1. Diseño de batería de litio 2D con capas sucesivas.

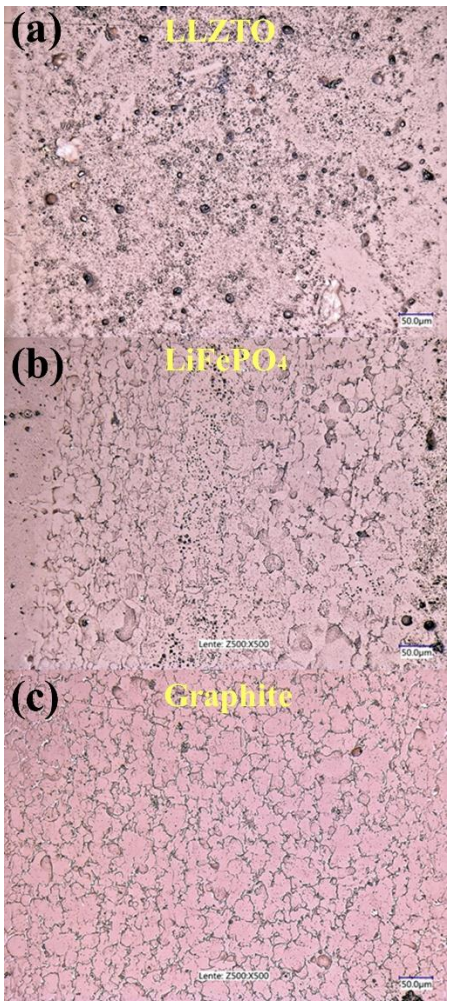


Fig. 2. *Microcopia óptica a 500x de (a) LLZTO, (b) $LiFePO_4$ y (c) grafito.*

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

Una vez obtenidos los depósitos individuales necesarios para la batería, se procede a realizar los depósitos de las capas sucesivas mostradas en el diseño 01 de la Fig. 1, dando el siguiente resultado (Fig. 3).

IV. CARACTERIZACIÓN

Para confirmar la formación de un depósito uniforme, adecuado para una batería bidimensional, se realizó la caracterización mediante microscopía SEM a 5000×, lo que permitió observar la rugosidad y la homogeneidad de las películas depositadas (Fig. 4). Como se observa en las Figs. 4b y 4c, los depósitos presentan una morfología homogénea, lo que indica que son materiales aptos para la fabricación de una batería 2D. En cuanto al electrolito sólido LLZTO, se identificó una menor uniformidad en la película, que podría mejorarse ajustando el número de capas depositadas, reduciéndolo de cuatro a tres.

V. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad técnica de fabricar una batería de iones de litio de estado sólido con diseño bidimensional, mediante la tecnología de plasma APPJ, empleando un sustrato rígido e inerte a temperatura ambiente y en atmósfera de aire. Los resultados de caracterización evidencian que los depósitos de grafito y $LiFePO_4$ presentan una buena uniformidad superficial, adecuada para su integración en arquitecturas 2D multicapa. En el caso del LLZTO, se comprobó su factibilidad como electrolito sólido funcional, destacando su adherencia al sustrato y su estabilidad estructural en las condiciones de deposición empleadas.

Se verificó la efectividad del protocolo de limpieza con plasma para garantizar superficies libres de contaminantes previas a la deposición, lo que contribuyó a mejorar la calidad de la interfaz entre capas. La metodología implementada permitió obtener películas individuales y ensamblajes en capas sucesivas, reproduciendo de manera controlada la disposición según el diseño propuesto. Estos resultados confirman la robustez del proceso APPJ como una alternativa versátil para la obtención de materiales activos y electrolitos sólidos, manteniendo propiedades físico-químicas favorables para dispositivos de almacenamiento de energía de configuración bidimensional.

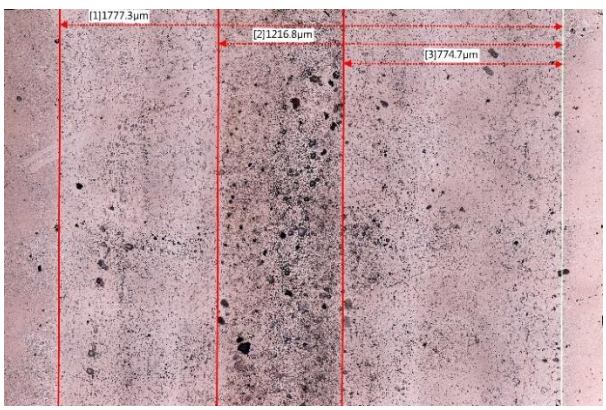


Fig. 3. Microcopia óptica a 500x de la batería de litio con capas sucesivas, de izquierda a derecha: grafito, LLZTO y $LiFePO_4$, (a) sin y (b) con medición.

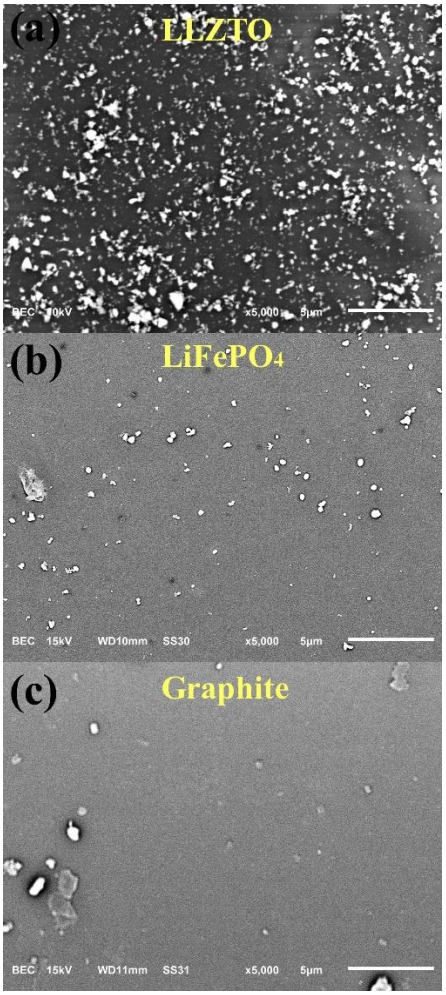


Fig. 4. Micrografía electrónica SEM (electrones retrodispersos) a 5000x de (a) LLZTO, (b) $LiFePO_4$ y (c) grafito.

REFERENCIAS

[1] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2025 Expanding sales in diverse markets," 2025. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025 (accessed Oct. 10, 2025).

[2] Y. He, X. Shen, and Y. Zhang, "Layered 2D Materials in Batteries," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, no. 24, pp. 27907–27939, Dec. 2024, doi: 10.1021/acsanm.3c06242.

[3] Q. Ma *et al.*, "2D Materials for All-Solid-State Lithium Batteries," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 16, Apr. 2022, doi: 10.1002/adma.202108079.

[4] M. Curcio, S. Brutti, A. Celeste, A. Galasso, A. De Bonis, and R. Teghil, "Influence of Deposition Conditions and Thermal Treatments on Morphological and Chemical Characteristics of Li6.75La3Zr1.75Ta0.25O12 Thin Films Deposited by Nanosecond PLD," *Coatings*, vol. 13, no. 9, p. 1496, Aug. 2023, doi: 10.3390/coatings13091496.

[5] J. P. Singh, A. K. Paidi, and S. Lee, "Growth strategies of Li7La3Zr2O12 electrolytes for Li-ion thin film battery," *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 16, p. 100532, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ceja.2023.100532.

[6] T. Wu, S. Guo, B. Li, C. Shen, X. Liu, and A. Cao, "Garnet-type solid-state electrolytes: crystal structure, interfacial challenges and controlling strategies," *Rare Met.*, vol. 42, no. 10, pp. 3177–3200, Oct. 2023, doi: 10.1007/s12598-023-02323-y.

[7] A. V. Morozov *et al.*, "Thermodynamics as a Driving Factor of LiCoO 2 Grain Growth on Nanocrystalline Ta-LLZO Thin Films for All-Solid-State Batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 35, pp. 39907–39916, Sep. 2022, doi: 10.1021/acsami.2c07176.

[8] Q. Guo *et al.*, "20 µ m-Thick Li 6.4 La 3 Zr 1.4 Ta 0.6 O 12 -Based Flexible Solid Electrolytes for All-Solid-State Lithium Batteries," *Energy Mater. Adv.*, vol. 2022, Jan. 2022, doi: 10.34133/2022/9753506.

[9] B. Wu, C. Chen, D. L. Danilov, R.-A. Eichel, and P. H. L. Notten, "All-Solid-State Thin Film Li-Ion Batteries: New Challenges, New Materials, and New Designs," *Batteries*, vol. 9, no. 3, p. 186, Mar. 2023,

doi: 10.3390/batteries9030186.
[10] W. Zaman and K. B. Hatzell, "Processing and manufacturing of next generation lithium-based all solid-state batteries," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 26, no. 4, p. 101003, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cossms.2022.101003.
[11] J. Zhang, H. Huang, G. Zhang, Z. Dai, Y. Wen, and L. Jiang, "Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review," *J. Energy Storage*, vol. 93, p. 112231, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112231.

BIOGRAFÍAS



ALDO ELIZARRARAZ PEREZ Ingeniero Mecatrónico de la Universidad de Guanajuato, DICIS, originario de la ciudad de Irapuato, Gto. Investigador en la aplicación de nanomateriales gráficos en celdas fotovoltaicas, celdas termoeléctricas e hidrógeno fotocatalítico en CINERGIA UG; fundador de una empresa de energías renovables; estudiante de maestría en electroquímica del CIDETEQ en baterías de litio de estado sólido.



JOSÉ DE JESÚS PÉREZ BUENO Obtuvo su doctorado en Ingeniería, especialidad en Materiales, por la Universidad Autónoma de Querétaro, tras obtener su Licenciatura y su Maestría en Física en la Universidad Autónoma de Zacatecas y en el CINVESTAV-IPN, respectivamente. Inició su carrera internacional como Investigador Asociado en el Instituto de Tecnología de Polímeros e Ingeniería de Materiales de la Universidad de Loughborough (Reino Unido), donde trabajó en materiales híbridos orgánico-inorgánicos para aplicaciones fotónicas. Desde 2003, es Investigador Titular del CIDETEQ, con especialización en procesos electroquímicos, recubrimientos por sol-gel, nanomateriales y tecnologías sustentables para aplicaciones energéticas y ambientales. Es Investigador Nacional (SNII Nivel III), autor de 115 publicaciones indexadas (más de 2000 citas), 10 artículos nacionales, 22 capítulos de libros y 3 libros, y coinventor de 12 patentes concedidas. Ha graduado a 115 estudiantes de licenciatura, 20 de maestría y 12 de doctorado; ha supervisado a 7 investigadores posdoctorales y ha sido mentor de 49 estudiantes de verano. Su investigación le ha valido dieciséis premios a nivel estatal, nacional e internacional, incluyendo el Premio Alejandrina de la UAQ (tres veces), la Medalla a la Innovación, el Premio TECNOS y el Premio PRODETES – Categoría Plata (Banco Mundial/SENER), que apoyó la instalación de un sistema industrial de producción de nanorecubrimientos y espejos solares. En 2022, recibió en Querétaro, México, el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología y el Premio al Mérito Empresarial, en reconocimiento a su impacto en la investigación, la innovación tecnológica y la sostenibilidad.



IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES Obtuvo el título de licenciatura en Ingeniería Eléctrica por parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Guanajuato, la Maestría en Ciencias y el Doctorado en especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia en la institución CINVESTAV, Unidad Guadalajara, con Estancia Doctoral en el Instituto Politécnico de Nueva York. Se ha desempeñado en el ramo de la construcción eléctrica en empresas del Estado de Jalisco como ingeniero de proyectos eléctricos en baja y media tensión; se ha desempeñado como ingeniero de diseño de transformadores en una empresa internacional, así como como ingeniero de proyectos en el desarrollo de nuevos productos, trabajando en el diseño y optimización de motores y generadores lineales. Actualmente está adscrito a la Universidad de Guanajuato, al departamento de Ingeniería Eléctrica y al Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato (CINERGIA UG). Sus líneas de investigación y desarrollo son: diseño de máquinas eléctricas, electromagnetismo, energías alternativas y limpias y simulación aplicada al diseño de máquinas eléctricas.

Recibido 26 de junio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Aprovechamiento bioenergético de los residuos agroindustriales de chile mirasol (*Capsicum annum* cv *mirasol*)

JANETH DANEL-CASESUS[1], KARINA GONZALEZ-RAMÍREZ[2], GABRIELA AGUILAR-ZÁRATE[1], KARLA DENISSE LUNA-AVELAR[1,3], MIGUEL BETANCOURT-LOZANO[1], DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO[1]*.

[1]Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Mazatlán, Sinaloa, México
[2]Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México
[3]Estancias posdoctorales por México, SECIHTI-CIAD Mazatlán, Sinaloa, México.
*Autor de correspondencia: ulises.ballardo@ciad.mx

RESUMEN El procesamiento agroindustrial de secado del chile mirasol para obtener chile guajillo, genera semillas que comúnmente se desechan, a pesar de su potencial para la producción de biocombustibles. Estas semillas contienen lípidos que pueden extraerse y transformarse en biodiésel mediante procesos de transesterificación; una vez extraído el aceite, la biomasa residual desgrasada aún posee un alto contenido de materia orgánica, lo que la convierte en un sustrato adecuado para digestión anaerobia y generación de biometano. Este enfoque integral puede maximizar el aprovechamiento de dichos subproductos al obtener múltiples productos de valor a partir de una misma biomasa. Este trabajo evalúa el potencial energético de semillas residuales de chile mirasol como materia prima para biodiésel y biogás, obteniendo un porcentaje de extracción de aceite de alrededor de 13 % y potencial metanogénico de la biomasa desgrasada que osciló entre 449 y 779 mililitros de metano por gramo de sólido volátil.

PALABRAS CLAVE — Biorrefinería, biodiésel, digestión anaerobia, residuos agroindustriales.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la agroindustria genera más de 1,300 millones de toneladas de residuos cada año, de los cuales una gran parte es eliminada mediante incineración o disposición en vertederos, prácticas que contribuyen significativamente a la contaminación del aire, el suelo y el agua [1, 2]. Este tipo de manejo no solo acelera la degradación ambiental, sino que también está asociado con la proliferación de microorganismos patógenos, malos olores y la generación de lixiviados contaminantes [1, 3]. Ante este panorama, la valorización de residuos agroindustriales ha emergido como una alternativa sostenible con amplio potencial de aplicación.

Una de las opciones con mayor proyección es la transformación de estos residuos en productos de valor agregado, tales como biocombustibles y biofertilizantes [4, 5]. En este contexto, las biorrefinerías surgen como una estrategia clave, ya que permiten integrar diversas rutas de valorización bajo un enfoque sistémico, eficiente y ambientalmente responsable. Este concepto, que se encuentra enmarcado dentro de los principios de la economía circular, busca transformar la biomasa residual en múltiples productos de alto valor, reduciendo la dependencia de recursos fósiles y fomentando un modelo productivo más sostenible [2, 6, 7].

Ante esta oportunidad, dos puntos clave son la investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes, ya que, la maduración de estos aspectos permitiría desarrollar métodos de extracción de los componentes de interés presentes en los residuos seleccionados como materia prima de una manera más optima y eficiente, así como alcanzar viabilidad tanto técnica como económica ante la utilización y el procesamiento de este tipo de materiales para la obtención de productos de valor, y facilitar su incorporación en la industria a mediana o gran escala [6]. Una de las ventajas de las biorrefinerías es la flexibilidad de procesar y transformar distintos tipos de biomasa. Esta flexibilidad otorga el acceso a implementar este tipo de instalaciones en diferentes regiones mediante el aprovechamiento de materias primas locales [4].

México es uno de los principales productores de chile a nivel mundial, debido a su diversidad climática y su infraestructura agrícola. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) [8], en el año 2023 se sembraron alrededor de 165,226 hectáreas de este cultivo, alcanzando una producción superior a los 3.6 millones de toneladas. Esta dimensión de producción lleva de la mano a la generación de volúmenes de residuos agroindustriales significativos, en forma de semillas, tallos y

tejidos no comestibles, que generalmente son desechados sin un procesamiento o tratamiento adecuado [9, 10].

Los principales chiles cultivados en México reportados son el jalapeño, serrano, poblano y mirasol. Este último tiene gran importancia comercial ya que al secarse se obtiene el chile guajillo, el cual es ampliamente utilizado en la gastronomía mexicana y cuyo procesamiento genera una gran cantidad de subproductos, específicamente en forma de semillas, las cuales no son gestionadas de una manera adecuada y actualmente no se considera su valorización. No obstante, diversos estudios han reportado que las semillas de chile contienen diversos compuestos bioquímicos de alto interés comercial lo que las sitúa como una materia prima potencial para procesos de biorrefinería [1, 2].

En este sentido, el concepto de biorrefinería propone la extracción y aprovechamiento integral de estos compuestos, obteniendo aceite con potencial aplicación en la producción de biodiésel y de manera paralela, la biomasa desgrasada queda disponible para ser empleada como sustrato en procesos de digestión anaerobia para la generación de biogás. Dicho concepto se enfoca en promover una economía circular en la que los residuos agroindustriales se transforman en recursos energéticos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la generación de beneficios económicos [11, 12].

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo la evaluación del potencial de valorización de las semillas residuales de chile mirasol (generados durante su transformación en chile guajillo), mediante la determinación de su contenido de aceite y el uso de la biomasa desgrasada como sustrato en la producción de biogás. Con ello, se busca establecer y proponer las bases de un modelo sostenible de aprovechamiento de subproductos agrícolas que fomente la transición hacia esquemas de producción más responsables, eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Las semillas de chile mirasol con las que se desarrolló el presente trabajo fueron donadas por la secadora de chiles “Rancho el Granado” S.A de C.V., ubicada en Ramón López Velarde Zacatecas, México. La recolección del material se realizó durante la temporada de cosecha y secado del año 2024. El secado del chile mirasol para la obtención del chile guajillo se efectuó mediante un método convencional, empleando túneles de hule y calor solar. Cabe mencionar que durante este procesamiento no se utilizaron aditivos ni compuestos químicos.

Para las pruebas de digestión anaerobia se utilizaron 3 inóculos para analizar la afinidad de estos con el sustrato propuesto. Se utilizaron lodos activados de las plantas tratadoras de agua de dos empresas de Mazatlán, Sinaloa. Dichas empresas fueron “Cervecería Pacífico” (P) y la de Industria de Maíz y Trigo “Tostaditas Blancas” (T), el tercer inóculo consistió en digestato obtenido de los digestores anaeróbicos de la empresa elaboradora de biofertilizantes BeGaia® (B). Los inóculos se mantuvieron en condiciones anaeróbicas a temperatura ambiente para generar inanición previa a los experimentos de potencial metanogénico [12].

B. MÉTODOS

1. Extracción de aceite

El procedimiento experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD), unidad Mazatlán. Las semillas se trituraron utilizando un molino eléctrico comercial hasta obtener una harina homogénea. Esta harina se almacenó en refrigeración a -4 ± 1 °C hasta el momento de su análisis y procesamiento.

Las semillas fueron previamente acondicionadas para proceder con la extracción mecánica de lípidos a partir de la semilla previamente molida. Esta extracción se realizó en una prensa expeller automática (modelo MLM-1515130776). La operación tuvo lugar en la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), donde se trabajó con cuatro muestras de 250 g de semilla molida seca, el material obtenido se denominó biomasa de semilla desgrasada (BSD).

2. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ). Extracción de aceite

El contenido de sólidos totales (ST), humedad (H), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ) fueron evaluados de acuerdo con el método reportado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) [11]. Estos análisis se realizaron a la BSD (sustrato) y a los 3 inóculos utilizados.

Para la cuantificación de ST, los crisoles se acondicionaron en un horno de convección (Novatech® HS35-ED) a 105 ± 2°C hasta alcanzar peso constante. Después de enfriarlos en desecador, se registró el peso de los crisoles vacío (P_{crisol}). Después, se depositaron aproximadamente 5 g de muestra y se determinó el nuevo peso ($P_{muestra}$). Las muestras se sometieron a secado a 103–105 °C durante 24 h, y una vez alcanzada la temperatura ambiente se registró el peso final (P_{total}). Cada determinación se realizó por triplicado y los resultados se expresaron como promedio ± desviación estándar. El cálculo de ST se efectuó con la Ec (1):

$$\%ST = \frac{P_{total} - P_{crisol}}{P_{muestra} - P_{crisol}} * 100 \qquad (1)$$

La humedad fue calculada por diferencia, considerando que la suma de humedad y ST son igual al 100 % de la materia. La determinación de sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ) se calcularon a partir de los ST obtenidos, para ello las

muestras previamente secas se llevaron a calcinación a 550°C durante 120 min. Luego del enfriamiento en desecador, se registró el peso del residuo ($P_{volátil}$). Cada análisis se efectuó por triplicado, presentando los resultados como promedio ± desviación estándar. Los cálculos se realizaron mediante la Ec (2) y Ec (3).

$$\%SV = \frac{P_{total} - P_{volátil}}{P_{total} - P_{crisol}} * 100 \quad (2)$$

$$\%CZ = \frac{P_{volátil} - P_{crisol}}{P_{total} - P_{crisol}} * 100 \quad (3)$$

3. Potencial metanogénico de la semilla desgrasada de chile

La BSD obtenida tras la extracción de aceite fue utilizada como sustrato en reactores de vidrio tipo batch para la producción de biogás por digestión anaerobia. Los biorreactores, con capacidad de 60 ml fueron sellados herméticamente con tapas de aluminio con empaques de politetrafluoroetileno (PTFE) que permitió la punción de los reactores para mediciones.

Se trabajó con una proporción inóculo:sustrato de 2:1, utilizando 35 ml de mezcla por reactor [10]. La digestión anaerobia se llevó a cabo a una temperatura controlada de 37 ± 1°C, durante un periodo de 46 días. Para asegurar una mezcla uniforme del sustrato e inóculo, los reactores fueron agitados de manera continua a 150 rpm en una incubadora CScientific CVP-500 [13, 14].

La medición de la producción de biogás se realizó midiendo la presión dentro del espacio de cabeza del reactor con un manómetro digital, mientras que el contenido de metano se analizó mediante eudiometría empleando NaOH (1N) para el desplazamiento de gas. Además, se utilizaron reactores que contenían únicamente inóculo (blancos) con el objetivo de determinar la producción endógena de metano y ajustar los valores obtenidos en los biorreactores con mezcla de sustrato e inóculo [13].

Para la carga de los biorreactores se utilizó la Ec (4).

$$gSV = \frac{vol}{m}(ST)(SV) \quad (4)$$

Se realizaron pruebas estadísticas utilizando el software SigmaPlot versión 14®, para las producciones acumuladas de metano (ml CH_4 gSV^{-1}). Se analizó la homocedasticidad de los datos mediante la prueba de igualdad de varianzas y se hicieron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk. Posteriormente se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$.

C. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Extracción de aceite

El porcentaje de aceite extraído de la semilla de chile mirasol fue de 12.75 % ± 1.16. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de lo que se ha reportado previamente por otros autores, donde se menciona que el aceite representa entre 9.0 % y 32.6 % del peso de las semillas de chile verde, dependiendo de la variedad [10, 15, 16].

En comparación, estudios respecto a semillas de chile rojo han informado valores superiores respecto al contenido de aceite, cercanos al 27 % en las variedades Podravka y Slavonka [16], mientras que otras investigaciones el contenido de aceite reportado se encuentra entre el 20 y 30 % dependiendo de la variedad y el método de extracción [17].

Respecto a la composición, aunque en el presente trabajo no se analizó el perfil de ácidos grasos del material en estudio, se ha reportado que el ácido linoleico (C18:2) generalmente es el predominante en aceites de semilla de chile, con valores entre el 70 y 78 % del contenido de lípidos en total, seguido por el ácido oleico (C18:1) con una presencia del 8 al 12 %, y en menor proporción los ácidos saturados palmítico (C16:0) y esteárico (C18:0), con valores del 10 al 16 % y 2 al 4 % [16, 17]. Este perfil rico en poliinsaturados ha sido reportado de manera firme en distintos estudios lo que respalda el potencial de estas semillas como materia prima para la producción de biodiésel mediante transesterificación [15, 16, 17].

Sin embargo, a pesar del potencial químico y funcional que presentan las semillas para generación de biodiesel, actualmente no se registra un aprovechamiento industrial significativo en este sentido. La mayoría de estos subproductos continúan siendo descartados o utilizados en aplicaciones de bajo valor.

2. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ).

Los resultados respecto a los análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y contenido de cenizas (CZ) se muestran en la Tabla I.

Para la BSD se determinó que el porcentaje de ST fue de 94.62 ± 0.35 %, lo cual indica un bajo contenido de humedad. En cuanto a los SV, se determinó un valor de 95.13 ± 0.35 %, lo que resulta relevante, ya que este parámetro refleja la porción de materia orgánica disponible para su transformación en metano. Estos resultados muestran que la biomasa desgrasada de semilla de chile guajillo posee muy poca humedad y un alto contenido de material potencialmente aprovechable, lo cual es favorable en la biomasa seleccionada somo sustrato para el proceso de digestión anaerobia y producción de biogás [13, 14].

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE INÓCULOS Y SUSTRATOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS METANOGÉNICAS.

Material	ST (%)	SV (% de ST)	H (%)	CZ (% de ST)
BSD	94.62 ± 0.35	95.13 ± 0.04	6.31 ± 0.06	4.86 ± 0.04
Ino T	1.86 ± 0.32	77.66 ± 2.69	98.13 ± 0.32	22.33 ± 2.69
Ino P	11.09 ± 0.39	30.71 ± 0.45	88.90 ± 0.39	69.29 ± 0.45
Ino B	9.51 ± 0.10	56.43 ± 0.39	90.49 ± 0.10	43.56 ± 0.39

*Cada valor es un promedio de triplicado ± desviación estándar. ST= sólidos totales, SV = sólidos volátiles, H = humedad, CZ = cenizas, BSD = biomasa de semilla desgrasada, Ino T= inóculo tostaditas, Ino P= inóculo pacifico, Ino B= inóculo begaia.

3. Potencial metanogénico de la biomasa de semilla desgrasada.

Los biorreactores tuvieron un tiempo de retención hidráulica de 46 días. En todos los tratamientos se mostró una fase acelerada de producción de biogás al inicio de la digestión anaerobia, seguida de una disminución progresiva de la producción hasta llegar a una fase estacionaria al final del experimento. Las curvas mostradas incluyen promedios de producción acumulada de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor (ml CH4 gSV-1) con barras de desviación estándar (±SD) que indican la variabilidad entre réplicas. Los tres inóculos (B, P y T) mostraron resultados bastante significativos en cuanto a la producción de biogás (Tabla II).

En la Fig. 1 se muestra la producción acumulada de metano (CH_4) expresada como ml CH_4 gSV^{-1}, donde el inóculo T mostró el mejor desempeño metanogénico entre los tres tratamientos ya que la producción de metano fue significativamente más alta desde los primeros días, superando los 450 ml CH_4 gSV^{-1} antes del día 15. La producción acumulada alcanzó un valor máximo 774.49 ± 22.77 ml CH_4 g SV^{-1} al final del experimento.

El inoculo BeGaia tuvo una producción rápida durante los primeros 15 días del experimento y alcanzó una producción de más de 300 ml CH_4 g SV^{-1}. Posteriormente, la producción de biogás disminuyó y se estabilizó hacia el día 30 con una producción acumulada final de 435.03 ± 14.33 ml CH_4 g SV^{-1}.

TABLA II. PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO (CH_4) EXPERIMENTAL.

Tratamiento	Producción acumulada (ml CH_4/gSV)
T + BSD	774.49 ± 22.77^{a}
B + BSD	435.03 ± 14.33^{b}
P + BSD	449.06 ± 18.67^{b}

Letras diferentes representan diferencias estadísticas para los datos en la columna (n=3, Tukey P≤0.05). Donde: BSD: Biomasa de semilla desgrasada; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico; mL CH_4/gSV: Mililitros de metano por gramo de sólido volátiil añadido al reactor.

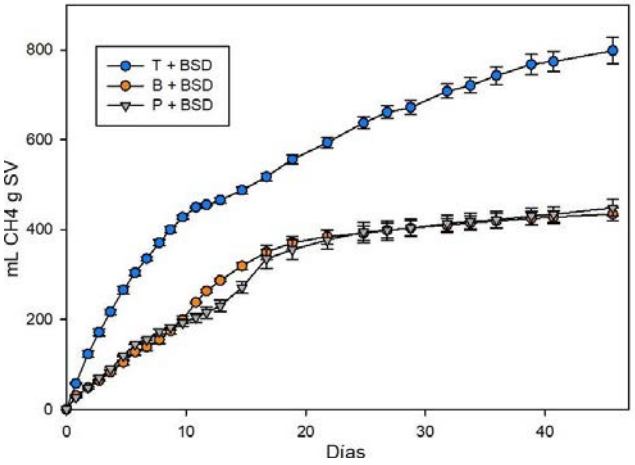


Fig. 1. Comparación de la producción acumulada de metano de semilla desgrasada de chile mirasol con los diferentes inóculos

Respecto al tratamiento inóculo de Cervecería Pacifico, este presentó una producción más lenta en las primeras etapas. Sin embargo, a partir del día 12 existió un aumento en la producción. La producción final fue de 449.06 ± 18.67 ml CH_4 g SV^{-1}, similar a la obtenida con el inóculo BeGaia, aunque con una fase de adaptación más prolongada.

Estos resultados muestran que el inóculo T fue el más eficiente para el proceso de digestión anaerobia de la semilla desgrasada de chile guajillo. Con este inoculo se obtuvo cerca del doble de la producción de metano en comparación con los inóculos B y P. Esta diferencia sugiere una mayor adaptación o actividad metanogénica del consorcio microbiano presente en el inóculo T, lo cual podría estar relacionado con su origen o historial previo de uso en este tipo de bioprocesos.

El análisis estadístico (ANOVA de una vía) demostró diferencias significativas entre los tratamientos ($F = 267.83$, $p < 0.001$). Las pruebas estadísticas indicaron que el inóculo T presentó una producción de metano significativamente mayor que los inóculos B y P ($p < 0.001$), mientras que no se observaron diferencias significativas entre estos dos últimos ($p = 0.724$). Estos resultados respaldan que el inóculo T tiene un desempeño metanogénico superior en las condiciones evaluadas.

Por otro lado, el porcentaje de metano presente en el biogás generado para cada experimento fue el siguiente: para T + BSD se obtuvo 61.80 ± 2.01%, para B + BSD se alcanzó 62.65 ± 3.72% y finalmente para P + BSD se reportó 70.18 ± 6.01.%. Cabe mencionar que, aunque el inóculo de Cervecería Pacífico no alcanzó la mayor producción acumulada de metano, presentó un biogás con mayor calidad, lo que puede relacionarse a que posiblemente la etapa metanogénica de la digestión anaerobia pudo ocurrir con más estabilidad [12,18,19].

En comparación, los resultados obtenidos de la producción acumulada de metano del presente trabajo fueron superiores a los reportados por Lezama-Rosas [19] donde utilizando semillas desgrasadas de chile poblano reportaron

valores entre 238 y 417 ml CH_4 gSV^{-1}. En la búsqueda de literatura realizada se observó escases de estudios sobre el aprovechamiento de semillas de chile para la producción de biogás, por lo que los resultados obtenidos se comparan favorablemente con los obtenidos a partir de otros subproductos oleaginosos conocidos como "oil cakes", que son los residuos sólidos que quedan después de la extracción del aceite.

Por ejemplo, el residuo desgrasado de girasol tiene un potencial metanogénico que oscila entre 186 y 215 mL de CH_4/gSV. Incluso con un pretratamiento complejo (uso de ácido sulfúrico y alta temperatura), su rendimiento máximo apenas alcanzó los 302 mL de CH_4/gSV [20, 21]. También, se ha reportado que la fermentación en estado sólido del sobrante de palma produce un rendimiento de aproximadamente 130 mL de CH_4/gSV [21, 22].

Estos datos demuestran que el potencial metanogénico de la biomasa desgrasada de chile mirasol es significativamente superior al de diferentes residuos o subproductos oleaginosos. Este hecho resalta el alto valor de este subproducto agrícola y la ventaja de no requerir de pretratamientos complejos para su valorización energética, lo que lo posiciona en una materia prima ideal para la producción de biogás de manera eficiente.

III. CONCLUSIONES

El presente trabajo realizado mostró que las semillas de chile guajillo representan un recurso agroindustrial altamente aprovechable bajo un enfoque de biorrefinería. El porcentaje de aceite que se obtuvo se encuentra dentro de los rangos reportados por la literatura para distintas variedades de *Capsicum*. De esta manera, la abundancia de este residuo y su porcentaje de contenido de aceite respalda su uso como materia prima para la producción de biocombustibles líquidos, particularmente biodiésel. Aunque no se profundizó en la caracterización del perfil de ácidos grasos, la evidencia existente señala que este tipo de aceites presenta un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, lo que da soporte a la congruencia de su estudio para aplicaciones energéticas.

Se determinó que la biomasa residual desgrasada contiene una fracción elevada de sólidos totales y sólidos volátiles, lo cual muestra una porción orgánica abundante y disponible para su transformación a biometano. Esta característica se reflejó en los ensayos de digestión anaerobia, donde se alcanzaron producciones relevantes de metano. De los tres tratramientos, el inóculo Tostaditas (T) fue el que mostró un desempeño significativamente superior en comparación con los inóculos BeGaia (B) y Pacífico (P), esto implica que la composición y las características de los inóculos son puntos importantes a considerar para la eficiencia del proceso metanogénico.

Los resultados obtenidos muestran la importancia y viabilidad de establecer esquemas de aprovechamiento integral en el que la fracción lipídica y la fracción sólida de las semillas de chile guajillo puedan ser valorizadas mediante la producción secuencial de biocombustibles, tales como el biodiésel y biogás. Este enfoque representa una alternativa para el manejo sustentable de residuos agroindustriales y abre la posibilidad de generar cadenas de obtención de productos de valor con un impacto ambiental positivo.

Como recomendación, se menciona que, para otorgar mayor soporte a este tipo de estudios en el futuro, se incluya la caracterización de los lípidos obtenidos (perfil de ácidos grasos, índice de saponificación y estabilidad oxidativa), así como la evaluación de la digestión anaerobia a nivel piloto bajo distintas condiciones de operación. Estos aspectos serán de gran importancia para evaluar la capacidad de adaptación del proceso en diferentes escalas y consolidar el modelo de biorrefinería propuesto como una opción atractiva para la industria agroalimentaria y energética.

REFERENCIAS

[1] A. R. Alcántara-Revilla, A. Mejía-Benavides, S. C. Chávez-García, and D. E. Castillo-Llerena, “Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente,” Rev. Cient. OGOLL, vol. 2, no. 2, e29, 2022.

[2] I. Prado-Acebo, J. Cubero-Cardoso, T. A. Lu-Chau, y G. Eibes, “Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review,” Waste Management, vol. 183, pp. 42-52, May 2024. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.05.001

[3] R. Singh, R. Das, S. Sangwan, et al., “Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review,” Environmental Sustainability, vol. 4, pp. 619–636, Dec. 2021. DOI: 10.1007/s42398-021-00200-x.

[4] B. Koul, M. Yakoob, y M. P. Shah, “Agricultural waste management strategies for environmental sustainability,” Environmental Research, vol. 206, p. 112285, Feb. 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112285.

[5] E. Capanoglu, E. Nemli, y F. Tomas-Barberan, “Novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications,” Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 70, no. 23, pp. 6787-6804, Jun. 2022. DOI: 10.1021/acs.jafc.1c07104

[6] A. C. F. Carvalho, S. Ghosh, T. G. Hoffmann, E. S. Prudêncio, C. K. de Souza, y S. Roy, “Valuing agro-industrial waste in the development of sustainable food packaging based on the system of a circular bioeconomy: A review,” Cleaner Waste Systems, p. 100275, Jan. 2025. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100275.

[7] S. K. Maity, “Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 43, pp. 1427-1445, Mar. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.092.

[8] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), “Panorama agroalimentario 2018–2024: Chile verde,” Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035

[9] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), “El chile como parte de la cultura alimenticia de México,” CIAD.mx, 2020. [Online]. Available: https://www.ciad.mx/el-chile-como-parte-de-la-cultura-alimenticia-de-mexico/.

[10] T. Cvetković, J. Ranilović, y S. Jokić, “Quality of pepper seed by-products: A review,” Foods, vol. 11, no. 5, p. 748, Mar. 2022. DOI: 10.3390/foods11050748.

[11] EPA. Environmental Protection Agency, “Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft,” EPA-821-R-01-015, Jan., 2001.

[12] B. Armenta-Medel, J. G. Lezama-Rosas, M. F. Júarez-Cota, D. U. Santos-Ballardo, and D. L. Ambriz-Pérez, “Potencial de obtención de biodiesel y biogás a partir de semilla de guamúchil (Pithecellobium dulce),” Identid. Energética, vol. 7, no. 1, pp. 43–47, 2023.

[13] D. U. Santos-Ballardo, X. Font-Segura, A. S. Ferrer, R. Barrena, S. Rossi, y A. Valdez-Ortiz, "Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual Tetraselmis suecica biomass and co-digestion with glycerol," Waste Management & Research, vol. 33, no. 3, pp. 250-257, Mar. 2015. DOI: 10.1177/0734242X15572182.
[14] J. C. Velarde-Meza, L. J. Tiznado-Osuna, Y. M. Aguilera-Hernández, y D. U. Santos-Ballardo, "Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas," Identidad Energética, vol. 6, no. 1, pp. 31-37, Jan. 2023
[15] J. Lee, J. Kim, Y. S. Ok, y E. E. Kwon, "Rapid biodiesel synthesis from waste pepper seeds without lipid isolation step," Bioresource Technology, vol. 239, pp. 17-20, Jul. 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.011.
[16] T. Cvetković, J. Ranilović, D. Gajari, H. Tomić-Obrdalj, D. Šubarić, T. Moslavac, et al., "Podravka and slavonka varieties of pepper seeds (Capsicum annuum L.) as a new source of highly nutritional edible oil," Foods, vol. 9, no. 9, p. 1262, Sep. 2020. DOI: 10.3390/foods9091262
[17] M. Chouaibi, L. Rezig, S. Hamdi, y G. Ferrari, "Chemical characteristics and compositions of red pepper seed oils extracted by different methods," Industrial Crops and Products, vol. 128, pp. 363-370, Mar. 2019. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.11.030
[18] K. A. P. Regalado, J. E. V. Ontiveros, M. F. J. Cota, D. L. A. Pérez, and D. U. S. Ballardo, "Biorrefinería energética a partir de semilla residual de aguacate (Persea americana cv. 'Hass')," QUIBIOUAS Rev. Cienc. Quím. Biol., no. 2, pp. 23–34, 2024.
[19] J.G. Lezama-Rosas, B. Armenta-Medel, M.F. Juárez-Cota, D.A. Ambriz-Pérez, D.U. Santos-Ballardo, "Potencial Bioenergético de residuos agroindustriales de Chile poblano (Capsicum annum variedad poblano). Memorias de Congreso Cienergía UG 2023. 69-73.
[20] F. Monlau, E. Latrille, A. C. Da Costa, J. P. Steyer y H. Carrère, "Enhancement of methane production from sunflower oil cakes by dilute acid pretreatment," Applied Energy, vol. 102, pp. 1105–1113, Feb. 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.042
[21] A. Mohanty, P. R. Rout, B. Dubey, S. S. Meena, P. Pal y M. Goel, "A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes," Biomass Conversion and Biorefinery, vol. 12, núm. 3, pp. 949-966, Mar. 2022. DOI: 10.1007/s13399-021-01292-5.
[22] S. Chaikitkaew, P. Kongjan y O. Sompong, "Biogas production from biomass residues of palm oil mill by solid state anaerobic digestion," Energy Procedia, vol. 79, pp. 838-844, Nov. 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.575.

BIOGRAFÍAS



JANETH DANEL CASESUS Ingeniera en Energía, actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD). Su formación se ha enfocado en proyectos de energía limpia y sostenible, orientados a la mitigación del cambio climático. Autora de artículos de divulgación científica. Actualmente desarrolla su proyecto de investigación en el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de compuestos de alto valor agregado, bajo un enfoque de biorrefinería., con el objetivo de contribuir a la transición energética y al aprovechamiento integral de recursos en el sector agroindustrial



KARINA GONZÁLEZ RAMÍREZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables en la Universidad Autónoma del Estado de México. Acreedora del Diplomado en Educación Ambiental y los ODS por la UAEMex, UPN y el Ayuntamiento de Toluca. Mentora en el Programa Tecnolochicas y niñ@s STEAM dirigido a infantes y jóvenes mujeres para promover el interés y la participación en carreras tecnológicas y científicas. Miembro del SDG Student Hub de la UAEMex, voluntaria en diversas organizaciones ambientalistas y proyectos de impacto socioambiental en gobierno municipal.



GABRIELA AGUILAR-ZÁRATE Ingeniera Bioquímica en Recursos Acuáticos con Maestría en Ciencias. Investigadora Asociada en el Centro de Investigación en alimentación y Desarrollo A.C. subsede Mazatlán. Autora de publicaciones científicas. Colaboración en la como asesora de tesis de licenciatura y maestría e impartición de cursos. Participación en el desarrollo de proyectos de Investigación en Ecotoxicología y Procesamiento de residuos para obtener productos de valor. Experiencia en Bioquímica, principalmente análisis de plaguicidas por Cromatografía de gases.



KARLA D. LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral CONAHCYT en CIAD, unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), como candidato. Ha realizado investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su línea de investigación está dirigida al manejo sustentable de residuos orgánicos agroindustriales y a la generación de bioenergía, mediante el acoplamiento de bioprocesos.



MIGUEL BETANCOURT LOZANO Biólogo marino. Maestro en Ciencias Marinas y Doctor; Doctor en Ciencias por el Instituto de Acuacultura de la Universidad de Stirling, en Escocia. Investigador Titular C y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su investigación se centra en el desarrollo de herramientas ecotoxicológicas orientadas a relacionar la presencia, persistencia y toxicidad de contaminantes con posibles alteraciones en sistemas biológicos. Bajo una perspectiva multidisciplinaria, aborda diversos aspectos relacionados con la problemática ambiental de los ecosistemas costeros del noroeste mexicano. En este sentido su interés también recae en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante bioprocesos.



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigador Titular B de CIAD Unidad Mazatlán; Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación. así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

Recibido 26 de junio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Efecto de la fermentación de residuos agroindustriales sobre el crecimiento y el potencial metanogénico de subproductos (*frass*) del cultivo de larvas de *Hermetia illucens*

ANGELA JOANNE VILLELA-ROSAS[1£], VERÓNICA VANESSA HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ[1£], ERICK JOSUE NAVARRO-BARRÓN[1,2,3], BRUNO GÓMEZ-GIL[3], MIGUEL BETANCOURT-LOZANO[4], KARLA DENISSE LUNA-AVELAR[2,4*].

[1]Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Occidente. Mazatlán, Sinaloa, México.
[2]Estancias posdoctorales por México, SECIHTI. Ciudad de México, México.
[3]Laboratorio de Genómica Microbiana, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.
[4]Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.
*Autor de correspondencia: karla.luna@ciad.mx
£ Estos autores tuvieron el mismo nivel de participación en el trabajo

RESUMEN La inadecuada gestión de residuos agroindustriales representa un desafío ambiental y económico. Por lo que, el uso integral del plátano para cultivar larvas de *Hermetia illucens* surge como alternativa innovadora, ya que permite la producción de biomasa proteica y subproductos útiles como el *frass*, adecuado para generar energía renovable como el biogás. Por lo anterior, se evaluó el efecto de la fermentación de residuos de plátano como dieta experimental sobre el crecimiento y composición de larvas, y sobre el potencial metanógenico del *frass*, subproducto del cultivo. Obteniendo resultados de peso (265.8±65.8 mg) y contenido proteico (37.5±0.1%) más altos en larvas cultivadas con la dieta fermentada, que sin fermentar. Asimismo, se obtuvo una mayor producción de CH_4 (284.3±29.9 $mLCH_4 \cdot gSV^{-1}$) al emplear el *frass* pre-tratado. Esto sugiere una estrategia para valorizar residuos agroindustriales mediante su bioconversión en bioproductos y biocombustibles, bajo un enfoque de economía circular.

PALABRAS CLAVE—Residuos de plátano, fermentación, larvas de mosca soldado negro, *frass*, potencial metanogénico.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión ineficiente de los desechos agroindustriales representa una problemática ambiental y económica de gran relevancia [1]. Puesto que, la acumulación de residuos provenientes de la agricultura, la pesca y la industria alimentaria contribuye significativamente a la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de generar pérdidas económicas por el desaprovechamiento de recursos potencialmente útiles [2].

Según reportes de la SADER, durante el 2024, se produjeron 2,642 toneladas de productos agrícolas. Del total reportado, los estados de Chiapas, Tabasco y Veracruz se han posicionado como los principales productores de plátano, al cultivar casi más de la mitad de la producción nacional del fruto. Es importante resaltar que, de la producción de plátano reportada, en México, se desperdicia alrededor del 53.76% [3, 4]. Lo anterior se debe al descarte por incumplimiento de los estándares de calidad requeridos para su comercialización. Asimismo, se genera una cantidad considerable de residuos de plátano, principalmente compuestos por frutos completos y cáscaras provenientes del consumo en restaurantes, hogares y centros educativos [5].

En este sentido, el uso de residuos agroalimentarios, como el plátano, en el cultivo de larvas de *Hermetia illucens*, conocidas comúnmente como mosca soldado negra (MSN), representa una estrategia innovadora para la gestión de desechos y la generación de biomasa de alto valor proteico [6]. Además, se ha demostrado que la fermentación de estos residuos con *Saccharomyces cerevisiae*, no solo acelera la descomposición de la materia orgánica, sino que también mejora la biodisponibilidad de los nutrientes, lo que favorece el crecimiento de las larvas MSN y optimiza la producción de biomasa [5]. Por lo que, emplear plátano fermentado como dieta para cultivar larvas MSN podría incrementar, aún más, su contenido de proteínas y grasas. Esto ofrecería una alternativa económica y sostenible para las industrias ganadera y acuícola en la elaboración de piensos [7,8].

Por otro lado, aprovechar los subproductos de dicho bioproceso, tales como el *frass*, compuesto de exoesqueletos, excremento y residuos del sustrato, como alimento durante el cultivo de MSN, aporta un valor ambiental significativo. Puesto que este residuo puede utilizarse como biofertilizante, enriqueciendo los suelos agrícolas, o como sustrato para la producción de biogás, impulsando así, el uso de energías renovables. De esta manera, el proyecto no solo comprende la gestión eficiente de desechos agroindustriales, sino que también fomenta una producción agropecuaria más sostenible y promueve la adopción de energías verdes, en línea con los principios de la economía circular [9].

Durante los últimos años, se ha reportado con mayor frecuencia el uso de residuos orgánicos como fuentes de energía renovable. Según un estudio realizado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE), México cuenta con una gran variedad de residuos biomásicos, entre ellos, los agroalimentarios pueden contribuir como fuente de materia prima disponible para la producción de energía renovable, en forma de biogás, mediante la digestión anaerobia (DA) [10]. Adicionalmente, en los últimos años, las larvas MSN han demostrado rendimientos prometedores en la remoción de materia orgánica y en la capacidad de bioacumulación de compuestos bioactivos de interés comercial, que proporcionan beneficios ambientales en el ciclo de nutrientes del suelo y de las plantas [11].

Con base en lo anterior, se presenta esta investigación como una alternativa para valorizar residuos agroindustriales, a partir de la aplicación de bioprocesos acoplados: fermentación, degradación con MSN y digestión anaeróbica, con la finalidad de potenciar la generación de bioproductos y biocombustibles, en beneficio del medio ambiente. Para ello, se evaluó el efecto de la fermentación de residuos de plátano con *Saccharomyces cerevisiae* sobre la producción y composición de biomasa larval, y sobre el potencial metanogénico de subproductos (*frass*) del cultivo de MSN.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Diseño de experimento de dietas y cría de larvas.

Se recibió una donación de larvas MSN por parte de la productora de alimentos CICLICA. Posteriormente, las larvas fueron criadas en el CIAD Mazatlán bajo condiciones controladas de temperatura de incubación a 27.5°C, humedad relativa del 60 - 70%, y alojadas en charolas de cierre hermético con sistema de ventilación, garantizando así un ambiente óptimo para su desarrollo.

Se evaluaron dos tratamientos experimentales utilizando residuos de pulpa de plátano y levaduras comerciales de *Saccharomyces cerevisiae*. El primer tratamiento (T100) consistió en pulpa de plátano sin fermentar, mientras que el segundo (T100F) empleó pulpa de plátano fermentada con *Saccharomyces cerevisiae*. Para cada tratamiento se establecieron tres réplicas, utilizando 300 larvas por unidad experimental. El peso promedio inicial de las larvas fue de 15 - 20 mg, las cuales fueron cultivadas bajo las condiciones anteriormente descritas a los 6 días post-eclosión (DPE).

A cada unidad experimental se le proporcionaron 250 g de la dieta establecida, la cual fue suministrada tres veces durante un periodo experimental de 15 días. La recolección de datos biométricos se realizó en los días 6, 8, 10, 12, 14 y 16, evaluando de manera aleatoria el 10 % de la población de larvas MSN en cada réplica. Luego, se registró su peso en miligramos, con el objetivo de analizar el crecimiento de las larvas entre los tratamientos.

2. Determinación de la composición proximal de las larvas MSN

Los análisis proximales se realizaron para determinar la composición básica y el contenido nutricional de las larvas MSN, utilizando muestras por triplicado para cada dieta experimental, según la metodología [12].

Para la determinación de materia seca y humedad, se empleó el método de secado en horno. Este consistió en pesar 5 g de larvas previamente maceradas en charolas de aluminio, las cuales fueron colocadas en un horno a 105 °C durante 5 horas. La humedad se calculó por diferencia de peso entre la muestra húmeda y la seca Ec. (1). Donde: a = peso del crisol [g], b = peso de la muestra húmeda [g], c = peso del crisol + muestra seca [g].

$$\%\,Humedad = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \qquad (1)$$

Para la determinación del contenido de ceniza, se utilizaron crisoles de porcelana, en los cuales se colocaron 2.5 g de la muestra seca. Posteriormente, los crisoles se llevaron a la mufla para su calcinación a 550 °C durante 6.5 h. El cálculo del porcentaje de ceniza se realizó con base en la Ec. (2), donde: a = peso del crisol con la muestra calcinada [g], b = peso del crisol vacío [g] y c = peso de la muestra seca [g].

$$\%\,Ceniza = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \qquad (2)$$

Adicionalmente, se realizó la determinación del contenido de grasa (lípidos) presente en las muestras mediante el método de Soxhlet, Ec. (3). Para ello, se colocaron 0.5 g de muestra de larvas en cartuchos de papel filtro Whatman. Posteriormente, se utilizaron 90 mL de éter de petróleo como solvente, vertidos en vasos de aluminio previamente pesados. Donde: a = peso constante del vaso [g],

b = peso del vaso con grasa (después de la extracción) [g], y c = peso de la muestra [g].

$$\%\,Lípidos = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \qquad (3)$$

Para la determinación de proteína mediante el método micro-Kjeldahl, utilizado para cuantificar el nitrógeno en muestras, el procedimiento se dividió en tres etapas, considerando las muestras por triplicado:

A. Digestión: se mezclaron 0.1–0.5 g de muestra con 1 g de catalizador (K_2SO_4 y $CuSO_4$ o selenio) y 10 mL de H_2SO_4 concentrado hasta clarificación completa
B. Destilación: se adicionaron 10 mL de NaOH para liberar NH_3, el cual se destiló y capturó en ácido bórico al 3% con indicador
C. Titulación: se valoró con HCl o H_2SO_4 estándar hasta el viraje del indicador (de azul verdoso a rosado) [12].

Los valores de proteína se obtuvieron mediante la Ec. (4):

$$\%\,proteína = (Gasto\ HCl_{muestra} - Gasto\ HCl_{blanco}) * N * 14.007 * 100 * 6.25 \qquad (4)$$

3. Evaluación de la producción de biogás

a. Obtención de sustratos e inóculo.

Los sustratos consistieron en el *frass* colectado de ambos cultivos de larvas MSN, es decir, *frass* colectado de larvas cultivadas con dieta de plátano no fermentada (*f*-T100) y *frass* colectado de larvas cultivadas con dieta de plátano fermentada con *Saccharomyces cerevisiae* (*f*-T100F). Mientras que, el inóculo consistió en lodo activado colectado de un digestor anaeróbico que procesa estiércol de ganado vacuno, de la empresa de biofertilizantes BeGaia®, ubicada en Escamillas, Sinaloa, México.

b. Caracterización de sustratos e inóculo.

Previo al experimento de DA, se realizó la caracterización, tanto de los sustratos como del inóculo, mediante la determinación de sólidos totales (ST), % humedad, sólidos volátiles (SV) y cenizas o sólidos fijos (SF), siguiendo cada una de las metodologías estandarizadas [12].

Para la determinación de ST, los crisoles fueron sometidos a 105 °C durante 24 h en el horno hasta alcanzar peso constante, posteriormente se dejaron enfriar en un desecador y se registró su peso (W_{crisol}). Luego, se añadieron 1.5 g de cada sustrato y 10 g de muestra correspondiente al inóculo (INO), y se registraron sus pesos ($W_{muestra}$), posteriormente las muestras se secaron a 105 °C por 24 h, pasado ese periodo, se registró el peso seco (W_{total}). Para determinar el porcentaje de ST se utilizó la Ec. (5).

$$\%ST = \frac{Wtotal - Wcrisol}{Wmuestra - Wcrisol} x100 \qquad (5)$$

El contenido de humedad (%) se calculó con la diferencia de porcentaje de los ST, empleando la Ec. (6)

$$\%H = 100\% - \%ST \qquad (6)$$

Para la determinación de SV y SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron en una mufla a 550°C durante 2 h, posteriormente fueron pesados y registrados. Los resultados de SV y SF se calcularon con las ecuaciones: Ec. (7) y Ec. (8). Todas las pruebas se realizaron por triplicado y los resultados se presentaron como porcentaje promedio y su desviación estándar.

$$\%SV = \frac{Wtotal - Wvolátil}{Wtotal - Wcrisol} x100 \qquad (7)$$

$$\%SF = \frac{Wvolátil - Wcrisol}{Wtotal - Wcrisol} x100 \qquad (8)$$

c. Evaluación del potencial metanogénico

La evaluación del potencial metanogénico de cada *frass* recolectado del cultivo de larvas se realizó por triplicado. Para ello, se utilizaron reactores de 120 mL con un volumen de trabajo de 70 mL, sellados herméticamente y equipados con un septo para punción y medición directa del volumen de biogás producido. La producción de biogás también se realizó mediante un manómetro SMC ISE20-P que mide la presión dentro del biorreactor (MPa). Paralelamente, se empleó eudiometría con una solución de hidróxido de sodio 1 N para medir el desplazamiento del gas, es decir, la fracción de gas metano (CH_4) producido.

Paralelamente, se monitorearon controles negativos que contenían solo inóculo para la corrección del metano residual, así como controles positivos adicionados con celulosa. Los reactores fueron colocados en una incubadora con agitación de 150 rpm a una temperatura de 37 ± 1 °C, durante 47 días.

4. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos aplicados a los tratamientos T100 y T100F se realizaron en el software RStudio ®, con la prueba ANOVA test ($p \geq 0.05$). Las variables respuesta de los análisis proximales fueron: el peso [g] de las larvas y contenido de lípidos y proteínas (%); y del PM: la producción de metano (mL CH_4 • gSV^{-1}). Adicionalmente, se realizó el ajuste al modelo de Gompertz modificado con los resultados experimentales de la producción acumulada de CH_4 en el software SigmaPlot 12.5®.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LARVAS CON LAS DIETAS T100 Y T100F

El peso larval aumentó a medida que avanzaron los DPE. El tratamiento T100F presentó un peso significativamente mayor en varios puntos del desarrollo, especialmente a los 12 y 14 DPE (Fig. 1). Se obtuvo que, el crecimiento en el T100 fue de 148.72 ± 70.59 mg, mientras que el peso promedio en T100F fue de 265.79 ± 65.82 mg, además, se realizó un ANOVA de un factor para evaluar el efecto de los tratamientos sobre el peso promedio de las larvas. Los resultados indicaron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p = 1.26 \times 10^{-21}$), lo que sugiere que la dieta tuvo un efecto considerable en el crecimiento larval.

Los resultados mostraron un incremento progresivo en el peso larval a medida que pasaron los DPE, lo cual es consistente con el patrón natural de crecimiento de larvas MSN [10]. Además, se observaron diferencias significativas entre tratamientos en varios puntos del desarrollo, destacando que el tratamiento T100F promovió un mayor peso promedio en comparación con T100, especialmente en los 12 y 14 DPE [13]. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que reportan mejoras en el rendimiento larval cuando se incorporan levaduras fermentadas o aditivos microbianos en la dieta. Esto sugiere que la fermentación de la dieta T100F pudo haber mejorado la disponibilidad de nutrientes o la palatabilidad del sustrato, favoreciendo la eficiencia alimentaria y la acumulación de biomasa larval [13, 14].

2. COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LARVAS MSN

Los resultados de la composición proximal (Tabla I) presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en los contenidos de proteína y lípidos. El tratamiento T100F presentó un mayor contenido de proteína (37.50 ± 0.10^{b} %) comparado con T100 (32.69 ± 0.10^{a} %). Por el contrario, el contenido de lípidos fue significativamente mayor en T100 (51.36 ± 0.37^{b} %), respecto a T100F (43.62 ± 0.83^{a} %).

Estos resultados se pueden contrastar con lo reportado por Holeh y colaboradores [15], quienes obtuvieron 51.52 ± 0.01 % de proteína al alimentar larvas con una mezcla de residuos de plátano y papa, siendo un valor mayor que el del presente estudio en ambos tratamientos. Respecto a la fracción lipídica, los valores de ambos tratamientos obtenidos en esta investigación fueron mayores a lo reportado por Nyakeri y colaboradores (27.2%), quienes emplearon residuos orgánicos de frutas, para alimentar a las larvas MSN [16]. Preliminarmente, la biomasa larval obtenida de T100F presentó un mayor contenido de proteína, ELN y humedad, mientras que T100 favoreció la acumulación de lípidos. Lo anterior sugiere que existen diferencias en la disponibilidad energética y de nutrientes de la dieta [17]. Estas variaciones demuestran el efecto significativo que presenta el tipo de dieta sobre la composición nutricional de MSN [18]. Por su parte, el contenido de cenizas fue similar en ambos tratamientos. Estos resultados destacan el potencial de MSN como ingrediente proteico alternativo en alimentación animal, cuya composición puede modularse mediante estrategias de alimentación [17, 18].

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO

En la Tabla II, se muestra el contenido de ST y SV de los sustratos analizados; se puede observar que ambas muestras presentan altos valores de SV, relevantes para el proceso de DA, dado que dan un indicio de la cantidad de materia orgánica presente en los sustratos y que posiblemente se transforme en biogás.

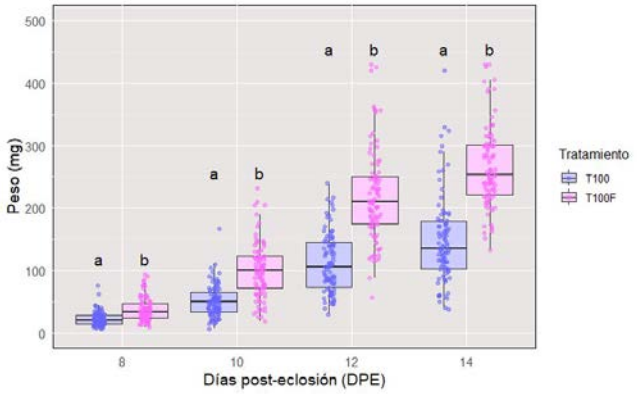


Fig. 1. Peso promedio (mg) de larvas MSN alimentadas con los tratamientos T100 y T100F a distintos DPE. Las cajas muestran el promedio, los cuartiles y la dispersión de los datos; los puntos representan los valores individuales. Letras distintas (a, b) indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cada tiempo ($p < 0.05$; ANOVA post hoc Tukey).

TABLA I. COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LARVAS MSN ALIMENTADAS CON DOS TRATAMIENTOS DIETÉTICOS (T100 Y T100F).

Parámetros	T100	T100F
Humedad	72.43 ± 2.81	76.59 ± 4.60
Proteína	32.69 ± 0.10^{a}	37.50 ± 0.10^{b}
Lípidos	51.36 ± 0.37^{b}	43.62 ± 0.83^{a}
ELN	12.02 ± 0.61	15.15 ± 0.53
Ceniza	3.43 ± 0.25	3.37 ± 0.26

Los valores representan el promedio de las tres réplicas ± desviación estándar. T100: dieta compuesta de residuos de plátano; T100F; dieta compuesta de residuos de plátano fermentados ELN: Extracto Libre de Nitrógeno. ANOVA Post Hoc Tukey en Proteína: $p = 4.72 \times 10^{-7}$; ANOVA Post Hoc Tukey en Lípidos: $p = 9.76 \times 10^{-5}$).

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO EMPLEADO EN DA.

Sustrato	%ST	%H	%SV	%SF
f-T100	17.35 ± 0.77	5.25 ± 0.47	94.39 ± 0.24	5.61 ± 0.24
f- T100F	21.14 ± 0.40	78.86 ± 0.40	94.75 ± 0.47	82.65 ± 0.77
INO	7.47 ± 0.90	92.53 ± 0.90	58.68 ± 0.43	41.35 ± 0.43

Los valores representan el promedio de las tres réplicas ± desviación estándar. ST: sólidos totales, SV: sólidos volátiles, SF: sólidos fijos, H: humedad.

De acuerdo con varios estudios, un contenido de SV superior al 50% es viable para la digestión anaerobia para la producción de metano [19].

4. POTENCIAL METANOGÉNICO

La producción de biogás se detectó desde el primer día de experimentación entre ambos tratamientos. En la Fig. 2, se puede observar la producción acumulada de CH_4 de cada tratamiento, dónde la tendencia fue similar durante los primeros 7 días. A partir de entonces, se puede observar un muy ligero aumento en la producción de CH_4 del tratamiento *f*-T100F, pero fue hasta el día 23 que el aumento observado fue significativo, manteniendo una fase de latencia muy larga, de aproximadamente 23 días.

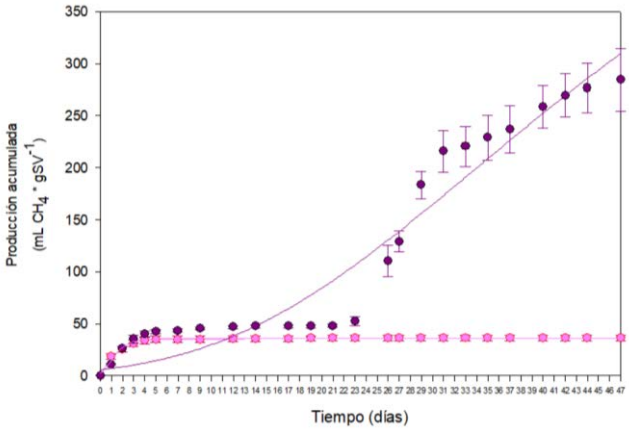


Fig. 2. Producción de CH_4 acumulada de *f*-T100 (●) y *f*-T100F (●). La línea sólida representa el ajuste al modelo de Gompertz modificado.

Asimismo, se puede observar en la Tabla III los valores de la producción acumulada de CH_4 experimental de cada uno de los tratamientos. En dicha tabla, se muestra que en el tratamiento de *f*-T100F presentó una mayor producción de CH_4, a pesar de la baja producción registrada durante los primeros días (14-18), mientras en el tratamiento de *f*-T100 se mantuvo con menor producción.

TABLA III. PRODUCCIONES ACUMULADAS Y PORCENTAJE DE METANO CONTENIDO EN EL BIOGÁS GENERADO.

Sustrato	Producción acumulada experimental (mL CH_4 • g SV^{-1})	Producción acumulada estimada (mL CH_4 • g SV^{-1})	% CH_4
f-T100	36.09 ± 2.47^{b}	35.67	54.12 ± 0.80
f- T100F	284.34 ± 29.89^{a}	539.66	59.33 ± 1.50

Los valores representan el promedio de 3 réplicas ± desviación estándar. Letras distintas (a, b) indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$, n=3; ANOVA post hoc Tukey).

En cuanto al CH_4 generado, el tratamiento *f*-T100 presentó un 54 % de CH_4, mientras que *f*-T100F obtuvo un valor de 59 %. Estos valores indican que ambos tratamientos de *frass* pueden ser considerados como una opción viable para generar biogás apto para ser empleado como combustible, ya que son superiores a lo reportado en la literatura > 45 % CH_4 [18]. Respecto a los valores de CH_4 reportados en la literatura, se han realizado estudios donde emplean residuos orgánicos de tomate como sustrato para la producción de biogás como fuente de energía renovable, en los cuales han reportado valores cercanos a los del presente estudio, de 46.16% en el biogás producido [19]. Por otra parte, un estudio realizado por Łochyńska y Frankowski en el año 2018, reportó una producción de biogás con 50.4% de CH_4 usando excremento de gusanos de seda previamente fermentado [20].

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que el tratamiento de *frass* fermentado por *Saccharomyces cerevisiae* presentó la mayor producción de CH_4 (59 %). Lo que sugiere que aplicar pretratamientos biológicos con esta levadura, podría generar un aumento en el potencial metanogénico del *frass* o del sustrato seleccionado.

Por otro lado, se ha encontrado que los residuos de plátano poseen valores de humedad mayores al 80 % óptimos para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia [21]. Sin embargo, otros estudios han reportado que los residuos orgánicos con una humedad superior al 50 % pueden ser un problema para la producción de biogás por otros métodos fisicoquímicos, debido a la poca materia prima disponible. Por lo tanto, el implementar varios pretratamientos a este tipo de sustratos podría optimizar la producción de biogás y la generación de metano [22].

No obstante, se ha reportado que *Saccharomyces cerevisiae* es una levadura que puede usarse como un iniciador en la producción de biogás, al propiciar la degradación de la fibra y estimular el crecimiento de bacterias y hongos celulolíticos, así como modificar el pH en los digestores mediante la producción de ácidos orgánicos, compuestos intermediarios para la producción de CH_4 por medio de arqueas metanogénicas [23].

Considerando que el tratamiento *f*-T100F superó el valor de la producción de biogás del tratamiento *f*-T100, esto podría indicar que *Saccharomyces cerevisiae* cumple un papel fundamental en la descomposición de residuos orgánicos, facilitando, en primera instancia, la degradación de la dieta por las larvas MSN, y en segunda, aumentando la producción de biogás. Sin embargo, cabe la posibilidad de que el proceso de degradación de residuos de plátano sin fermentar, empleando larvas MSN podría conservar o generar ciertos compuestos que inhiben el proceso anaeróbico, como en el caso de este estudio, observado en el tratamiento *f*-T100.

5. ACOPLAMIENTO DE BIOPROCESOS: FERMENTACIÓN-MSN-DA

En la Fig. 3 se muestra una comparación de los diferentes escenarios propuestos para la generación de bioproductos y biocombustibles con valor comercial, obtenidos a partir de la valorización de residuos agroalimentarios al acoplar bioprocesos, bajo un enfoque de economía circular.

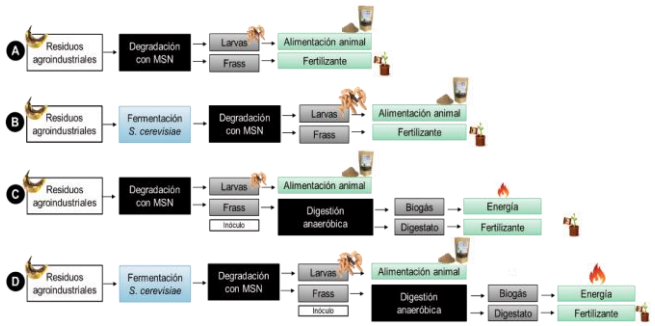


Fig. 3. Esquema de posibles estrategias de tratamientos para residuos de alimentos.

El escenario ideal (D) podría dar lugar a la generación de tres bioproductos: primero, i) el cultivo de larvas MSN permitirá el crecimiento de éstas para producir biomasa larval, que, a su vez, puede ser potenciado al fermentar la dieta suministrada; asimismo, permitiría la generación de *frass*, subproducto del cultivo que puede emplearse como sustrato en la DA, para obtener a su vez, (ii) biogás y (iii) digestato, éste último es un residuo de la DA que puede ser usado como fertilizante líquido. La recomendación es aprovechar la biomasa larval para elaborar harina rica en nutrientes para alimentación animal, emplear el biogás como combustible o energía renovable, y usar el digestato como fertilizante líquido o biomejorador de suelos, tomando ventaja de su microbiología. Finalmente, esta investigación tiene potencial como precedente a futuros trabajos que promuevan la fermentación de residuos agroalimentarios como exploración de biomasas para la generación de energías renovables, así como el uso de pre-tratamientos que aumenten la producción de biogás, bajo un enfoque de cero residuos.

IV. CONCLUSIONES

El aumento de peso larval en MSN progresó a medida que avanzaron los DPE, registrándose la mayor diferencia ($p < 0.05$) entre tratamientos en los DPE 12 y 14. Al finalizar el cultivo, las larvas alcanzaron pesos de 148.72 ± 70.59 mg y 265.79 ± 65.82 mg en los tratamientos T100 y T100F, respectivamente. Destacando que, probablemente, la fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* incrementó la biodisponibilidad de nutrientes en la pulpa de plátano, potenciando la biomasa larval y mejorando los perfiles nutricionales. Esto se reflejó en los contenidos de proteína (37.50 ± 0.10 %) y de lípidos (43.62 ± 0.83 %), en larvas MSN cultivadas con una dieta previamente fermentada. En cuanto al empleo del *frass* generado en los cultivos de larvas para producir biogás, se observó que el usar *Saccharomyces cerevisiae* como pretratamiento fermentativo (biológico), acoplado a la degradación con larvas de MSN, tiene un efecto positivo sobre el potencial metanogénico, ya que aumentó 15 veces más la producción de CH_4 con un valor de 284.34 ± 29.89 mL CH4 • g SV^{-1}, así como se hace la sugerencia de complementar el estudio al analizar los digestatos de los reactores posteriores a la DA.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán por el apoyo en el desarrollo de esta investigación, a la productora de alimentos CICLICA por la donación de larvas *H. illucens* utilizadas en el estudio, a la empresa BeGaia S.A de C.V por la donación de lodos para las pruebas de DA , a la M.C. Erika Yazmin Sánchez Gutiérrez y a la M.C. Francis Isela Marrujo López, por el apoyo en los análisis bromatológicos y determinaciones fisicoquímicas, al alumno Julio César Méndez Zamudio, por el apoyo en la fase experimental del estudio en el cultivo de larvas, así como en la realización de análisis proximales.

VI. REFERENCIAS

[1] C. Liu, C. Wang y H. Yao, "Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae)," *Animals*, vol. 9, no. 6, pp. 349–349, Jun., 2019. DOI: 10.3390/ani9060349

[2] M. Renna, L. Gasco, L. Livorsi, M. Mele, G. Conte, M. Meneguz y C. Lussiana, "Growth performance, proximate composition and fatty acid profile of black soldier fly larvae reared on two grape pomace varieties," *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, vol. 18, no. 8, pp. 101240–101240, Aug., 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101240, [Online].

[3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Manos que dan de comer: Qué hay detrás de la producción de plátano," *Gob.mx*, 2025. Disponible en: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/manos-que-dan-de-comer-que-hay-detras-de-la-produccion-de-platano?idiom=es, [Online].

[4] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Panorama Agroalimentario: la ruta de la transformación agroalimentaria 2018-2024. p120-12. 2024. https://online.pubhtml5.com/rsarc/ywrn/

[5] O. Patiño-Rodríguez, E. Agama, L. A. Bello-Pérez y D. Chavarria-Bolaños, "Alternativas para el aprovechamiento de subproductos agrícolas: plátano y mango," en *Aprovechamiento de subproductos de la Industria Alimentaria para la Obtención de Compuestos Bioactivos*, pp. 375–404, AGT Editor, S.A./CIAD/UAS, Jun., 2018. [Online].

[6] F. Ijdema, S. Lievens, R. Smets, G. Poma, M. Van Der Borght, B. Lievens y J. De Smet, "Modulating the fatty acid composition of black soldier fly larvae via substrate fermentation," *Animal*, vol. 19, no. 1, pp. 101383–101383, Jan., 2025. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101383, [Online].

[7] J. C. Ramírez Ramírez, A. Ortiz Luviano, J. A. López Rivas, B. Parra Pacheco y J. F. García Trejo, "Efecto de la fuente de proteína dietaria sobre el cultivo de larva de mosca soldado negra," *Emprennova*, vol. 2, no. 4, pp. 73–79, Dec., 2022. [Online].

[8] Heuel, C. Sandrock, F. Leiber, A. Mathys, M. Gold, C. Zurbrüegg, I. D. M. Gangnat, M. Kreuzer y M. Terranova, "Black soldier fly larvae meal and fat as a replacement for soybeans in organic broiler diets: effects on performance, body N retention, carcase and meat quality," *British Poultry Science*, vol. 63, no. 5, pp. 650–661, Oct., 2022. DOI: 10.1080/00071668.2022.2053067, [Online].

[9] I. M. Bermúdez-Serrano y O. A. Sánchez-Velázquez, "Comprehensive utilization of the Black Soldier Fly: Bioconversion, sustainability, and emerging challenges," *Scientia Agropecuaria*, vol. 14, no. 4, pp. 571–590, Oct., 2023. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2023.047, [Online].

[10] N. E. A. Basri, N. A. Azman, I. K. Ahmad, F. Suja, N. A. A. Jalil y N. F. Amrul, "Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of Food Waste: A Review," *Foods (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 17, pp. 2664–2664, Sep., 2022. DOI: 10.3390/foods11172664, [Online].

[11] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), "Estudio del Potencial de Biomasa en México," 2018. Disponible en: https://www.conuee.org.mx/index.php/component/k2/item/367-estudio-del-potencial-de-biomasa-en-mexico, [Online].

[12] American Public Health Association (APHA), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, DC, 1999. [Online].

[13] R.T. Herrera-Álvarez, V.M. Montes-Núñez, D. Santos-Ballardo, M. Betancourt-Lozano, B. Gómez-Gil, E. Navarro Barrón y K. Avelar, "Evaluación del potencial metanogénico de frass de *Hermetia illucens* pre-tratada con *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus acidophilus*," *Revista Identidad*, vol. 7, pp. 104–109, Jan., 2024. [Online].

[14] M. Ciani, F. Comitini, I. Mannazzu y P. Domizio, "Controlled mixed culture fermentation: a new perspective on the use of non-*Saccharomyces* yeasts in winemaking," *FEMS Yeast Research*, vol. 10, pp. 123–133, Feb., 2019. [Online].

[15] G. Holeh, M. Opiyo, C. Brown, E. Sumbule, J. Gatagwu, E. Oje y F. Munyi, "Effect of different waste substrates on the growth, development and proximate composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 34, pp. 1–11, Jan., 2022. [Online]

[16] E. Nyakeri, H. Ogola, M. Ayieko y F. Amimo, "Valorisation of organic waste material: Growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes," *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, pp. 1–10, Jan., 2017. DOI: 10.3920/JIFF2017.0004, [Online].

[17] M. Zulkifli, A. Y. Seok-Kian, L. L. Seng, S. Mustafa, Y. S. Kim y R. Shapawi, "Nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processed by different methods," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 2, pp. e0263924–e0263924, Feb., 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.026392, [Online].

[18] L. Loho y D. Lo, "Proximate and fatty acid analysis of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*)," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1169, no. 1, pp. 012082–012082, Jan., 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1169/1/012082, [Online].

[19] R. Castro Rivera, M. M. Solís Oba, V. Chicatto Gasperín y A. Solís Oba, "Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 36, no. 3, pp. 529–539, May., 2021. DOI: 10.20937/rica.53545, [Online].

[20] M. Łochyńska y J. Frankowski, "The biogas production potential from silkworm waste," *Waste Management*, vol. 79, pp. 564–570, Sep., 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.019, [Online].

[21] R. Divyabharathi, R. Angeeswaran, K. Jagadeeshkumar y S. Pugalendhi, "Characterization and Batch Anaerobic Digestion Study of Banana Wastes," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 2307–2315, Jul., 2017. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.607.331, [Online].

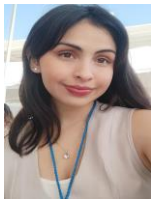
[22] F. J. Ngabala y J. K. Emmanuel, "Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion—an alternative energy source," *Heliyon*, vol. 10, no. 23, pp. e40632–e40632, Jan., 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40632, [Online].

[23] T. R. Lestari, G. L. Utama y A. B. Susanto, "Treatment of *S. cerevisiae* and dairy cow manure on organic waste for biogas production," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 483, no. 1, pp. 012032–012032, Jan., 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/483/1/012032, [Online].

BIOGRAFÍAS



ÁNGELA JOANNE VILLELA ROSAS Licenciada en Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Mazatlán. Su principal interés se centra en la investigación y difusión científica acerca de biocombustibles aprovechando el uso de residuos agroalimentarios. Actualmente, trabaja en un proyecto de investigación para optimizar la producción de biogás por medio de residuos orgánicos que puedan promover una estrategia dentro de la economía circular.



VERÓNICA VANESSA HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ Licenciada en Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Mazatlán. Sus intereses dentro del ámbito de la investigación se centran en el manejo de organismos modelo, en este caso la mosca soldado-negra, Hermetia illucens, considerando sus potenciales dentro del manejo ambiental y Aprovechamiento como fuente de proteínas animales de uso alterno.



ERICK J. NAVARRO BARRÓN Ingeniero Bioquímico con maestría y doctorado en Ciencias con un enfoque en Microbiología. Actualmente, se desempeña como Investigador Posdoctoral de CONAHCYT en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Mazatlán y como docente en la Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO). Su trayectoria de investigación se centra en la microbiología, con un énfasis particular en estudios metagenómicos mediante el uso de tecnologías de secuenciación de nueva generación y bioinformática. Actualmente, su línea de investigación se centra en la relación del microbioma con la salud y en el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de proteína animal de alta calidad mediante el cultivo de la mosca soldado negro (MSN) y su relación con el microbioma.



BRUNO GÓMEZ GIL RODRÍGUEZ SALA Biólogo egresado de la Facultad de Ciencias, UNAM. Maestro en Ciencias del Mar en el área de Oceanografía Biológica y Pesquera y Doctor in Philosophy, University of Stirling, UK. Profesor Investigador Titular D en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Mazatlán, y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su interés en la investigación se centra en la diversidad de bacterias en ambientes acuáticos a través de un enfoque metagenómico y actualmente su investigación también se dirige al estudio de la biodiversidad de bacterias en sistemas de bioprocesos acoplados.



MIGUEL BETANCOURT LOZANO Biólogo marino. Maestro en Ciencias Marinas y Doctor; Doctor en Ciencias por el Instituto de Acuacultura de la Universidad de Stirling, en Escocia. Investigador Titular C y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su investigación se centra en el desarrollo de herramientas ecotoxicológicas orientadas a relacionar la presencia, persistencia y toxicidad de contaminantes con posibles alteraciones en sistemas biológicos. Bajo una perspectiva multidisciplinaria, aborda diversos aspectos relacionados con la problemática ambiental de los ecosistemas costeros del noroeste mexicano. En este sentido su interés también recae en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante bioprocesos.



KARLA DENISSE LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral CONAHCYT en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), como candidata, y es miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigadora Honorífica. Ha realizado investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su línea de investigación está dirigida al manejo sustentable de residuos orgánicos agroindustriales y a la generación de bioenergía, mediante el acoplamiento de bioprocesos.

Recibido 26 de junio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Análisis del potencial metanogénico de residuos agroindustriales de semillas de chile mirasol (*Capsicum annuum* var. mirasol)

KARINA GONZÁLEZ RAMÍREZ[1], JANETH DANEL CASESUS [2], KARLA DENISSE LUNA-AVELAR [2,3], MIGUEL BETANCOURT-LOZANO[2], LILIANA IVETTE ÁVILA-CÓRDOBA[1], DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO[2*]

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México.
[2]Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.
[3]Estancias posdoctorales por México, SECIHTI-CIAD Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: ulises.ballardo@ciad.mx

RESUMEN La Digestión Anaeróbica (DA) se considera eficiente para el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos. En el contexto de la economía circular, la DA es clave para la revalorización de residuos agroindustriales, como las semillas generadas en la producción y procesamiento de chile. El estudio evalúa el potencial metanogénico de semillas residuales de chile mirasol probando tres tipos de inóculos. Los resultados indicaron que el inóculo con mayor rendimiento alcanzó una producción acumulada de 856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV. En contraste, los inóculos restantes mostraron producciones considerablemente menores (entre 486.28 ± 15.69 y 503.19± 17.54 mL CH_4/gSV). Se realizó el ajuste de la cinética del proceso mediante un modelado de la producción acumulada utilizando el modelo de Gompertz modificado, permitiendo estimar la tasa máxima de producción teórica y el tiempo de latencia. Estos resultados aportan información valiosa para optimizar la gestión de residuos agroindustriales mediante la producción de biogás.

PALABRAS CLAVE — Biogás, digestión anaeróbica, modelo de Gompertz modificado, residuos agroindustriales, semillas de chile mirasol.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la creciente generación de residuos del sector agroindustrial representa un desafío significativo a nivel mundial, tanto desde una perspectiva medioambiental como socioeconómica [1, 2]. Estos residuos, provenientes de la transformación y procesamiento de productos agrícolas, suelen ser subutilizados o desechados inadecuadamente, lo que contribuye a la contaminación del suelo, agua y aire [1], además de implicar un desaprovechamiento de materiales que poseen un considerable potencial de valorización, lo que podría traducirse en beneficios económicos, energéticos o incluso alimentarios [3, 4].

De acuerdo con lo reportado por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, Food and Agriculture Organization) de las Naciones Unidas, a nivel global se desperdician aproximadamente 1.3 mil millones de toneladas de alimentos cada año, de las cuales, cerca de 998 millones de toneladas corresponden a los residuos agrícolas mal gestionados [5], lo que evidencia la urgencia de implementar estrategias de gestión sostenible y valorización de residuos [6]

Particularmente, para el sector agroindustrial mexicano dedicado al procesamiento de chiles, como la variedad mirasol (Capsicum annuum var. mirasol), se genera una cantidad considerable de residuos durante la etapa de secado, donde las semillas, pieles deterioradas y fragmentos del pericarpio suelen descartarse como desechos sin un tratamiento adecuado [7]. Estos subproductos poseen características fisicoquímicas con potencial para ser aprovechados para la generación de bioenergía, extracción de compuestos bioactivos, materia prima para compostaje o alimentación animal [8].

Cabe destacar que el chile es uno de los cultivos más emblemáticos y de mayor importancia cultural, gastronómica y económica en México. El país se posiciona como uno de los principales productores y consumidores de chile a nivel mundial, con una diversidad de especies cultivadas y una industria robusta de transformación, exportación y comercialización. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, al cierre de 2023 se reportó una producción que superó 3,000, 237 mil toneladas. No obstante, a pesar de su relevancia, los residuos derivados del procesamiento del chile siguen siendo escasamente investigados y subvalorados [9, 10].

Esta falta de valorización no solo implica un problema de gestión de residuos, sino que además genera impactos

ambientales negativos, como la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación de cuerpos de agua por lixiviación y la pérdida de recursos potencialmente utilizables [1, 11]. Asimismo, se desaprovechan oportunidades de desarrollo económico local y de generación de valor en comunidades productoras [5].

En este contexto, la Digestión Anaeróbica (DA) se presenta como un proceso biotecnológico de carácter sostenible, capaz de convertir residuos orgánicos en biogás. Este mecanismo se basa en la acción conjunta de comunidades microbianas que descomponen la biomasa, generando como productos principales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) [6].

La producción de biogás a partir de subproductos agroindustriales presenta múltiples beneficios económicos y ambientales, ya que además de generar energía renovable, este proceso contribuye a promover una economía circular, la gestión eficiente de residuos y puede ser una fuente adicional de ingresos para los agricultores [3, 4, 13].

Por ello, el presente estudio evalúa el potencial metanogénico, conocido también como potencial bioquímico de metano (BPM) de las semillas residuales de chile mirasol (SC), empleando distintos tipos de inóculo. Se realizaron pruebas experimentales con el objetivo de determinar la viabilidad técnica del proceso, así como explorar la posibilidad de integrar subproductos de plantas tratadoras de aguas como agentes activos en sistemas de aprovechamiento bioenergético. La presente investigación contribuye al diseño de estrategias circulares orientadas a una gestión integral y sostenible de los residuos, en coherencia con los principios fundamentales de la bioeconomía actual y la economía circular.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

1. Material vegetal.

Las muestras de semillas de chile mirasol utilizadas en este estudio fueron donadas por el Rancho el Granado ubicado en la localidad de Ramón López Velarde, Zacatecas. Las semillas corresponden al residuo de la cosecha del año 2024, se mantuvieron almacenadas en condiciones óptimas (15 - 20 °C) para evitar que se genere humedad o contaminación por hongos.

El lote recibido corresponde a remanentes de chile mirasol (*Capsicum annuum* var. mirasol) sometido a un tratamiento de secado convencional, por túneles de hule y posteriormente de manera manual. En la primera etapa, los frutos frescos fueron distribuidos sobre una sola capa en el interior de túneles de hule negro, construidos con arcos metálicos cubiertos con plástico negro o hule, generando un efecto invernadero que permite la acumulación de calor por radiación solar directa. A medida que la temperatura interna sube, el contenido de humedad del chile disminuye y la estructura del pericarpio se vuelve quebradiza, facilitando el desprendimiento de las semillas.

En la segunda etapa correspondiente al secado manual, los chiles secos son manipulados mediante volteo y extendido, lo que provoca que las semillas se desprendan y puedan recolectarse de manera natural. Dicha técnica es importante para recuperar las semillas, ya que minimiza el daño y permite que se conserven las características morfológicas. Éstas una vez recuperadas, se guardaron en bolsas de plástico herméticamente cerradas (Ziploc®) y fueron almacenadas a 4 °C hasta su posterior uso.

2. Inóculo.

Se utilizaron tres inóculos distintos obtenidos de empresas ubicadas en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa y que fueron codificadas de la siguiente manera:

- T: Lodos activados recuperados de la planta tratadora de agua de la Industria de Maíz y Trigo Tostaditas Blancas S.A. de C.V.
- B: Bioles recuperados del digestor mesofílico de la empresa de biofertilizantes BeGaia.
- P: Lodo activado recolectado de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Pacífico.

B. MÉTODOS

1. Ubicación experimental.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), Unidad Académica en Acuicultura y Manejo Ambiental, ubicada en Mazatlán, Sinaloa.

2. Molienda de semillas.

Las semillas fueron sometidas a un proceso de molienda con el objetivo de obtener una harina de granulometría fina y homogénea. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un molino (Black & Decker®) diseñado para especias secas. La harina obtenida se almacenó en bolsas Ziploc selladas y se conservó a una temperatura de 4 ± 1°C hasta su utilización.

3. Caracterización de inóculo y sustrato.

Se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos con el objetivo de cuantificar los contenidos de sólidos totales (ST) y volátiles (SV), contenido de humedad (H) y cenizas o sólidos fijos (SF), siguiendo los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [14].

La determinación de ST, consistió en calentar crisoles a 105 ± 2 °C por 24 h en un horno de secado (OHAUS AP210), se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (w_{crisol}). Posteriormente, se colocó 1 ± 0.004 g de semilla molida de chile, así como, 1.22 ± 0.28 g de muestra correspondientes al inóculo T; 7.04 ± 1.64 g para el inóculo B y finalmente 6.9 ± 0.93 g del inóculo P, se registró su peso ($w_{muestra}$), finalmente se secaron las muestras a 105 ± 2 °C por 24 h. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso (w_{total}).

El porcentaje de ST se calculó utilizando la Ec. (1). El resultado se presentó como porcentaje promedio (n = 3) con desviación estándar [14].

$$\% ST = \frac{w_{total} - w_{crisol}}{w_{muestra} - w_{crisol}} x100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó con la Ec. (2), calculando la diferencia en porcentaje de los ST.

$$\% H = 100\ \% - \% ST \quad (2)$$

Para el cálculo de SV y los SF, los platos de evaporación con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla (Felisa FE-363) a 550 ± 2 °C durante 2 h, posteriormente el residuo fue pesado ($w_{volátil}$). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, para los cálculos correspondientes se emplearon las Ecs. (3) y (4) [14].

$$\% SV = \frac{w_{total} - w_{volátil}}{w_{total} - w_{crisol}} x100 \quad (3)$$

$$\% SF = \frac{w_{volátil} - w_{crisol}}{w_{total} - w_{crisol}} x100 \quad (4)$$

4. Diseño experimental.

Se desarrollaron pruebas de potencial metanogénico por lotes, para ellos se prepararon reactores de 60 mL con un volumen de trabajo de 35 mL, sellados con tapas de aluminio con septum para punción, a los cuales se añadieron inóculo y biomasa (SC) como sustrato en una relación 2:1 (inóculo: sustrato) con base a sólidos volátiles, siguiendo la configuración experimental de la Tabla I. Para el cálculo de SV requeridos se utilizó la Ec. (5), cada combinación de tratamiento se evaluó por triplicado y se presentó la desviación estándar [13, 15].

$$gSV = \frac{vol}{m}(ST)(SV) \quad (5)$$

De manera paralela, el inóculo se empleó como control negativo, con el propósito de restar la producción endógena del mismo a la generada por el sustrato. Como control positivo se utilizaron reactores adicionados con celulosa. Los biorreactores se mantuvieron bajo condiciones controladas de 37 ± 1 °C con una agitación constante de 150 rpm durante un periodo de 46 días, empleando una incubadora CSRcientific CVP-500 [12, 13, 15].

TABLA I. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL.

Tratamiento	Sustrato	Inóculo	Réplicas
SC+T	Semilla molida	Tostaditas	3
SC+B	Semilla molida	BeGaia	3
SC+P	Semilla molida	Cervecería Pacífico	3

Dónde: SC, es la semilla molida; T: inóculo de Tostaditas; B: inóculo BeGaia y, P: inóculo Cervecería Pacífico.

La producción de biometano se monitoreó diariamente mediante un método volumétrico utilizando un eudiómetro. En este dispositivo, el dióxido de carbono (CO_2) fue retenido a través de una disolución de hidróxido de sodio ($NaOH$ 1N), lo que permitió cuantificar el metano (CH_4) generado. De manera complementaria, se empleó un manómetro SMC ISE20-P para registrar la presión interna del biorreactor (en MPa) y calcular la producción total de biogás, con lo cual se determinó el porcentaje de metano presente. Los resultados se expresaron en mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor ($mL\ CH_4\ /gSV$), presentándose como valores promedio (n=3) acompañados de su desviación estándar [12, 13, 15].

5. Modelo de Gompertz modificado (MGM).

La cinética de producción acumulada de metano ($mL\ CH_4\ / gSV$) se modeló mediante la ecuación de Gompertz Modificada Ec. (6), para analizar el comportamiento y desempeño del sistema durante el proceso de digestión anaeróbica [16].

$$M = P \cdot \exp\{-exp[\frac{R_{max} \cdot e}{P}(\lambda - t) + 1]\} \quad (6)$$

Dónde: M, es el potencial metanogénico acumulado por gramo de sólido volátil ($mL\ CH_4\ /gSV$); P, la producción máxima ($mL\ CH_4\ /gSV$); t, el tiempo (días); R_{max}, la tasa de producción máxima diaria ($mL\ CH_4\ /gSV\ /\ día$); y finalmente, λ corresponde al tiempo de la fase de latencia (días).

6. Análisis estadístico.

Se realizaron pruebas estadísticas para las producciones acumuladas de metano ($mL\ CH_4\ /gSV$) obtenidas bajo las diferentes configuraciones de las pruebas metanogénicas. Éstas se realizaron utilizando el software SigmaPlot versión 12.5®, para ello se analizó la homocedasticidad de los datos mediante la prueba de igualdad de varianzas (Equal Variance Test); además, se hicieron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk; posteriormente se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey con un índice de probabilidad de $p \leq 0.05$.

III. RESULTADOS

1. Determinación de sólidos volátiles (SV), humedad (H) y sólidos fijos (SF) o cenizas.

En la Tabla II se muestran los resultados de la caracterización de sustratos e inóculos. Respecto a estos parámetros, los resultados muestran que el sustrato (SC) presenta una muy baja humedad (6.31 ± 0.06 %) y un contenido alto de ST de 93.68 ± 0.06 %, lo que indica que se trata de un material muy seco. Mientras que el contenido de SV muestra un valor muy alto (95.99 ± 0.11 %), lo cual indican una proporción muy elevada de materia orgánica biodisponible, por lo que se podría considerar como sustrato adecuado para el proceso de digestión anaeróbica [17].

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DE LOS INÓCULOS Y SUSTRATO UTILIZADOS EN LA DA.

	SC	T	B	P
% H	6.31 ± 0.06	98.13 ± 0.32	90.49 ± 0.1	88.9 ± 0.39
% ST	93.68 ± 0.06	1.8 ± 0.33	9.5 ± 0.1	11.09 ± 0.39
% SV	95.99 ± 0.11	77.66 ± 2.69	56.43 ± 0.39	30.70 ± 0.45
% SF	4.00 ± 0.11	22.33 ± 2.69	43.56 ± 0.39	69.29 ± 0.45

Dónde; H: Humedad; ST: Sólidos totales; SV: Sólidos volátiles; SF: Sólidos fijos o cenizas; SC: semilla molida; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico.

Por otro lado, el bajo contenido de SF, sugiere una escasa presencia de material inorgánico o cenizas, lo que resulta conveniente para materiales candidatos para DA [14,15].

Respecto a los inóculos, el inóculo T presentó el mayor contenido de humedad (98.13 ± 0.32 %) y el menor contenido de ST (1.8 ± 0.33 %), lo que indica una muy baja concentración de biomasa sólida, aunque con un alto contenido de SV (77.66 ± 2.69 %), lo cual se puede traducir en un buen potencial de actividad microbiológica [18].

El inóculo B, mostró un contenido de ST más elevado (9.5 ± 0.1 %), con una proporción moderada de SV (56.43± 0.39 %), lo que indica una mezcla más balanceada entre la fracción orgánica e inorgánica. El inóculo P presentó los valores más altos de SF (69.29 ± 0.45 %) y los más bajos de SV (30.70 ± 0.45 %) lo que indica una carga orgánica limitada y una alta proporción de material inerte, lo que puede limitar su eficacia como inóculo activo en la DA, estos resultados concuerdan con lo que se han reportado previamente para lodos activados de este tipo [15, 16, 19].

2. Potencial metanogénico.

Los valores experimentales de producción acumulada de metano tras 46 días de retención hidráulica oscilaron entre 486.28 ± 15.69 y 856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV (Tabla III), lo cual representa un alto valor obtenido por el sustrato, esto se puede atribuir a la presencia de materia orgánica de alta energía disponible para los microorganismos metanogénicos. Se ha reportado que los lípidos poseen un poder calorífico superior al de los carbohidratos y proteínas, alcanzando hasta 1.014 mL CH_4/g de lípido, lo cual incrementa el potencial bioquímico de metano cuando son degradados eficientemente [19].

Por otro lado, el inóculo T presentó el mejor desempeño, alcanzando una producción acumulada de 856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV, este valor supero a los obtenidos con el inóculo B (503.19 ± 17.54 mL CH_4/gSV) y P (486.28 ± 15.69 mL CH_4/gSV), los cuales no mostraron diferencias significativas. La mayor eficiencia del inóculo T puede estar atribuida a una mejor adaptación de su comunidad microbiana a la degradación de compuestos complejos presentes en las semillas, dicho inóculo proviene de una planta tratadora de agua de una empresa que trabaja con maíz y tortillas, por lo que los microorganismos presentes pudieron tener afinidad a los compuestos presentes en las semillas [19].

3. Ajuste con el modelo de Gompertz Modificado (GM).

El modelo de Gompertz modificado fue utilizado para ajustar las curvas experimentales de producción acumulada de metano (Fig. 1), con el objetivo de modelar la cinética del proceso y predecir algunos parámetros de ésta. El ajuste se realizó mediante el software de SigmaPlot, obteniéndose coeficientes de correlación (R^2) mayores a 0.96, lo que indica una buena representatividad del modelo respecto a los datos experimentales.

En la Tabla III se muestra que, para todos los casos, el modelo mostró un buen ajuste, a pesar de ello las estimaciones predichas presentaron valores muy cercanos respecto a los valores experimentales con los inóculos B y P; en cuanto al tratamiento SC+T se observaron variaciones más importantes; la producción estimada fue de 777.74 ± 18.29 mL CH_4/gSV, predicción inferior al valor experimental (856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV. Este desajuste puede estar relacionado con la variabilidad inherente en la degradación de lípidos y su posible acumulación transitoria de ácidos grasos volátiles [17].

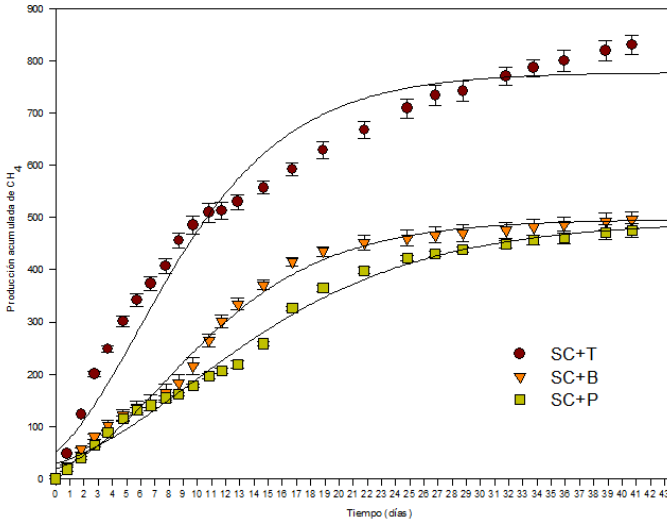


Fig. 1. Potencial bioquímico de metano (BPM) expresado en mL CH_4/gSV. La línea sólida representa el ajuste del modelo de Gompertz Modificado. SC: semilla completa; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico.

TABLA III. PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO (CH_4) EXPERIMENTAL Y TEÓRICA CON EL MODELO DE GOMPERTZ MODIFICADO.

Trat.	PA	P	Rmax	λ	R^2
SC+T	856.97 ± 12.42[a]	777.74 ± 18.29	48.70 ± 4.27	0.67 ± 0.01	0.9631
SC+B	503.19 ± 17.54[b]	496.83 ± 6.36	28.58 ± 1.24	1.20 ± 0.34	0.9924
SC+P	486.28 ± 15.69[b]	493.90 ± 9.06	20.03 ± 0.85	0.46 ± 0.43	0.9921

Letras diferentes representan diferencias estadísticas para los datos en la columna (n=3, Tukey P≤0.05). Donde: Trat.: Tratamiento; SC: semilla completa; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico; PA: Producción Acumulada de Metano Experimental (mL CH_4/gSV); P: Producción Teórica Máxima de Metano (mL CH_4/gSV); R_{max}: Tasa de Producción Máxima Diaria (mL CH_4/gSV/día); λ: Tiempo de la Fase de Latencia (días); R^2: Coeficiente de determinación.

En cuanto a la tasa diaria de producción de metano, se registraron los valores más altos en el tratamiento SC+T (48.70 ± 4.27 mL $CH_4/gSV \cdot día$), seguido de SC+B (37.52 ± 3.47 mL $CH_4/gSV \cdot día$). Este comportamiento refleja no solo una mayor producción total, sino una mayor velocidad de conversión de la materia orgánica a metano en presencia de lípidos y un inóculo eficiente [20].

Por otro lado, el tiempo de latencia fue determinado también por el modelo de Gompertz, en general se observó que hay una fase de adaptación inicial, esta no es excesiva, lo cual puede deberse a que el sistema cuenta con inóculos previamente adaptados y que la concentración de lípidos no supera el umbral inhibitorio, particularmente con el inóculo P (0.46 ± 0.43 días), seguido por el inóculo T (0.67 ± 0.01 días), lo que sugiere una adaptación rápida de los consorcios microbianos al sustrato [20].

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el uso de la SC puede favorecer significativamente el proceso de metanogénesis; la presencia de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables y el contenido lipídico del material parecen contribuir a una mayor producción de biometano, lo que se traduce en una ganancia considerable del potencial energético del sustrato. Lo cual sugiere que el sustrato representa una alternativa viable dentro de esquemas de valorización de residuos agroindustriales. No obstante, su implementación debe evaluarse cuidadosamente en función del objetivo específico del proceso. El modelado realizado logró un ajuste adecuado a los datos experimentales, especialmente en los tratamientos con menor variabilidad.

Finalmente, es importante comentar que una de las aplicaciones principales del biometano es la generación de energía ya sea mediante calor y/o electricidad. Realizar la estimación de la energía eléctrica que potencialmente se puede obtener a partir del metano generado es altamente recomendable, esto para analizar y predecir costos de inversión y operativos de una potencial planta piloto de DA, entonces, tomando en cuenta el poder calorífico del biogás, que es el equivalente a un aproximado de 10 kWh por m^3 [20, 21], en el presente trabajo, con la producción obtenida en el mejor escenario, de 859.97 mL CH_4/gSV se calcula el equivalente a 0.00085997 m^3 de metano producido a partir de 1 g de sólido volátil del material, lo que representaría alrededor de 0.000085997 kWh de electricidad; dicho valor pudiera parecer bajo, sin embargo, para poner en contexto del potencial energético real del sustrato en estudio, se debe tomar en cuenta las grandes cantidades de semilla residual que se genera en la industria del secado de chile; entonces, por cada tonelada de semilla residual se producirían aproximadamente 85.997 kWh de electricidad, lo que sería equivalente a casi la mitad del consumo de una casa de bajo requerimiento en México (con promedio registrado entre 200 y 800 kWh) [22].

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran el potencial de revalorización mediante el proceso de digestión anaerobia del residuo agroindustrial de chile mirasol estudiado. La comparación entre los distintos inóculos utilizados permitió identificar diferencias importantes en términos de producción de biogás, eficiencia de degradación y estabilidad del proceso.

Los resultados evidenciaron que el inóculo T presentó una mayor adaptación y eficiencia en la degradación del sustrato en estudio, lo que se reflejó en potencial metanogénico superior utilizando dicho consorcio microbiano, optimizando la producción de biogás y la estabilidad del sistema. Este hallazgo sugiere que la elección del inóculo es un factor determinante para el rendimiento de los sistemas de DA.

Los resultados obtenidos muestran que los subproductos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales pueden convertirse en una alternativa viable y sostenible

como fuente de inóculo. Su incorporación en esquemas de aprovechamiento energético y reducción de residuos abre la posibilidad de integrar procesos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. La interacción entre residuos agroindustriales e inóculos favorece la optimización de la valorización orgánica, impulsa un uso más racional de los recursos y contribuye a disminuir los impactos ambientales derivados de una disposición inadecuada de desechos.

En conjunto, los hallazgos de este trabajo respaldan la pertinencia de aplicar modelos de economía circular en el ámbito agroindustrial, generando nuevas oportunidades para el tratamiento integral de residuos y la producción de bioenergía. Se sugiere que investigaciones futuras amplíen este enfoque, incorporando análisis complementarios que consideren no solo el potencial energético, sino también la composición química detallada de los materiales, así como estudios de caracterización metagenómica de los consorcios microbianos implicados.

REFERENCIAS

[1] Aguilera-Flores, M. M., Garay-Fernández, A. K., Contreras-Ramírez, M. L., Ávila-Vázquez, V., & Rodríguez-Martínez, Y. Y. (2021). Diagnóstico de las prácticas comunes del manejo de residuos en localidades marginadas: Un caso de estudio. Revista De Ciencias Ambientales, 55(2), 250–270. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: https://doi.org/10.15359/rca.55-2.12, [Online]

[2] Ritchie, H., & Roser, M. (2023). Agricultural production. Our World in Data. Consultado en: Junio, 7, 2025, https://ourworldindata.org/agricultural-production, [Online]

[3] Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J., & Gómez, X. (2021). Biogas production from organic wastes: Integrating concepts of circular economy. Fuels, 2(2), 144–167. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/fuels2020009, [Online]

[4] Fares Almomani, & Bhosale, R. R. (2020). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. Chemosphere, 255, 126805. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805, [Online]

[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture. [Online]. Available: https://www.fao.org/publications/sofa/2022/en/

[6] Sevillano, C. A., Pesantes, A. A., Peña Carpio, E., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2021). Anaerobic digestion for producing renewable energy—the evolution of this technology in a new uncertain scenario. Entropy, 23(2), 145. Consultado en: Junio, 3, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/e23020145, [Online]

[7] Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Girijal, S., & Hp, G. (2024). Post-harvest profile, processing and value addition of dried red chillies (Capsicum annum L.). Journal of food science and technology, 61(2), 201–219. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-022-05656-1, [Online]

[8] Anaya-Esparza, L. M., Mora, Z. V. D. L., Vázquez-Paulino, O., Ascencio, F., & Villarruel-López, A. (2021). Bell peppers (Capsicum annum L.) losses and wastes: Source for food and pharmaceutical applications. Molecules, 26(17), 5341. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26175341, [Online]

[9] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). México, entre los principales productores de chile verde en el mundo (Comunicado de prensa). [Online]. Available: https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-entre-los-principales-productores-de-chile-verde-en-el-mundo-agricultura?idiom=es

[10] Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2017). Chile, producto tradicional de la gastronomía mexicana. [Online]. Available: https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-producto-tradicional-de-la-gastronomia-mexicana?idiom=es

[11] Financial Times. (2024, June 8). Global population to shrink this century as birth rates fall. [Online]. Available: https://www.ft.com/content/2d37dc16-5c73-4f2a-92a5-a78326f9dc3d

[12] Herrera-Álvarez, R. T., Montes-Núñez, V. M., Santos-Ballardo, D. U., Betancourt-Lozano, M., Gómez-Gil, B., Navarro-Barrón, E. J., & Luna-Avelar, K. D. (2024, diciembre). Evaluación del potencial metanogénico de frass de Hermetia illucens pre-tratada con Saccharomyces cerevisiae y Lactobacillus acidophilus. Identidad Energética, 7(2), 104–109. https://www.cinergiaug.org/assets/files/RIE_Vol.-7_No.2_202414.pdf

[13] U.S. Environmental Protection Agency. (2001). Method 1684: Total, fixed, and volatile solids in water, solid, and biosolids draft. EPA-821-R-01-015. Consultado en: Junio, 13, 2025, DOI: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL, [Online]

[14] M. J. C. de la Rubia, R. A. Fernández, & M. J. Sánchez. (2017). Biogas production from organic waste: Technologies and perspectives. Waste Management, 59, 199–208.

[15] Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2011). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. Biosystems Engineering, 108(4), 352–360. Consultado en: Junio, 15, 2025, DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.007, [Online]

[16] Patil, N. A. & Jha M. K. (2018). Assessment of total and volatile solids in organic waste management and their influence on anaerobic digestion processes. Waste Management, 72, 65-73.

[17] Wang, X., Duan, X., Chen, J., Fang, K., Feng, L., Yan, Y., & Zhou, Q. (2016). Enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge by pretreatment: effect of volatile to total solids. Environmental technology, 37(12), 1520–1529. Consultado en: Junio, 19, 2025, DOI: https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1120783, [Online]

[18] Alves, M. M., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Cavaleiro, A. J., Picavet, M., Smidt, H., & Stams, A. J. (2009). Waste lipids to energy: How to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). Microbial Biotechnology, 2(5), 538–550. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00100.x, [Online]

[19] Luna-Avelar, K. D., Barrena, R., Font, X., Sánchez, A., Santos-Ballardo, D. U., Germán-Báez, L. J., & Valdez-Ortiz, A. (2021). A preliminary assessment of anaerobic co-digestion potential of mango and microalgal residue biomass using a design of experiments approach: Effect of thermal, physical and biological pretreatments. Food and Bioproducts Processing, 128, 143–152. Consultado en: Junio, 14, 2025, DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.04.015, [Online].

[20] S. Suhartini, Y. P. Lestari y I. Nurika, "Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 230, p. 012075, febrero de 2019. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1088/17551315/230/1/012075.

[21] Velarde-Meza, J.C., Tiznado-Osuna, L.J., Aguilera-Hernández, Y.M., Santos-Ballardo, D.U. (2023). Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas. Identidad Energética, 6(1), 31-37.

[22] Reguladores (2025). Consumo de energía electrica en México. https://www.reguladores.com.mx/blog/consumo-de-energia-electrica/. Consultado en: Agosto, 13, 2025.

BIOGRAFÍAS



KARINA GONZÁLEZ RAMÍREZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables en la Universidad Autónoma del Estado de México. Acreedora del Diplomado en Educación Ambiental y los ODS por la UAEMex, UPN y el Ayuntamiento de Toluca. Mentora en el Programa Tecnolochicas y niñ@s STEAM dirigido a infantes y jóvenes mujeres para promover el interés y la participación en carreras tecnológicas y científicas. Miembro del SDG Student Hub de la UAEMex y voluntaria en proyectos socioambientales. Galardonada a nivel municipal por su labor en medio ambiente, ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales. Su interés se centra en la gestión integral de residuos orgánicos y el desarrollo de soluciones sostenibles.



JANETH DANEL CASESUS Ingeniera en Energía, actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD). Su formación se ha enfocado en proyectos de energía limpia y sostenible, orientados a la mitigación del cambio climático. Autora de un artículo de divulgación científica. Actualmente desarrolla su proyecto de investigación en el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de compuestos de alto valor agregado, bajo un enfoque de biorrefinería., con el objetivo de contribuir a la transición energética y al aprovechamiento integral de recursos en el sector agroindustrial.



KARLA D. LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral CONAHCYT en CIAD, unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), como candidato. Ha realizado investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su línea de investigación está dirigida al manejo sustentable de residuos orgánicos agroindustriales y a la generación de bioenergía, mediante el acoplamiento de bioprocesos.



MIGUEL BETANCOURT LOZANO Biólogo marino. Maestro en Ciencias Marinas y Doctor; Doctor en Ciencias por el Instituto de Acuacultura de la Universidad de Stirling, en Escocia. Investigador Titular C y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su investigación se centra en el desarrollo de herramientas ecotoxicológicas orientadas a relacionar la presencia, persistencia y toxicidad de contaminantes con posibles alteraciones en sistemas biológicos. Bajo una perspectiva multidisciplinaria, aborda diversos aspectos relacionados con la problemática ambiental de los ecosistemas costeros del noroeste mexicano. En este sentido su interés también recae en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante bioprocesos.



LILIANA IVETTE ÁVILA CÓRDOBA Licenciada en Química Farmacéutica Bióloga; Doctora y Maestra en Ciencias Ambientales. Miembro del SNII de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) Nivel I. Distinguida internacionalmente como Dictaminadora para el Journal of Cleaner Production-Elsevier, desde septiembre 2019. Líder del Cuerpo Académico: “Materiales para Energía y Sustentabilidad”. Es autora y coautora de diversas publicaciones nacionales e internacionales en importantes editoriales y revistas arbitradas e indexadas. Profesora-investigadora adscrita a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.



DAVID U. SANTOS BALLARDO. Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigador Titular B de CIAD Unidad Mazatlán; Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación. así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

Recibido 7 de julio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Panorama para la Reutilización de Agua Gris en Viviendas del Estado de Guanajuato

D. D. VÁZQUEZ RAMÍREZ[1], P. S. BASURTO CAMARILLO[1], E. S. PIZANO OROZCO[2], I. W. REYES BUENFIL[1], X. GONZÁLEZ RAMÍREZ[1], J. M. LOZANO GARCÍA[1], O. PIZANO MARTÍNEZ[3], A. PIZANO MARTÍNEZ[1*].

[1]Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato.
[2]Departamento de Arte y Empresa, Universidad de Guanajuato.
[3]Centro Universitario de Ciencias de la Salud, Universidad de Guadalajara.
*Autor de correspondencia: apizano@ugto.mx

RESUMEN El aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos es un problema que debe abordarse para garantizar el abastecimiento de agua a la sociedad y mitigar el agotamiento de los acuíferos. Este artículo presenta un panorama para la reutilización de agua gris en viviendas en Guanajuato, con el objetivo de promover el desarrollo de alternativas tecnológicas que contribuyan a enfrentar el desabasto de este líquido vital. Para este fin, ofrece una visión general del problema de la escasez de agua en un contexto internacional, nacional y estatal. Además, incluye una estimación del volumen de agua gris generada en una vivienda y en la entidad. También analiza la reducción potencial en la explotación de los acuíferos y demanda hídrica de una vivienda derivada de su reutilización. Finalmente, aborda políticas públicas y normativa oficial mexicana con el fin de evaluar la factibilidad sanitaria y ambiental de la reutilización de agua gris en viviendas.

PALABRAS CLAVE — Agua gris, reutilización, vivienda, estrés hídrico, Guanajuato.

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de energía y agua es fundamental para el desarrollo del sector productivo y social. Debido a su importancia, estos recursos están considerados en la agenda para el desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas [1]. En este sentido, la demanda actual de estos recursos debe satisfacerse de manera responsable con el fin de no comprometer su disponibilidad para las generaciones futuras.

En materia de energía, en las últimas dos décadas se han logrado avances importantes para el aprovechamiento de fuentes renovables. Por ejemplo, actualmente la tecnología de sistemas fotovoltaicos y eólicos se encuentra en un nivel de madurez importante [2], contribuyendo de esta manera a la sustentabilidad energética y ambiental. Para fortalecer el avance en este sentido, a nivel de las viviendas se ha promovido intensamente el uso de sistemas fotovoltaicos y calentadores solares [3], [4]. Un ejemplo del impulso que ha recibido esta última tecnología en la entidad es el programa de calentadores solares promovido por el gobierno de Guanajuato [4]. Debido a que ambos sistemas permiten aprovechar en casas habitación la energía solar a un costo accesible y con una elevada simpleza para el usuario, su utilización se está extendiendo rápidamente.

En materia de agua, la instalación de plantas de tratamiento es una opción que permite reutilizar grandes volúmenes de aguas residuales municipales para su aplicación en el riego agrícola y riego de áreas verdes [5]. Similarmente, a nivel industrial, se promueve fuertemente el tratamiento de aguas residuales para su reutilización y mitigar el impacto ecológico [4]. La ejecución de actividades domésticas en las viviendas produce agua gris. Esta se define como el agua residual resultante de actividades domesticas con excepción de la producida de la descarga de inodoros [6]. El tratamiento de esta agua es posible y representa un área de oportunidad que podría explotarse para reducir el consumo total de agua potable de la vivienda [7]. Esta medida engloba diversos beneficios, de entre los cuales destacan los siguientes: ayudar significativamente a la conservación del agua potable y los acuíferos, reducir la demanda de agua potable a la red hidráulica, e incrementar la disponibilidad de agua para beber [6, 7]. A pesar de estos beneficios, y a diferencia de los sistemas fotovoltaicos y calentadores solares, no es común encontrar sistemas instalados en las viviendas para reutilizar el agua gris generada.

En la literatura se encuentran propuestos diferentes sistemas para la reutilización del agua gris en viviendas [8], los cuales se pueden clasificar como sistemas sencillos y sistemas compuestos. Los sistemas sencillos se implementan a partir de elementos básicos y utilizando conocimientos empíricos [8, 9]. La principal ventaja de este tipo de sistema es su bajo costo de instalación y mantenimiento. No obstante, el proceso de reutilización se realiza predominantemente de manera manual y, por lo tanto, demanda un grado elevado de intervención, dedicación y esfuerzo por parte del usuario. En adición, el tiempo de almacenamiento del agua gris se acota

al orden de pocas horas para evitar el crecimiento de organismos patógenos que ponen en riesgo la salud de los usuarios. Estas desventajas reducen o anulan al corto plazo el interés del usuario por reutilizar el agua gris.

Por otro lado, los sistemas compuestos consideran un alto grado de automatización y control, así como tratamiento del agua gris [8, 9, 10, 11]. Este tipo de sistemas minimiza la intervención manual, facilita el proceso de reutilización, y promueve el interés por parte del usuario. Además, permiten reutilizar el agua gris sin poner en riesgo la salud del usuario y en una amplia gama de actividades domésticas, exceptuando el consumo humano. Sin embargo, su complejidad y elevado costo de implementación y mantenimiento, pueden ser factores que han limitado su adopción masiva.

No obstante, el planeta, el territorio nacional y el estado de Guanajuato se encuentran bajo condiciones de estrés hídrico preocupantes, las cuales imponen la necesidad de implementar estrategias y tecnologías para el uso eficiente del agua. Estas condiciones se describen en este artículo como base para brindar un panorama de la aplicación de sistemas para la reutilización del agua gris en viviendas de la entidad. Como parte de este panorama, se brinda una estimación del volumen potencial de agua gris que podría reutilizarse. Además, se presentan algunas políticas públicas que promueven el aprovechamiento racional del recurso hídrico, así como una descripción de normativa oficial mexicana que permite establecer un marco regulatorio para la reutilización del agua gris.

El artículo se estructura de la siguiente manera. La Sección II describe el problema de escasez de agua a nivel global. El problema de estrés hídrico nacional y estatal se presentan de manera general en la Sección III. La Sección IV proporciona la distribución del consumo de agua en el estado, con el fin estimar el volumen potencial de agua gris reutilizable. Las Secciones V y VI describen las políticas públicas y las normas mexicanas que dan sustento a la reutilización del agua gris. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se presentan en la Sección VII.

II. ESCASEZ DE AGUA A NIVEL GLOBAL

El problema prominente asociado con la escasez del agua para uso y consumo humanos se visualizó al menos desde el año de 1993, cuando la Organización de las Naciones Unidas proclamó el 22 de marzo como el día mundial del agua. El objetivo de está proclamación fue promover la reflexión, la acción política y el compromiso ciudadano en relación con la importancia y cuidado del agua, para no comprometer su disponibilidad en el futuro.

A poco más de tres décadas de la promulgación del día del agua, las acciones políticas, así como los esfuerzos por parte de la sociedad y del sector productivo, no han sido suficientes. El problema de la escasez del agua se ha agravado debido a factores como: el crecimiento poblacional, la urbanización, el cambio climático y la sequía, la contaminación y, muy importantemente, por la falta de prácticas rigurosas y extensivas para la gestión y uso eficiente del agua. A manera de evidencia de este escenario drástico se puede hacer referencia al caso de la Ciudad del Cabo (Cape Town) de Sudáfrica, cuando en abril del 2018 se pronosticó que la mayoría de la ciudadanía se quedaría sin suministro de agua potable. Afortunadamente, el pronóstico no se concretó gracias a la reducción de emergencia del consumo de agua de la ciudad. Sin embargo, la gran tensión que provocó el caso dio paso al concepto del "día cero" [12]. Este concepto ha sido adoptado a nivel mundial y se refiere al momento proyectado en que una ciudad o región alcanzará un nivel crítico en el abastecimiento de agua, cuando la demanda básica exceda la disponibilidad, obligando al cierre del suministro habitual y activando un sistema de distribución de emergencia con raciones diarias limitadas [13].

Actualmente el nivel de escasez de agua en una región o país tiende a cuantificarse en términos del nivel de estrés hídrico [14]. El estrés hídrico se define como la relación porcentual entre la extracción total de agua dulce y los recursos totales de agua dulce renovable disponible, lo cual brinda un indicador de la proporción utilizada del total de recursos hídricos aprovechables. Se considera que un país o región se encuentra en nivel de estrés hídrico nulo, bajo, medio, alto o extremo cuando el valor del indicador se encuentra en los siguientes rangos: 0% a 25%, 25% a 50%, 50% a 75%, 75% a 100%, y superior al 100%, respectivamente. En base a esta escala, el Instituto de los Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) identifica que 25 países, que albergan un cuarto de la población mundial, experimentan anualmente un nivel extremo de estrés hídrico [15]. Es decir, requieren un volumen que supera el total de los recursos hídricos que disponen. La Fig. 1 muestra el mapa de estrés hídrico global. Se puede observar que una gran parte de nuestro planeta presenta niveles de estrés hídrico medio, alto y extremo. Se prevé que esta condición empeore hacia el 2050 [14].

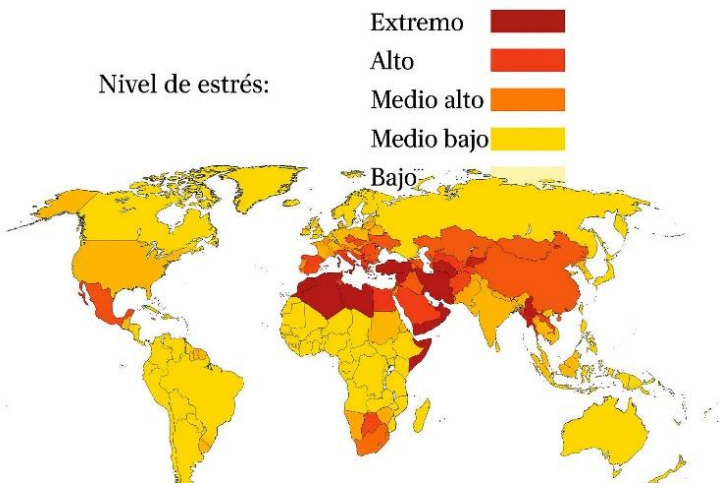


Fig. 1. Estrés hídrico global (Adaptada de [15]).

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

En este contexto preocupante, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de su Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) No. 6: Agua Limpia y Saneamiento, promueve el abordaje del problema de estrés hídrico global [1]. Este objetivo enuncia que "El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene representan la necesidad humana más básica para el cuidado de la salud y el bienestar". Sin embargo, "Miles de millones de personas no tendrán acceso a estos servicios básicos en 2030 a menos que se cuadrupliquen los avances". Este Objetivo No. 6 advierte que el uso eficiente de los recursos hídricos es una de las claves para reducir el estrés hídrico y sus efectos.

III. ESTRÉS HÍDRICO EN MÉXICO Y GUANAJUATO

El Programa Nacional Hídrico 2020-2024 señala que México presenta un nivel importante de estrés hídrico [16]. La Fig. 1 confirma esta situación, donde se observa que México es el único país de Norteamérica clasificado con un nivel de estrés hídrico alto. Esta condición se caracteriza por la existencia de al menos 18 estados del país que anualmente presentan problemas de suficiencia hídrica [16, 17].

La insuficiencia hídrica se agudiza por la sequía que año con año se experimenta en distintas zonas del país, como se describe a continuación. La sequía se define como un período prolongado con niveles de precipitación por debajo del promedio, lo que provoca una escasez temporal de agua disponible en el suelo, acuíferos y cuerpos superficiales. La Fig. 2 muestra el mapa de sequía nacional correspondiente al 15 de marzo de 2024 [18]. En este mapa la sequía se clasifica de acuerdo con una escala definida por los niveles D0, D1, D2, D3, y D4, los cuales indican anormalmente seco, sequía moderada, sequía severa, sequía extrema y sequía excepcional, respectivamente. Las áreas sin sequía se muestran en color gris. De este mapa se observa que una cantidad importante del territorio nacional, aproximadamente el 58%, presenta sequía de moderada (D1) a excepcional (D4). Esta condición representa un escenario de alto riesgo para el abasto y gestión del agua.

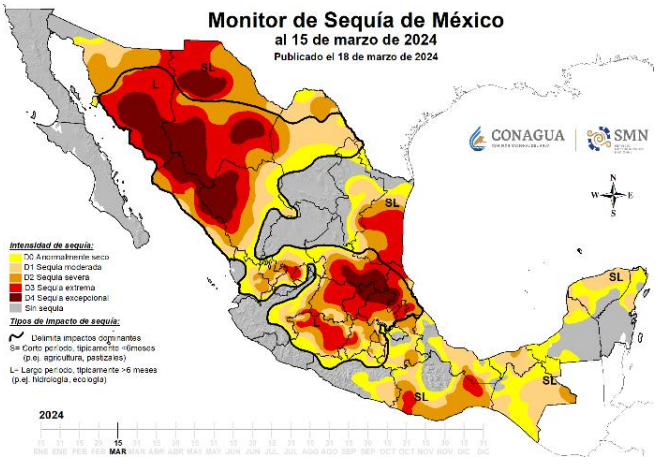


Fig. 2. Mapa de sequía nacional (obtenida de [18]).

La Tabla I muestra las únicas entidades federativas de México que, al 15 de marzo de 2024, presentaban algún nivel de sequía en la totalidad de su territorio. El estado de Guanajuato figura en esta tabla, donde se observa que el 16.4 %, 34.7 %, 44.9 % y 4 % de su superficie presentaba sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4), respectivamente. Además, con base en la precipitación pluvial registrada durante los últimos 5 años por la Comisión Nacional del Agua [19], se obtuvo que el promedio de precipitación en la entidad es de aproximadamente 550 mm. Este valor representa el 65% del promedio nacional, lo cual indica que la entidad presenta, de forma recurrente, niveles bajos de precipitación. Esta situación afecta de manera significativa la recarga de los acuíferos en el estado.

Es importante mencionar que el estado de Guanajuato cuenta con 20 acuíferos, de los cuales 19 se encuentran en condición de sobreexplotación, lo que refleja el alto nivel de estrés hídrico en la entidad [20]. Anualmente, la extracción de agua de los 20 acuíferos del estado es de alrededor de 3,800 millones de metros cúbicos, mientras que la recarga natural se estima en aproximadamente 2,700 millones de metros cúbicos. Esta diferencia representa un déficit superior a los 1,000 millones de metros cúbicos [21]. El único acuífero que anualmente tiene una recarga superior a su explotación es Xichú-Atarjea, con un superávit anual de apenas de 0.2 millones de metros cúbicos. En consecuencia, los 19 acuíferos sobreexplotados presentan tasas de abatimiento que oscilan entre 0.5 y 3 metros por año [20]. En este sentido, es indispensable intensificar las medidas para evitar el eventual agotamiento de los acuíferos de la entidad.

El Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato (PEDGTO) 2040 reconoce esta situación de estrés hídrico [22], la cual provoca que año con año la población quede más expuesta a interrupciones en el suministro de agua potable, poniendo en riesgo el acceso continuo a este líquido vital para el desarrollo de su vida cotidiana. El sistema de tandeo implementado en 2024 en la ciudad de León constituye un ejemplo de las medidas adoptadas recientemente para enfrentar la escasez de agua potable, derivada del estrés hídrico que afecta al estado [23].

TABLA I. ENTIDADES AFECTADAS POR SEQUÍA EN 100% DE SU TERRITORIO

Entidades	D0	D1	D2	D3	D4
Chihuahua	0.0	1.3	28.1	40.0	30.6
Ciudad de México	0.0	0.3	99.7	0.0	0.0
Guanajuato	0.0	16.4	34.7	44.9	4.0
Hidalgo	0.4	10.7	24.1	34.3	30.5
Estado de México	15.7	34.9	36.0	13.4	0.0
Morelos	32.2	59.0	8.8	0.0	0.0
Querétaro	0.0	0.0	3.9	59.2	36.9

Para enfrentar esta problemática de manera más integral, el PEDGTO 2040 establece diversos retos en materia de uso y tratamiento del agua, entre los cuales destacan los siguientes: fomentar una verdadera conciencia social sobre el cuidado del agua y del medio ambiente; incrementar el tratamiento y reúso de las aguas residuales; y reducir la sobreexplotación de los acuíferos en la entidad [22].

El contexto previamente descrito pone de manifiesto dos aspectos fundamentales: a) el nivel de estrés hídrico en la entidad es preocupante; y b) es necesario intensificar las acciones para evitar comprometer la disponibilidad del recurso hídrico para las generaciones futuras. En este sentido, resulta viable plantear la implementación extensiva de la reutilización del agua gris generada en las viviendas, como una medida que contribuya a mitigar el estrés y a promover la sustentabilidad hídrica del estado de Guanajuato. A continuación, se presenta la distribución del consumo de agua en la entidad, lo que permite realizar una estimación el volumen potencial de agua gris reutilizable.

IV. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA

En Guanajuato, el recurso hídrico proviene de dos fuentes principales: aguas superficiales (lagos, presas, etc.) y aguas subterráneas (acuíferos). Prácticamente el 100 % del recurso hídrico extraído de las aguas superficiales se destina a cubrir parte de la demanda del sector agrícola. Debido a que este trabajo se enfoca en el sector público-urbano, el análisis de esta fuente queda fuera del alcance del presente estudio. El volumen extraído de los acuíferos se distribuye en cuatro sectores principales, de la siguiente manera: 71.1% en el sector agrícola, 14.1 % en el sector público-urbano, 13.2 % en servicios y otros, y 1.6 % en el sector industrial, como se ilustra en la Fig. 3 [21]. Es claro que el sector agrícola consume el mayor porcentaje del agua extraída de los acuíferos. Sin embargo, el consumo de agua en el sector urbano no es despreciable. Note que, si consideramos que la extracción anual de los acuíferos es de 3,800 millones de metros cúbicos, el sector urbano consume alrededor de 532 millones de metros cúbicos. Lo cual representa aproximadamente el 50% del déficit de recuperación de los acuíferos de la entidad.

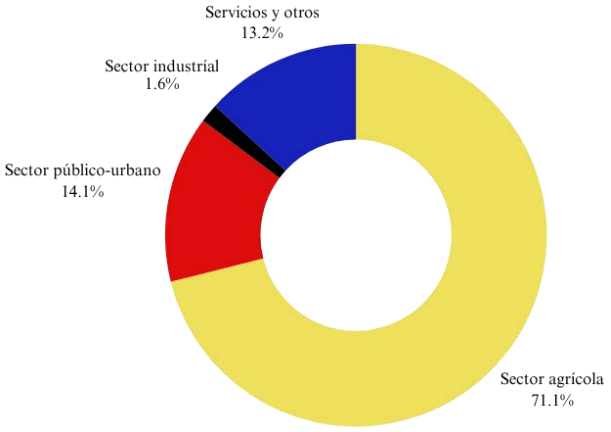


Fig. 3. Consumo distribuido de agua subterránea (adaptada de [21]).

Por simplicidad, en este trabajo se considerará que el 90 % del consumo hídrico del sector público-urbano corresponde a la demanda de las viviendas en la entidad. Con base en esta consideración, el consumo anual total de las viviendas se estima en aproximadamente 478 millones de metros cúbicos.

De acuerdo con [24], el consumo hídrico de una familia de cuatro integrantes se distribuye de la siguiente manera: 40 % en el sanitario, 32 % en la ducha, 14 % en la lavadora, 5 % en la cocina y 3 % en el lavabo; el 6% restante corresponde a otras aplicaciones. Debido a la falta de estadísticas a nivel estatal, se adopta esta distribución como referencia para las viviendas de la entidad. En este contexto, el volumen total de agua consumido anualmente en viviendas (478 millones de metros cúbicos) se distribuye como se indica en la Tabla II y se ilustra en la Fig. 4.

TABLA II. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN VIVIENDAS.

Actividad	Porcentaje (%)	Millones (m^3)
Sanitario	40	191.2
Ducha	32	152.96
Lavadora	14	66.92
Cocina	5	23.9
Lavabo	3	14.34
Otras aplicaciones	6	28.68
TOTAL	100	478

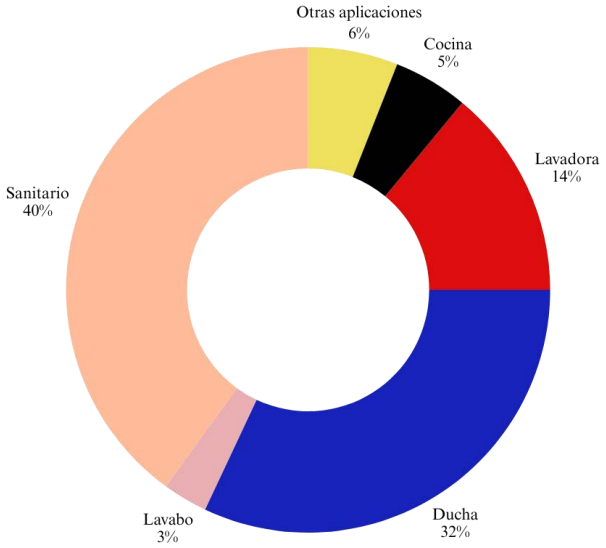


Fig. 4. Distribución de consumo en viviendas.

A. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN POTENCIAL DE AGUA GRIS REUTILIZABLE

Las actividades reportadas en la Tabla II que generan agua gris son: ducha, lavadora, cocina y lavabo. El agua residual proveniente de la clasificación "otras aplicaciones" se excluye de la categoría de agua gris. Debido a su modo de uso, el agua gris generada en la ducha, la lavadora y el lavabo presenta características fisicoquímicas similares. En este sentido, se estima que un 49 % (equivalente a 234 millones de metros cúbicos) del agua consumida en las viviendas de la entidad podría recibir tratamiento en el sitio donde se genera, para su reutilización inmediata en actividades domésticas, exceptuando el consumo humano directo.

Es importante destacar que, de lograrse el tratamiento adecuado para la reutilización de estos 234 millones de metros cúbicos, se obtendría una reducción de aproximadamente un 23.4 % en la sobreexplotación actual de los mantos acuíferos de la entidad (1,000 millones de metros cúbicos). Si se considera el caso particular de una vivienda, su consumo hídrico podría reducirse en aproximadamente un 49 % mediante el tratamiento y reutilización del agua gris proveniente de la ducha, la lavadora y el lavabo.

V. IMPULSO DERIVADO DE POLITICAS PÚBLICAS

En cuanto a las políticas públicas que impulsan la reutilización del agua gris, se identifican tres instrumentos clave: a) el PEDGTO 2040 [22], b) los Programas Nacionales Estratégicos (ProNacEs) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación [25], y c) los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU [1].

La reutilización del agua gris generada por actividades domésticas en viviendas se alinea directamente con las preocupaciones y retos establecidos en la dimensión Medio Ambiente y Territorio del PEDGTO 2040. En relación con los ProNacEs, este problema se vincula con el ProNacEs Agua. Finalmente, incide directamente en los ODS 6, 9, 11, 12 y 13, e indirectamente en los ODS 15 y 17.

VI. NORMATIVA OFICIAL MEXICANA

En México, actualmente no existe una norma oficial que regule de manera específica la reutilización de agua gris en entornos habitacionales. No obstante, es posible adoptar un marco de referencia basado en la norma NOM-003-ECOL-1997 [26], así como en las normas NOM-002-ECOL-1996 [27], NOM-001-ECOL-1996 [28] y NOM-001-SEMARNAT-2021 [29], como se describe a continuación.

La norma NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público, con el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud de la población. En particular, define dichos límites considerando escenarios de contacto directo e indirecto u ocasional por parte de los usuarios. La reutilización de aguas grises en viviendas puede considerarse dentro de la categoría de uso con contacto indirecto u ocasional. En este sentido, una vez que el agua gris sea tratada para cumplir con los lineamientos establecidos en la norma, podrá reutilizarse de manera segura. Los lectores interesados en conocer el detalle de los lineamientos a cumplir pueden consultar directamente la NOM-003-ECOL-1997.

De acuerdo con la norma NOM-127-SSA1-2021 [30], el agua gris tratada no debe utilizarse para consumo humano directo. No obstante, la norma NOM-003-ECOL-1997 implica que podría utilizarse en distintas actividades domésticas que no requieren agua potable. Por lo anterior, habrá casos que, una vez reutilizada el agua gris, el agua resultante podría requerir su descarga al drenaje municipal o a un cuerpo receptor nacional. En tal situación, deberán cumplirse los lineamientos establecidos en las normas NOM-002-ECOL-1996, NOM-001-ECOL-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021, según corresponda al tipo de descarga.

En este contexto, el cumplimiento de las normas mencionadas permite la reutilización del agua gris generada en viviendas, así como la disposición final (descarga) del agua resultante de su reúso, dentro de un marco regulatorio ambiental y sanitario aplicable.

VII. CONCLUSIONES

A partir de un análisis integral, este artículo presenta un panorama alentador para la reutilización del agua gris en viviendas del estado de Guanajuato. Este se sustenta en la creciente escasez hídrica, tanto a nivel global como nacional y estatal, así como en la estimación del volumen potencial de agua gris que podría ser tratada y reutilizada para reducir el

consumo doméstico y mitigar la sobreexplotación de los acuíferos en la entidad. Asimismo, se identifican las políticas públicas y la normativa mexicana que respaldan la implementación de esta práctica a nivel doméstico. En conjunto, estos elementos refuerzan la viabilidad y pertinencia de reutilizar el agua gris directamente en la misma vivienda donde se genera, como una estrategia para enfrentar el desabasto de agua potable actual y preservar este recurso vital para las generaciones futuras.

RECONOCIMIENTOS

El presente estudio se ha desarrollado en el marco del proyecto CIIC 059/2025 financiado a través de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2025 de la Universidad de Guanajuato. Los autores también agradecen las facilidades proporcionadas por la Universidad de Guadalajara para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Naciones Unidas. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/

[2] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Power generation costs 2019*. Recuperado de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf

[3] International Energy Agency (IEA). (2021). *Special report on solar PV global supply chains*. Recuperado de https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf

[4] Gobierno del Estado de Guanajuato. (2023). *Calentadores solares*. Recuperado de https://boletines.guanajuato.gob.mx/tag/calentadores-solares/

[5] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023, febrero 6). *INFORME DE LA ECONOMÍA NACIONAL*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/8053

[6] Virginia Tech, Biological Systems Engineering. (2014). *Greywater reuse: A guide for homeowners*. Recuperado de https://www.wellwater.bse.vt.edu/files/Greywater-reuse.pdf

[7] Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Morelia (SAPAM). (2024). *Aguas grises como mecanismos de reducción del consumo personal del agua*. Recuperado de https://sapam.gob.mx/site/aguas-grises-como-mecanismos-de-reduccion-del-consumo-personal-del-agua/

[8] Gross, A., Maimon, A., Alfiya, Y., Friedler, E. (2015). Greywater Reuse. Estados Unidos: CRC Press.

[9] Zhou, Y., Li, B., & Yang, Z. (2020). *Modeling and optimization of hybrid renewable energy systems: A review*. *Energy Systems*, *11*(2), 395-414. https://doi.org/10.1007/s42108-020-00096-z

[10] Tarazona, C. Y. C. (2020). *Sistema de recolección, filtrado y reutilización de aguas de lavadoras en la Urb. Casuarinas - San Juan de Lurigancho* (Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo). Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/56562/Tarazona_CYC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[11] Management of Greywater in Developing Countries: Alternative Practices, Treatment and Potential for Reuse and Recycling. (2018). Alemania: Springer International Publishing.

[12] UNICEF. (2021). *Urban water scarcity guidance note: Preventing Day Zero*. United Nations Children's Fund. Recuperado de https://www.unicef.org/wash/files/Urban_Water_Scarcity_Guidance_Note.pdf

[13] Dugard, J. (2021). *Water rights in a time of fragility: An exploration of contestation and discourse around Cape Town's "Day Zero" water crisis*. *Water*, *13*(22), 3247. https://doi.org/10.3390/w13223247

[14] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & UN-Water. (2021). *Progress on level of water stress: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2 – 2021 update*. FAO. https://doi.org/10.4060/cb6241en

[15] Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (2023, August 16). *25 countries face extremely high water stress*. World Resources Institute. https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries

[16] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020–2024: Resumen*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024

[17] Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia. Revista de Historia y Ciencias Sociales*, (89), 193–219. Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008

[18] Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2025). *Monitor de Sequía en México*. Comisión Nacional del Agua. Disponible en https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico

[19] Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2025). Portada. Comisión Nacional del Agua. Disponible en https://smn.cna.gob.mx/es/10-smn-general/portada

[20] Comisión Nacional del Agua. (2024, mayo 31). *Monitor de Sequía de México*. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Sequía/Monitor%20de%20sequía%20en%20México/Seguimiento%20de%20Sequía/MSM20240531.pdf

[21] Gobierno del Estado de Guanajuato, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), & COLMERN, A.C. (2014). *Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato: Resumen ejecutivo*. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. Recuperado de https://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/programa%20estatal%20hidraulico%20gto%20CD.pdf

[22] Instituto de Planeación del Estado de Guanajuato (IPLANEG). (2018, mayo 4). *Síntesis del Plan Estatal de Desarrollo de Guanajuato 2040*. Recuperado de https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/ped2040/wp-content/uploads/2019/01/PED2040_Sintesis_2018-05-04.pdf

[23] Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). (2024). *Tandeo 2024: Sistema de distribución de agua potable en León, Guanajuato*. Recuperado de https://www.sapal.gob.mx/tandeo2024

[24] Seguros GMX, (2018), ¿Qué actividades consumen más agua en casa?. Recuperado de https://www.gmx.com.mx/blog-gmx/%C2%BFqu%C3%A9-actividades-consumen-m%C3%A1s-agua-en-casa.html#:~:text=En%20promedio%2C%20una%20familia%20capitalina,vez%20que%20abrimos%20una%20llave .

[25] SECIHTI. (s.f.). *Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces)*. Secretaría Ejecutiva del Consejo de Humanidades, Ciencias y Tecnologías e Innovación. Disponible en https://secihti.mx/pronaces/

[26] NOM-003-ECOL-1997, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Ciudad de México, 1997. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311362/NOM_003_ECOL.pdf

[27] NOM-002-ECOL-1996, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Ciudad de México, 1996. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110538/NOM_002_SEMARNAT_1996.pdf

[28] NOM-001-ECOL-1996, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Ciudad de México, 1996. Recuperado de: http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/semarnat001.pdf

[29] NOM-001-SEMARNAT-2021, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, 2022. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5645374

[30] NOM-127-SSA1-2021, Secretaría de Salud, Ciudad de México, 2022. Recuperado de: https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5650705

Recibido 27 de junio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Estudio experimental de recubrimientos con óxido de cobre para placas absorbedoras planas en SAH

ROBERTO CARLOS SALMORÁN SALGADO[1*], JOSÉ ENRIQUE BOTELLO ÁLVAREZ[2], BRENDA RIOS FUENTES[3].

[1]Tecnológico Nacional de México en Celaya, Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.
[2]Tecnológico Nacional de México en Celaya, Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental.
[3]Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Guanajuato, Celaya, Gto.
*Autor de correspondencia: docente.invitado.rcss@itcelaya.edu.mx

RESUMEN Este estudio experimental evalúa recubrimientos acrílicos con óxido de cobre (CuO), sobre placas absorbedoras planas en calentadores solares de aire (SAH) para mejorar la eficiencia térmica. Se formularon y probaron tres concentraciones de CuO, monitoreando temperaturas superficiales de la placa, entrada/salida de aire y eficiencia térmica bajo convección libre. La formulación con 79.3 g/m^2 alcanzó una eficiencia térmica promedio de 14.5%, un 15% superior a las demás, gracias a una dispersión homogénea del CuO verificada por microscopía electrónica de barrido. Estos resultados destacan la importancia de la uniformidad en la distribución de nanopartículas para obtener una interacción efectiva con la radiación solar incidente en SAH.

PALABRAS CLAVE — Calentador solar de aire, óxido de cobre, recubrimiento selectivo.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar puede ser aprovechada en tecnologías fotoeléctricas o fototérmicas. Las tecnologías fototérmicas están basadas en el uso de colectores, concentradores y absorbedores solares. Los absorbedores solares se han empleado en el calentamiento de distintos fluidos como agua, aceites y aire. El calentamiento de aire se utiliza principalmente en la deshidratación de alimentos. Los calentadores solares de aire (SAH) presentan una geometría prismática rectangular y están conformados por una cubierta de vidrio plano, liso y transparente, así como por una placa metálica denominada superficie absorbedora. El aire fluye entre la cubierta y la placa por mecanismos convectivos, incrementando su temperatura mediante transferencia de calor por conducción al ponerse en contacto con la superficie metálica, la cual recibe la radiación solar incidente y la transforma en energía interna. El componente clave en el desempeño térmico de estos sistemas es la placa absorbedora, que está constituida por una placa metálica comúnmente de aleaciones ferrosas y una película que recubre la superficie expuesta de la placa a la radiación solar. La película está conformada por partículas de óxidos metálicos "negros" depositadas por diferentes tecnologías [1]. La energía absorbida por la película se transfiere tanto al aire como hacia la placa metálica por conducción. La placa metálica tiene como función principal el almacenamiento de energía, que toma relevancia cuando la radiación solar decrece.

La absorbancia (α) corresponde a la fracción de la radiación solar incidente que es captada por una superficie, mientras que la emisividad (ε) representa su capacidad para emitir energía térmica en forma de radiación infrarroja. Diversos estudios han demostrado que los recubrimientos selectivos, definidos como aquellos que combinan alta absorbancia solar con baja emisividad térmica permiten maximizar la captación de energía y reducir las pérdidas por radiación [2] [3]. Estos recubrimientos suelen estar constituidos por metales, óxidos metálicos y materiales dieléctricos, organizados en configuraciones simples o multicapa. La implementación estas formulaciones debe considerar aspectos clave como la durabilidad, estabilidad morfológica y costos [4].

El uso de óxido de cobre (CuO) como aditivo en recubrimientos acrílicos ha despertado interés debido a su estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y propiedades ópticas adecuadas. El CuO presenta una alta absorbancia en el rango del espectro visible, además de propiedades semiconductoras que favorecen su interacción con la radiación solar incidente [5]. La incorporación controlada de nanopartículas de CuO en matrices poliméricas contribuye al incremento de la eficiencia térmica, siempre que se logre una adecuada dispersión del material [6]. Esta condición puede ser verificada mediante técnicas de caracterización estructural, tales como la microscopía electrónica de barrido [7].

En el presente trabajo se desarrolla un estudio experimental sobre recubrimientos acrílicos formulados con diferentes concentraciones de óxido de cobre aplicados sobre placas absorbedoras de acero al carbón en un SAH de tipo placa plana. El objetivo es identificar la concentración óptima de CuO que permita maximizar la temperatura superficial de la placa y la eficiencia térmica del sistema. Asimismo, se evalúa la distribución del CuO sobre la superficie de los recubrimientos mediante análisis de microscopía electrónica, con el fin de establecer su relación con el desempeño térmico observado.

II. METODOLOGÍA

Se fabricaron 3 SAH, como se muestra en la Fig. 1, empleando madera de pino de ¾ de pulgada de espesor y recubierto con esmalte negro mate, con dimensiones de 124 cm de largo, ancho de 53 cm y profundidad de 15 cm. La base interna fue aislada con un colchón de fibra de vidrio rosa de 1 ½ pulgada de espesor. Cada SAH cuenta con tres orificios inferiores de 5 cm de diámetro para el ingreso de aire y un único orificio superior de 10 cm de diámetro para la salida del aire. La cubierta superior consistió en vidrio plano oscurecido de ¼ de pulgada de espesor.



Fig. 1. Cuerpo del SAH.

Se construyó una plataforma para exponer los SAH y sus correspondientes placas absorbedoras a las mismas condiciones ambientales. Sus dimensiones son 190 cm de largo y 180 cm de ancho, con una inclinación de 30º respecto a la horizontal, sobre la cual se colocaron, como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. SAH instalados en plataforma.

Se prepararon recubrimientos mezclando diferentes cargas de CuO con 100 mL de barniz acrílico, conforme a lo descrito en la Tabla I. Las mezclas fueron colocadas en tubos Falcon de 50 mL y homogenizadas en mezclador de vórtice de alta velocidad (Intllab®) durante 10 minutos. Las mezclas fueron diluidas en thinner para aplicarse con una pistola de aire comprimido. La aplicación de pintura fue realizada por pintores profesionales para lograr una película homogénea.

TABLA I. ESPECIFICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Número de muestra	CuO (g)	Concentración (g/m^2)
1	3	4.76
2	50	79.36
3	160	253.96

Las temperaturas del aire a la entrada y salida de los SAH fueron medidas utilizando termopares tipo J (Maxim Integrated DS18B20 -155-122 ºC), cuyos datos fueron registrados en una PC portátil, mediante conexión inalámbrica. La velocidad del aire a la entrada se determinó con un anemómetro de hilo caliente (Hot Wire Traceable Anemometer/Thermometer 4330CC, 0.2-20 m/s). La radiación solar incidente sobre la superficie de los SAH fue cuantificada mediante un solarímetro (SM206, 0-2,000 W/m^2). Las condiciones ambientales se monitorearon con una estación metereológica portátil colocada en el sitio de medición (Genérica, -40-60 ºC, 20-90% humedad). La temperatura superficial de las placas absorbedoras fue determinada mediante una cámara térmica portátil (Flir TG165, -25-380 ºC). Los experimentos se realizaron por triplicado durante tres días consecutivos, entre marzo y mayo del 2025, en un horario comprendido entre las 11:00 y 16:00 horas.

La eficiencia térmica η se estima de acuerdo con la Ec. (1) [8], que es el cociente entre la cantidad de calor cedido por la placa absorbedora al aire y la radiación solar incidente. Donde $\dot{m}$ es flujo másico de aire, Cp su capacidad calórica, T_{ao} y T_{ai} sus temperaturas en la salida y entrada de SAH, I_{solar} es la radiación solar y A_{plate} es el área de la placa absorbedora expuesta. Para estimar el flujo másico de aire es necesario medir la velocidad de aire a través de los orificios inferiores, Fig. 1. La densidad y capacidad calórica del aire fueron estimadas a la temperatura promedio de la entrada y salida del SAH [9].

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{ao} - T_{ai})}{I_{solar}A_{Plate}} \quad (1)$$

III. RESULTADOS

En las Fig. 3 (a), (b) se presentan fotografías de las láminas de acero al carbón utilizadas como placas absorbedoras. La Fig. 3 (a) refiere la lámina antes de la aplicación del recubrimiento acrílico, mientras que la Fig. 3

(b) posee la cubierta con CuO a una concentración de 79 g/m^2. La Fig. 3 (c) se presenta una fotografía de microscopía electrónica de una sección de lámina, los puntos azules corresponden a las partículas de cobre dispersas en la superficie.

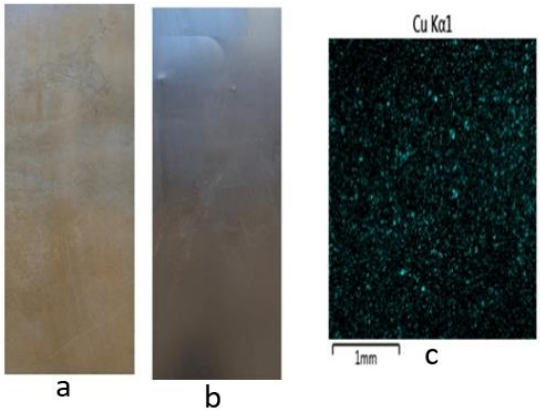


Fig. 3 (a), (b), (c). Aspectos de las láminas de acero al carbón. (a) antes de la aplicación, (b) después de la aplicación del recubrimiento acrílico, (c) distribución de las partículas de Cu sobre la superficie, mediante microscopía electrónica.

La dispersión homogénea de las partículas sobre la superficie es un factor relevante en cuanto su capacidad de absorción de la radiación solar. La superposición de capas de partículas, así como su aglomeración limitan la capacidad de absorción de la radiación por superficie expuesta. De acuerdo con la Ley de Lambert y Beer propuesta para la absorción de radiaciones monocromáticas de soluciones líquidas, establece que la energía absorbida es proporcional a la concentración de las moléculas absorbentes. Este mismo principio puede explicarse en el caso estudiado. Las partículas superficiales pueden generar un efecto de sobra sobre las partículas internas, como lo que sucede en los hornos de tubos, donde se buscan arreglos para maximizar la superficie expuesta a la radiación.

Por otro lado, las partículas y sus moléculas que absorben la radiación experimentan un aumento de su energía interna y su temperatura, las moléculas vibrantes golpetean a sus alrededores transfiriendo su energía por conducción. Bajo este contexto, la matriz polimérica debido a su baja conductividad térmica puede ofrecer una resistencia a la transferencia de calor hacia las placas absorbedoras de hierro. Por otro lado, la dispersión de cobre tiene un efecto relevante en las propiedades ópticas de la superficie. La absorbancia y la emitancia son una función ponderada de la concentración y distribución de los materiales que conforman la superficie. Una película conformada únicamente de CuO quizá sería un absorbente ideal de la radiación solar, sin embargo, también podría experimentar una gran pérdida de energía por el mecanismo de emisión.

En las Fig. 4 (a), (b) se presenta una termografía correspondiente a las placas absorbedoras durante el desarrollo experimental. La Fig. 4 (a) refiere a la fase inicial de exposición, donde las temperaturas más elevadas se concentran en las regiones superiores de la placa, mientras que, en la zona inferior, particularmente en la entrada de aire, se registran temperaturas menores. Bajo condiciones de máxima radiación solar incidente, la distribución térmica se torna homogénea a lo largo de toda la superficie de la placa, como se observa en la Fig. 4 (b).

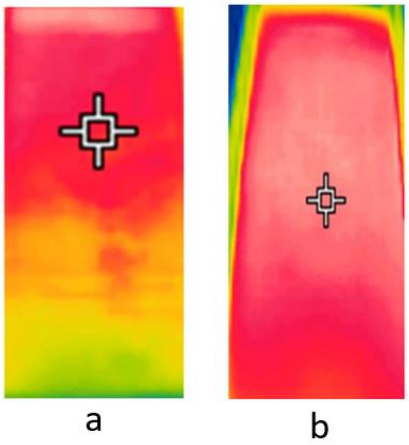


Fig. 4 (a), (b). Mapas térmicos de las placas durante la experimentación. **(a)** Periodo de inicio de calentamiento de las placas. **(b)** Periodo de máxima intensidad de la radiación solar. Azul (~ 20 ºC); Verde (~ 45 ºC); Amarillo (~ 70 ºC); Rojo (~ 95 ºC). Escala basada en la cámara termográfica.

Las Fig. 5 y Fig. 6 presentan las temperaturas superficiales de las placas absorbedoras y la eficiencia térmica de los SAH correspondientes a las muestras 1, 2, 3. La muestra 1 presentó las menores temperaturas y la eficiencia más baja correspondiente a 6.7%, mientras que la muestra 2 alcanzó mayores temperaturas con estabilidad y una eficiencia térmica de 14.5%. En contraste, la muestra 3 registró una eficiencia inferior pese a su temperatura elevada, atribuible a una mayor dispersión térmica.

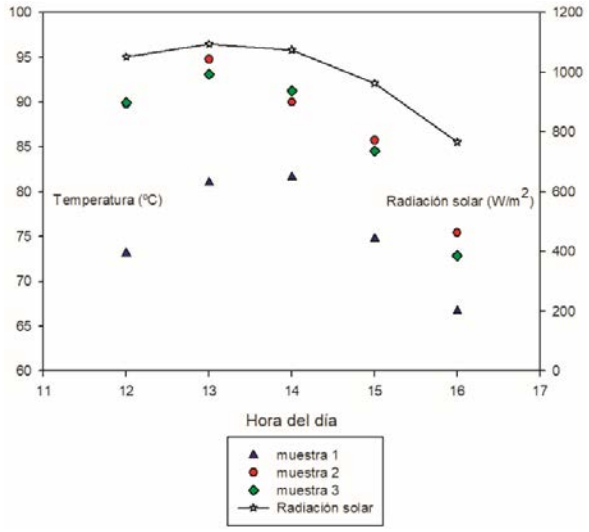


Fig. 5. Temperatura superficial de la placa absorbedora.

ISSN: 2448 – 7775 © 2025 Identidad Energética

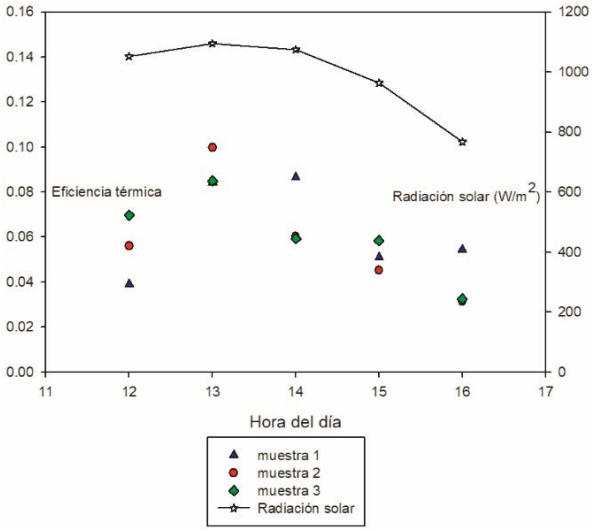


Fig. 6. Eficiencia térmica de los SAH.

Las pruebas se realizaron bajo el régimen de convección libre donde las velocidades de aire medidas en la entrada de los SAH están en un rango de 0.1 a 0.3 m/s. El calentamiento uniforme de la placa absorbedora puede conducir a la formación de bolsas de aire caliente, así como flujos recirculatorios que pueden limitar un flujo longitudinal del aire a través del SAH reduciendo su eficiencia térmica. Visualmente no se identificaron diferencias marcadas en los perfiles térmicos de las placas absorbedoras; sin embargo, las variaciones de eficiencia observadas indican que la concentración de CuO influye significativamente en el aprovechamiento térmico. La muestra 2 mejora la captación y estabilidad térmica, mientras que en concentraciones extremas reducen el desempeño térmico del SAH.

El análisis estadístico mediante ANOVA (análisis de varianza) de un factor aplicado a los valores de temperatura superficial promedio mostró diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones evaluadas (P=0.044). En la Tabla II se presentan los resultados donde se observa que al menos una de las muestras difiere respecto a las demás con un nivel de confianza del 95%. Este hallazgo confirma que la concentración de CuO influye significativamente en la captación térmica bajo condiciones de convección libre.

TABLA II. ANÁLISIS DE VARIANZA ENTRE LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE CuO.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	P
Entre concentraciones	428.23	2	4.06	0.044
Error	631.45	14		
Total	1059.68	16		

La caracterización morfológica realizada mediante microscopía electrónica reveló diferencias significativas en la distribución del CuO sobre las placas absorbedoras. La muestra 2 se observó una dispersión homogénea del material, sin presencia de aglomeraciones ni zonas con acumulación evidente, lo cual favorece una absorción solar uniforme y consistente. En contraste, la muestra 1 mostró regiones extensas con baja densidad de partículas, mientras que en la muestra 3 se identificaron cúmulos irregulares que afectan la continuidad óptica del recubrimiento. Estas observaciones coinciden con los hallazgos de [6], quienes destacan que la uniformidad en la distribución de óxidos metálicos en matrices poliméricas mejora sustancialmente el comportamiento térmico. La correlación entre la morfología superficial y el desempeño térmico observado sugiere que la calidad de la dispersión del CuO es un parámetro crítico para el diseño de recubrimientos funcionales.

En adición, la interacción entre el CuO y la matriz de recubrimiento es crucial para maximizar la eficiencia térmica [7], lo cual coincide con los resultados obtenidos en la muestra 2, donde se logró una dispersión homogénea y un comportamiento térmico estable. Por otro lado, concentraciones superiores a ciertos umbrales pueden incluir saturación superficial, reduciendo su eficiencia térmica [5], fenómeno que también se observó en la muestra 3. Así mismo, la importancia del recubrimiento polimérico con óxido metálico depende no solo de la concentración del material activo, sino de su distribución espacial y del tipo de unión con la matriz acrílica [6].

IV. CONCLUSIONES

La formulación de 79.3 g/m^2 de CuO en recubrimientos acrílicos eleva la eficiencia térmica de SAH a 14.5%, bajo condiciones de convección libre. Esto fue confirmado mediante un análisis de varianza (P=0.044) y microscopía electrónica de barrido, revelando una dispersión homogénea en la muestra, favoreciendo la interacción con la radiación solar.

Los hallazgos experimentales coinciden con reportes previos que indican que la dispersión controlada de óxidos metálicos en matrices poliméricas es un parámetro clave para maximizar el aprovechamiento de la energía solar en su modalidad térmica.

REFERENCIAS

[1] T. E. and S. S. Pergamon International Library of Science, “Selective Surfaces As Solar Energy Collectors,” 1975.

[2] M. G. Hutchins, “Spectrally Selective Solar Absorber Coatings” Wales (Great Britain), 1979.

[3] N. El-Mahallawy, M. R. A. Atia, A. Khaled, and M. Shoeib, “Design and simulation of different multilayer solar selective coatings for solar thermal applications,” *Mater Res Express*, vol. 5, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aab871.

[4] A. Boubault, C. K. Ho, A. Hall, T. N. Lambert, and A. Ambrosini, “Durability of solar absorber coatings and their cost-effectiveness,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 166, pp. 176–184, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.03.010.

[5] H. A. El-Wahab *et al.*, "Efficacy of zinc and copper oxide nanoparticles as heat and corrosion-resistant pigments in paint formulations," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-74345-0.

[6] R. Harzallah, M. Larnicol, C. Leclercq, A. Herbein, and F. Campana, "Development of high performances solar absorber coatings," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jul. 2019. doi: 10.1063/1.5117538.

[7] A. Scherer, O. T. Inal, and A. J. Singh, "Investigation Of Copper Oxide Coatings For Solar Selective Applications" 1983.

[8] P. S. Pardeshi, M. Boulic, A. (Hennie) van Heerden, R. Phipps, and C. W. Cunningham, "Review of the thermal efficiency of a tube-type solar air heaters," Jul. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.114509.

[9] D. W. Green and M. Z. Southard, "Perry's Chemical Engineers' Handbook," 2019.

BIOGRAFÍAS



M.C ROBERTO CARLOS SALMORÁN SALGADO Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, egresado de Ingeniería Mecánica y Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del TecNM en Celaya. Su área de especialización se centra en el desarrollo de sistemas termo-mecánicos y en la integración de sistemas de transferencia de calor, orientadas al aprovechamiento eficiente de la energía.



DR. JOSÉ ENRIQUE BOTELLO ÁLVAREZ Ingeniero Industrial Químico, con Maestría y Doctorado en Ingeniería Química con especialidad en Ingeniería de Procesos, egresado del TecNM en Celaya. Cuenta con amplia experiencia en el diseño y construcción de equipos industriales. Sus líneas de investigación se enfocan en el análisis de la sustentabilidad aplicada a procesos biotecnológicos y del sector alimentarios.



DRA. BRENDA RIOS FUENTES Ingeniera Bioquímica por el TecNM en Celaya, con Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería por la misma institución. Su línea de investigación se ha enfocado en la gestión ambiental en la Agroindustria. Pertenece al SNII nivel Candidato. Actualmente, forma parte del Departamento de Agroindustrial de la Universidad de Guanajuato.

ISSN: 2448 - 7775

IMAGEN GENERADA ARTIFICIALMENTE
CON FINES ILUSTRATIVOS



Identidad Energética
Todo sobre energía

cinergia.ug
cinergia_ug
rie@cinergiaug.org

Ciudad universitaria No. 112, Comunidad de San Rafael
de Uruétaro, 36880 Salamanca, Gto.

www.cinergiaug.org