

REVISTA

# IDENTIDAD ENERGÉTICA

Para la Difusión de la Investigación en Ciencia y Tecnología



ISSN: 2448 - 7775

Volumen 6

No. 1

Abril 2023

## Editores en Jefe

Dr. Iván Abel Hernández Robles  
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

## Editores Asociados

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

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

Dr. Fredy Sanz Ramírez  
Vicerrector de Investigación  
Universidad Manuela Beltrán  
Bogotá, Colombia

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

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

Dr. Serguei Maximov  
Instituto Tecnológico de Morelia  
Morelia, Michoacán, 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

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

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

## Coordinación Editorial

Dra. Xiomara González Ramírez  
Coordinadora Editorial y Seguimiento

L.A.D. Romina Jalinka Mena Umińska  
Edición, Diseño y Cuidado de Edición

## **Ubicación Óptima de PMU para Estimación de Estado**

Mario Llamas Rivas,  
Claudio R. Fuerte Esquivel,  
Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas,  
Alejandro Pizano Martínez,  
Víctor Javier Gutiérrez Martínez.  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
Universidad de Guanajuato.

**05**

## **Distribution System Loss Reduction and Management in a Region of Mexico**

Víctor Javier Gutiérrez Martínez,  
Eduardo A. Elizarraráz Alegría,  
Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas,  
Osvaldo Rodríguez Villalón,  
José Gerardo León González.  
Universidad de Guanajuato.  
Comisión Federal de Electricidad.

**12**

## **Diseño e Implementación de un Sistema de Medición Electromecánico de Películas Delgadas para Aplicaciones Fotovoltaicas**

Julet Marcela Méndez Hernández,  
Mariely Isabel Loeza Poot,  
Eric Noé Hernández Rodríguez,  
Juan Francisco Reveles Arredondo,  
Adrián Hernández Pérez.  
Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.  
Tecnológico Nacional de México, Mérida, México.

**19**

## **Implementación del Sistema de Control de Tiristores en Tiempo Real Basado en SOGI-PLL**

Gabriel Aldair Conejo Acosta,  
Guillermo Tapia Tinoco,  
José Merced Lozano García,  
Alejandro Pizano Martínez,  
Luis Ramón Merchán Villalba.  
Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.

**26**

**VOLUMEN 6**

**NÚMERO 1**

**AÑO 2023**

**ISSN: 2448- 7775**

**Producción de Biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas**

Jean Carlo Velarde Meza,  
Litzzy Jhoanna Tiznado Osuna,  
Yoshlin Montserrat Aguilera Hernández,  
David Ulises Santos Ballardó.  
Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

**31**

Recibido 11 de agosto de 2022. Aceptado 09 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Ubicación Óptima de PMU para Estimación de Estado

M. LLAMAS RIVAS<sup>1</sup>, C. R. FUERTE ESQUIVEL<sup>1</sup>, E. A. ZAMORA CÁRDENAS<sup>2\*</sup>, V. J. GUTIÉRREZ MARTÍNEZ<sup>2</sup>,  
A. PIZANO MARTÍNEZ<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato.

\*Autor de Correspondencia: ezamora@ugto.mx

**RESUMEN** Este artículo propone un nuevo método basado en un nuevo modelo de optimización para la ubicación óptima de PMUs en sistemas de potencia, desde un punto de vista de estimación de estado, el cual utiliza programación lineal entera como algoritmo de solución. El método fue diseñado para minimizar el número de PMUs garantizando una observabilidad completa del sistema de potencia, considerando mediciones virtuales de inyección de corrientes. Esta metodología propone modificar el nivel de observabilidad de buses específicos donde se puede prescindir de la instalación de un PMU y no requiere del uso de las reglas de observabilidad; combina estratégicamente restricciones de igualdad y desigualdad, lo cual evita la necesidad de hacer cambios de topología en la red, y por tanto, de su matriz de incidencia nodal asociada. Además, se presenta un análisis de confiabilidad del sistema de medición considerando contingencias como la pérdida de un solo PMU.

**PALABRAS CLAVE**— Ubicación óptima, PMU, optimización, estimación de estado.

## INTRODUCCIÓN

El Estimador de Estado (EE) es una de las aplicaciones más importantes que componen el conjunto de funcionalidades de los Sistemas de Control de Energía (SCE), en los cuales se determinan las acciones de operación y control de los modernos Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) [1-3]. Su función es fundamental para monitorear el estado operativo de los SEP, ya que su salida es utilizada como condición inicial para importantes estudios en estado estacionario y transitorio que se realizan en línea y fuera de línea en SCE, para garantizar una operación segura y confiable del sistema. En este sentido, mientras más preciso, eficiente y confiable sea un EE, más efectivas y precisas serán las decisiones de control que se tomen en el SCE.

Además de la exactitud del modelo de red y de la formulación matemática del problema de optimización, la precisión de un EE depende en gran medida del esquema de medición disponible para el EE. Actualmente, los Sistemas de Medición de Área Amplia (SMAA) son los sistemas de medición más avanzados y son altamente confiables, ya que se basan en Unidades de Medición Fasorial (PMU, por sus siglas en inglés), ellos pueden proporcionar mediciones fasoriales sincronizadas en tiempo real al EE [4-5]. Debido a su alto índice de muestreo y su capacidad de sincronización, los PMUs proporcionan información más detallada y precisa acerca de la operación en estado estable y transitoria de un SEP, que aquella que proporcionan otras tecnologías de medición existentes [6-7], por lo que su integración gradual a los sistemas de potencia está propiciando el desarrollo de

nuevos algoritmos y metodologías cada vez más eficientes para el monitoreo y control del SEP [8].

El tipo de mediciones disponibles y su distribución a lo largo y ancho de su topología, determina la cantidad de buses observables en una red eléctrica. Cuando la cantidad de mediciones disponibles es suficiente para observar todos los buses de dicha red, se dice que la red eléctrica tiene observabilidad completa [9].

En un EE un análisis de observabilidad de la red eléctrica es necesario para determinar si el conjunto disponible de mediciones es suficiente para estimar todas las variables de estado del sistema de potencia, debido a que la observabilidad completa de la red es una condición necesaria para estimar el vector completo de variables de estado de un SEP. En este sentido, es importante tomar en cuenta que un solo PMU proporciona la medición fasorial tanto del voltaje en el bus donde está ubicado como de las corrientes de las ramas que salen de él. Empleando además las leyes de Kirchhoff y de Ohm un solo PMU permite observar el bus donde es colocado y sus buses adyacentes. Tomando esto en cuenta, un sistema de potencia puede ser completamente observable con un conjunto menor de PMU que el número total de buses, si los conjuntos de medición y su distribución son suficientes para estimar su estado actual de operación [9]. Por tanto, importantes estrategias de Ubicación Óptima de PMU (UOP) han sido desarrolladas por diversos grupos de investigación alrededor del mundo, donde generalmente el planteamiento del problema consiste en reducir al mínimo posible la cantidad de PMUs requeridos, así como determinar su ubicación óptima para poder observar la totalidad de los buses de un sistema de potencia [10-11]. En este sentido, una

de las estrategias de reducción del número de PMUs más relevantes y utilizadas en la mayoría de los trabajos de investigación propuestos en las últimas 2 décadas, consiste en fusionar cada uno de los Buses de Inyección Cero (BIC) con alguno de sus buses adyacentes, reduciendo así el número de buses disponibles para la ubicación de PMU [12].

Debido a que la efectividad del método de fusión de buses es independiente del tipo de estudio o investigaciones realizadas en los trabajos de investigación propuestos, su preferencia en estudios de UOP ha permanecido vigente a través de muchos años. Por ejemplo, en 2005 [13], los autores utilizaron fusión de buses junto con el algoritmo de Programación Lineal Entera (PLE) para obtener la UOP, donde se mostró el efecto de la integración de PMU en el desempeño computacional y en el proceso de eliminación de datos erróneos en EE. En 2009, se utilizó junto con los algoritmos de solución *Branch and Bound* y *Genético* para obtener la UOP obteniendo un menor número de PMUs que con otros algoritmos existentes [14]. Mientras que en 2016 se utilizó el método junto con la propuesta de 3 reglas para determinar el mejor candidato a fusionarse con los BIC. La solución del problema de UOP se obtuvo con el algoritmo de PLE [15]. Además, en 2020 la fusión de buses y el algoritmo de solución de polinización de flores se utilizaron para determinar la UOP considerando la investigación de los casos de falla de un solo PMU y la salida de operación de una sola línea [16].

Aunque es uno de los métodos más efectivos reduciendo el número de PMU, cuando se utiliza la fusión de BIC no es posible observar todos los buses del sistema, por tanto, el estado del sistema no puede ser estimado utilizando la UOP obtenida originalmente. Para sobrellevar este inconveniente, ha sido una práctica común utilizar reglas de observabilidad basadas en las Leyes de Kirchhoff y de Ohm, las cuales permiten calcular voltajes de bus y corrientes de rama para ser consideradas como pseudo-mediciones [17]. De esta manera se logra alcanzar la observabilidad completa del sistema y, por tanto, es posible estimar el estado de operación de todo el sistema [18]. Sin embargo, debido a que es un método topológico, la fusión de cada BIC implica la necesidad de hacer cambios en la topología del sistema, es decir, modificaciones de las restricciones de observabilidad asociadas con la estructura de la matriz de incidencia.

En esta investigación una nueva metodología topológica para determinar la UOP es propuesta. En lugar de la fusión de buses, esta propuesta alternativa utiliza las inyecciones de corriente en BIC como mediciones virtuales, las cuales, son mediciones no físicas de la Ley de Corrientes de Kirchhoff en buses que no tienen ni generación ni carga, es decir, las mediciones virtuales son la suma de las corrientes que entran y salen de este tipo de bus, las cuales, siempre serán igual a cero aunque no se encuentren físicamente presentes. De esta forma se evita la necesidad de hacer cambios de topología. En lugar de hacer modificaciones a la estructura de la matriz de incidencias, esta propuesta consiste en determinar el nivel de observabilidad que requieren sus restricciones de desigualdad, cuyo valor es seleccionado de acuerdo con la identificación de 3 tipos de buses específicos, en los cuales

se puede prescindir de la ubicación de PMU porque son observables.

Con el uso de las mediciones virtuales de inyección de corrientes en BIC, la metodología propuesta permite garantizar la observabilidad completa del sistema sin la necesidad de utilizar reglas de observabilidad ni de calcular pseudo-mediciones. La propuesta obtiene resultados similares a los obtenidos con el método de fusión de buses sin cambios de topología y sin utilizar reglas de observabilidad. Además del modelo propuesto para desarrollar esta nueva metodología, esta propuesta presenta el análisis de los casos de incremento de la confiabilidad de la solución de la UOP para un conjunto de buses específico y para todos los buses del sistema ante contingencias de la pérdida de un solo PMU.

Para probar la metodología propuesta se utilizaron los sistemas de 14, 30 y 57 buses del IEEE, cuyos resultados de simulación se obtuvieron utilizando el algoritmo de solución de PLE del toolbox de optimización de Matlab [19].

## I. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Considerando un punto de vista de EE, el método propuesto se diseñó para obtener la UOP, que permita obtener la cantidad mínima necesaria de PMU cuya distribución proporcione una observabilidad completa y poder estimar el vector de estados completo de un sistema.

En esta propuesta cada BIC de la red eléctrica es considerado contar con mediciones virtuales de inyección de corrientes, con las cuales se observan tanto las variables de estado del propio BIC como las de sus buses adyacentes, como son buses terminales y/o buses de paso adyacentes a un BIC. Por ejemplo, la ecuación lineal (1) representa a una medición de inyección de corrientes que es virtualmente ubicada en el BIC (bus 7) del sistema IEEE14, que se muestra en la Fig. 1, donde  $\theta$  y  $r$  son el valor de la medición virtual de inyección de corrientes y su residuo, respectivamente, mientras que el resto de los términos son la suma de corrientes saliendo del bus 7 y representa la relación lineal de las variables de estado con dicha medición virtual.

La integración de (1) en el esquema de medición de un EE permite observar y estimar las variables de estado en los buses 4, 7, 8 y 9 de la red.

$$\theta = I_{7-4} + I_{7-8} + I_{7-9} + r. \quad (1)$$

Debido a que las mediciones de inyección de corrientes pueden ser virtualmente ubicadas en todos los BIC de la red, su implementación no representa ningún costo económico ni por su valor ni por su instalación. Además, proporcionan mayor precisión que los PMUs, ya que por su naturaleza virtual no contienen error de medición.

Tomando en cuenta estas ventajas, en este trabajo de investigación se presenta un análisis de UOP considerando mediciones virtuales de inyección de corrientes en todos los BIC de la red eléctrica, para obtener la observabilidad completa de la red y un proceso de estimación de estado más preciso.

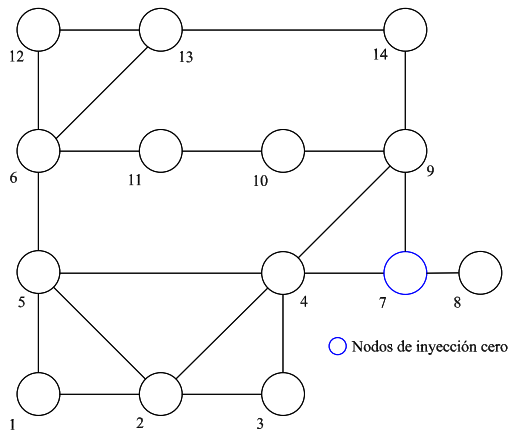


Fig. 1. Sistema de 14 buses del IEEE.

## II. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA UOP

Considerando el planteamiento del problema descrito en la sección anterior, el problema de optimización para el análisis de UOP es formulado para minimizar el número de PMUs, garantizando la observabilidad completa de la red, desde un punto de vista de estimación de estado. El modelo propuesto utiliza restricciones de igualdad para considerar el efecto de la ubicación de mediciones virtuales de inyección de corrientes en los BIC de la red, así como el efecto en sus buses adyacentes. Además, en lugar de modificar la estructura de la matriz de incidencia nodal, utiliza diferentes niveles de observabilidad para la definición de las restricciones de desigualdad, como se muestra a continuación:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

sujeto a

$$x_k = 0, \quad \forall k = 1, \dots, N_{BIC} \quad (3)$$

$$x_m = 0, \quad \forall m = 1, \dots, N_{T \in BIC} \quad (4)$$

$$x_l = 0, \quad \forall l = 1, \dots, N_{P \in BIC} \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_{N \times N} \mathbf{X}_{N \times 1} \geq \mathbf{B}_{N \times 1} \quad (6)$$

Donde  $\mathbf{A}$  es la matriz de incidencia de los buses de la red, cuya estructura se conforma de la siguiente manera:

$$\mathbf{A}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } j = i \text{ o } j \in i \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}, \quad (7)$$

$\mathbf{X}$  representa el estatus del conjunto de variables de decisión, es decir, indica si el  $i$ -ésimo bus de la red eléctrica está equipado o no con un PMU, como se muestra a continuación,

$$\mathbf{X}_{N \times 1} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T, \quad x_i \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{si un PMU es ubicado en el bus } i \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}, \quad (9)$$

$\mathbf{B}$  representa el estatus del nivel de observabilidad que se requiere garantizar en cada uno de los buses del sistema, su estructura se conforma de acuerdo con la siguiente definición,

$$\mathbf{B}_{N \times 1} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N]^T, \quad b_i \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{si es un BIC, un bus adyacente} \\ & \text{a un BIC (nodo terminal o} \\ & \text{nodo de paso).} \\ 1, & \text{de otro modo} \end{cases}. \quad (11)$$

$N$ ,  $N_{BIC}$ ,  $N_{T \in BIC}$  y  $N_{P \in BIC}$  son el número total de buses del sistema, número de BIC, número de buses terminales adyacentes a un BIC y el número de buses de paso adyacentes a un BIC con el menor índice de conectividad. Es importante señalar que para el último caso se elige solo un bus de paso por cada BIC.

En esta propuesta la Ley de Corrientes de Kirchhoff que se cumple en los BIC, se considera como mediciones de inyección de corrientes que están disponibles en un formato virtual. Por tanto, las restricciones de igualdad (3) son implementadas para aprovechar el uso de tales mediciones virtuales en lugar de ubicar e incrementar el número de PMUs en BIC. Similarmente, las restricciones (4) y (5) se han desarrollado para garantizar la no ubicación de PMU en buses terminales y/o de paso adyacentes a un BIC que pueden ser indirectamente observados por dicho BIC, y por tanto estimados. Ambos tipos de buses adyacentes a un BIC se encuentran definidos en (11).

Finalmente, las restricciones de desigualdad (6) garantizan que se cumpla el objetivo de la UOP con el nivel de observabilidad,  $\mathbf{B}$ , requerido en cada uno de los buses del sistema. El nivel de observabilidad en cada bus puede tomar únicamente el valor de 0 o 1 como se indica en (10), donde 0 es asignado a las restricciones de los BIC, buses terminales y buses de paso que son adyacentes a un BIC, mientras que 1 es asignado a las restricciones del resto de buses del sistema que están disponibles para la ubicación de un PMU.

## III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El método propuesto se implementó en un código digital desarrollado en MATLAB. El código digital utiliza el método de PLE del toolbox de optimización de MATLAB para la solución del problema [19]. Los resultados de simulación se obtuvieron utilizando los sistemas de 14, 30 y 57 buses del IEEE, como sistemas de prueba.

Para validar la propuesta, los resultados de simulación obtenidos son presentados en comparación con los resultados de simulación obtenidos utilizando el algoritmo de UOP basado en la técnica de fusión de buses, los cuales también están reportados en la literatura abierta disponible [15].

### A. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Esta sección se ha desarrollado para mostrar la aplicación detallada y paso a paso del método de UOP propuesto. Para llevar a cabo tal demostración, se utilizó el sistema de prueba IEEE14 que se muestra en la Fig. 1. Esta red consta de 5 buses de inyección de potencia, 8 buses de carga y el bus 7 que es el único BIC de la red, el cual es considerado para ubicar virtualmente las mediciones de inyección de corrientes y hacer la red completamente observable, desde el punto de vista estimación de estado.

Para la aplicación de la propuesta, el primer paso del algoritmo consiste en activar las restricciones de igualdad (3) correspondientes a los BIC de la red, en este caso  $x_7 = 0$ . Una vez que esto sucede, el nivel de observabilidad de su correspondiente restricción de desigualdad,  $B(7)$ , es cambiado en (6) para obtener la siguiente restricción de desigualdad,  $f_7 \geq 0$ . Después, el algoritmo hace una búsqueda en la matriz de incidencia de buses,  $A$ , para identificar los buses con menor conectividad que son adyacentes a cada BIC, como son los buses terminales o los buses de paso. En este caso el algoritmo encuentra el bus terminal 8 y activa su correspondiente restricción de igualdad (4) haciendo  $x_8 = 0$ , donde similarmente al caso del BIC su correspondiente restricción de desigualdad es  $f_8 \geq 0$ .

Finalmente, el algoritmo de solución del problema de optimización basado en la técnica de PLE es aplicado incluyendo los conjuntos de restricciones de igualdad y desigualdad resultantes de la aplicación del método propuesto al sistema de prueba. Los conjuntos de restricciones resultantes de la aplicación del método propuesto, para el sistema IEEE14 son los que se muestran en la Tabla I.

TABLA I. RESTRICCIONES DE OBSERVABILIDAD, SISTEMA IEEE14.

Restricciones de desigualdad	Restricciones de igualdad	
	(BIC)	(Terminal)
$AX \geq B$		
$f_1 \geq 1$		
$f_2 \geq 1$		
$f_3 \geq 1$		
$f_4 \geq 1$		
$f_5 \geq 1$		
$f_6 \geq 1$		
$f_7 \geq 0$	$x_7 = 0$	
$f_8 \geq 0$		$x_8 = 0$
$f_9 \geq 1$		
$f_{10} \geq 1$		
$f_{11} \geq 1$		
$f_{12} \geq 1$		
$f_{13} \geq 1$		
$f_{14} \geq 1$		

La solución óptima obtenida por el método propuesto consta de 3 PMUs, los cuales deben ser ubicados en los buses {2, 6 y 9} de la red eléctrica. Para fines de validación de esta propuesta, cabe señalar que la solución de UOP encontrada es la misma encontrada por el método de fusión de buses [15, 20], como se muestra en la Tabla II. Es claro de la Fig. 2 que la UOP obtenida no proporciona una observabilidad completa de la red [12], ya que todos los buses de la red son observados excepto el bus 8. Por tanto, las mediciones de un PMU extra deberían ser adicionadas al esquema de medición para proporcionar observabilidad completa que requiere el EE del sistema para su ejecución [12]. Sin embargo, para evitar el incremento del número de PMU así como del costo de ello, en la mayoría de los trabajos de investigación reportados en la literatura abierta, se utiliza un procedimiento que consiste en aplicar las bien conocidas reglas de observabilidad [15,17], las cuáles permiten calcular sistemáticamente pseudo-mediciones de corrientes de rama y voltaje en buses no observados, y que son integradas a los esquemas de medición de los EEs.

Aunque este procedimiento es mucho más económico y permite obtener observabilidad completa de la red, está bien documentado que independientemente del método que se utilice para generar pseudo-mediciones, su uso tiene un impacto directo en el deterioro de la exactitud de los EEs [21-23].

En el caso del método propuesto, notar de la Tabla II que las restricciones de igualdad excluyen a los buses 7 y 8 de la posibilidad de ubicación de PMU, debido a que son identificados por el algoritmo como el BIC y el bus terminal, respectivamente. Sin embargo, la ubicación virtual de mediciones de inyecciones de corriente en el bus 7, permite obtener un esquema de medición que proporcione observabilidad completa de la red, sin necesidad de añadir un PMU extra o la integración de pseudo-mediciones calculadas mediante reglas de observabilidad.

TABLA II. ANÁLISIS DE UOP CON SISTEMA IEEE14.

Método	Número de PMUs	Ubicación de PMUs	Observabilidad
Fusión de buses	3	2, 6, 9	15
Propuesto	3	2, 6, 9	15

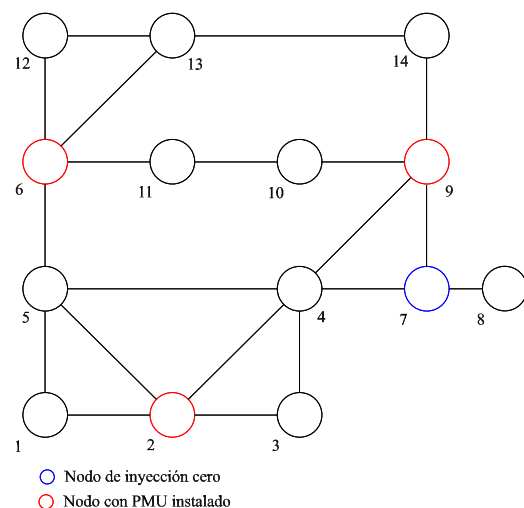


Fig. 2. Solución de UOP, Sistema IEEE14.



Entonces, la ubicación virtual de mediciones de inyecciones de corriente en el bus 7, permite obtener un esquema de medición que proporcione observabilidad completa de la red, sin necesidad de añadir un PMU extra o la integración de pseudo-mediciones calculadas mediante reglas de observabilidad. Además, las mediciones virtuales son bien conocidas como mediciones perfectas porque no introducen error al EE. Es importante señalar que estas son las principales contribuciones que el método propuesto aporta con respecto al método de fusión de buses.

La [Tabla III](#) muestra la comparación de los resultados obtenidos con ambos métodos de UOP utilizando los sistemas de 30, y 57 del IEEE. Las columnas 1 y 2 muestran el sistema y el método utilizado en cada caso de estudio, mientras que las columnas 3 y 4 muestran el número óptimo de PMU obtenido por cada método, y la ubicación óptima de PMU en cada caso. Por último, en la columna 5 se muestra el índice de observabilidad (Obs), es decir, el número de veces que los conjuntos de PMUs obtenidos observan a todos los buses del sistema. Es importante señalar que estos índices son utilizados para seleccionar la mejor solución entre las soluciones óptimas con mínimo local obtenidas por ambos métodos. Es claro de la [Tabla III](#) que para el sistema IEEE30 ambos métodos obtuvieron la misma cantidad, ubicación y nivel de observabilidad de PMU, mientras que en el caso del sistema IEEE57 el método propuesto obtuvo un PMU menos que con el método de fusión de buses, lo cual a su vez proporciona diferente ubicación y nivel de observabilidad de los PMU.

## B. CONFIABILIDAD ANTE LA PÉRDIDA DE UN PMU

Un análisis del incremento de la confiabilidad del sistema de medición ante la pérdida de un PMU específico se puede obtener utilizando el mismo modelo (2)-(11). Esto es posible utilizando una pequeña variante en dicho modelo, la cual consiste en asignar el valor de 2 a las restricciones de desigualdad correspondientes a cada grupo de buses conformado por cada bus en donde se quiere garantizar su observabilidad y sus buses adyacentes. A manera de ejemplo, considerar que se requiere incrementar la confiabilidad del sistema de medición ante la pérdida únicamente de un PMU ubicado en el bus 6 del sistema IEEE14.

Observando la [Fig. 1](#) es claro que ante la pérdida de un PMU ubicado en el bus 6, la confiabilidad de este bus y sus buses adyacentes {5, 11, 12 y 13} debe ser incrementada para mantener su observabilidad, lo cual se logra asignando un valor de 2 al nivel de observabilidad de sus correspondientes restricciones de desigualdad, como se observa en la columna 1 de la [Tabla IV](#). Además, las restricciones correspondientes a los buses {7 y 8} se igualan a cero como se describió en la sección anterior, mientras que el 1 es asignado a las restricciones de desigualdad del resto de buses del sistema.

La única solución óptima encontrada para este escenario requiere de 4 PMUs ubicados en los buses {2, 6, 10 y 13}, de manera que ante la pérdida del PMU en el bus 6 este se mantiene observado por el PMU ubicado en el bus 13, mientras que los buses observados originalmente por el PMU

en el bus 6, los cuales son {5, 11, 12} se mantienen observados por los PMUs ubicados en los buses {2, 10 y 13}, respectivamente.

La [Tabla V](#) muestra las soluciones de las UOPs para garantizar la observabilidad completa ante la falla de los PMU de la solución original {2, 6, 9}. Para el caso de falla en el PMU ubicado en el bus 2 se requieren 5 PMUs, como se puede observar en la tabla, donde es claro que tal solución garantiza la observabilidad completa ya que ante la pérdida del PMU instalado en el bus 2 este queda observado por los PMUs de los buses {4 y 5}, mientras que los buses {1 y 3} quedan observados por los PMUs de los buses {5 y 4}, respectivamente. Para el caso de falla en el PMU ubicado en el bus 9 la tabla muestra que se requieren 4 PMUs, donde es claro que cuando se pierde el PMU ubicado en el bus 9 este se mantiene observado por el PMU del bus 10, mientras que los buses {4 y 14} permanecen observados por los PMUs de los buses {2 y 13}, respectivamente. Finalmente, es claro que para garantizar la observabilidad completa ante la pérdida de uno de los 3 PMUs de la UOP original, se requiere ubicar más PMUs de manera preventiva, lo cual es obvio ya que para proporcionar mayor confiabilidad hay que incrementar el número de PMUs y, por tanto, el costo.

**TABLA III.** ANÁLISIS DE UOP CON OTROS SISTEMAS.

Sistema	Método	PMU	UOP	Obs
IEEE30	Fusión de buses	7	2,4,10,12,19,24,27	35
	Propuesto	7	2,4,10,12,19,24,27	35
IEEE57	Fusión de buses	12	1,6,9,10,15,19,25,28,32,49,53,56	54
	Propuesto	11	1,6,10,15,19,29,30,32,41,49,54	47

**TABLA IV.** RESTRICCIONES PARA PÉRDIDA DEL PMU EN EL BUS 6.

Restricciones de desigualdad	Restricciones de igualdad	
	(BIC)	(Terminal)
$AX \geq B$		
$f_1 \geq 1$		
$f_2 \geq 1$		
$f_3 \geq 1$		
$f_4 \geq 1$		
$f_5 \geq 2$		
$f_6 \geq 2$		
$f_7 \geq 0$	$x_7 = 0$	
$f_8 \geq 0$		$x_8 = 0$
$f_9 \geq 1$		
$f_{10} \geq 1$		
$f_{11} \geq 2$		
$f_{12} \geq 2$		
$f_{13} \geq 2$		
$f_{14} \geq 1$		

**TABLA V.** UOPs PARA MANTENER OBSERVABILIDAD COMPLETA.

PMU fallado	Solución para mantener la observabilidad completa
6	2, 6, 10 y 13
2	2, 4, 5, 6 y 9
9	2, 9, 10 y 13

#### IV. CONCLUSIONES

Se propuso un nuevo método para la ubicación óptima de PMU en sistemas de potencia desde un punto de vista de estimación de estado. El método fue diseñado considerando mediciones virtuales de inyección de corrientes, para garantizar la observabilidad completa de los sistemas de potencia, minimizando el número de PMUs. Aunque el método propuesto se basa en la técnica topológica, este no requiere de cambios de topología ni de una reestructuración de la matriz de incidencia de buses. La comparación de resultados de simulación con el método de fusión de buses demuestra que la consideración de mediciones virtuales de inyección de corrientes proporciona mejores resultados que con la estrategia de utilizar reglas de observabilidad. Además, la confiabilidad de la metodología propuesta demostró ser efectiva ante la pérdida de un PMU.

#### REFERENCIAS

[1] F. C. Schweppe and E. J. Handschin, "Static state estimation in electric power systems," *Proc. of the IEEE*, vol. 62, pp. 972-982, 1974.

[2] F. C. Schweppe and D. B. Rom, "Power system static-state estimation, Part II: Approximate model," in *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 125-130, Jan 1970. doi: 10.1109/TPAS.1970.292679.

[3] F. C. Schweppe, "Power system static-state estimation, Part III: Implementation," in *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 130-135, Jan 1970. doi: 10.1109/TPAS.1970.292680.

[4] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," in *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, April 1993. doi: 10.1109/67.207465.

[5] Muhayimana O. and Toman P., "A Review on Phasor Measurement Units and their Applications in Active Distribution Networks," *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Kigali, Rwanda, 2022, pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905351.

[6] M. Naglic, M. Popov, M. A. M. M. van ver Meijden and V. Terzija, "Synchro-Measurement Application Development Framework: An IEEE Standard C37.118.2-2011 Supported MATLAB Library," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 8, pp. 1804-1814, Aug. 2018, doi: 10.1109/TIM.2018.2807000.

[7] Joshi, N., & Khandelwal, A. (2023, January). "Importance of Phasor Measurement Unit in Modern Power System," *2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2023, pp. 23-26, doi: 10.1109/ICSSIT55814.2023.10060942.

[8] G. C. Patil and A. G. Thosar, "Application of synchrophasor measurements using PMU for modern power systems monitoring and control," *2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCEPIC)*, Melmaruvathur, India, 2017, pp. 754-760, doi: 10.1109/ICCEPIC.2017.8290464.

[9] Kotha, S. K. and Rajpathak, B., "Power system state estimation using non-iterative weighted least square method based on wide area measurements with maximum redundancy," *Electric power systems research*, vol. 206, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107794.

[10] Johnson, T, Moger, T., "A critical review of methods for optimal placement of phasor measurement units," *Int Trans Electr Energy Syst.* 2021, https://doi.org/10.1002/2050-7038.12698.

[11] A. Abdulkareem, D. Ogbe, T. Somefun, "Review of Different Methods for Optimal Placement of Phasor Measurement Unit on the Power

System Network," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1071-1081, 2020. doi: 10.25046/aj0506130.

[12] K. K. Bala, R. K. Mercy, R. N., "Complete and incomplete observability analysis by optimal PMU placement techniques of a network," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 13, no. 5, p. 1814-1820, 2018. https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.5.1814.

[13] X. Bei, Y.J. Yoon and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," *PSERC Publication*, vol. 1, 2005.

[14] B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal placement of PMUs for power system observability using topology based formulated algorithms," *Journal of Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, p.p. 2463-2468, 2009.

[15] N.H.A. Rahman and A.F. Zobaa, "Optimal PMU placement using topology transformation method in power systems," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 5, pp. 625-634, Sept. 2016. https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.06.003.

[16] A.A. Abdelsalam, et al., "Optimal PMUs placement considering ZIBs and single line and PMUs outages," *AIMS Energy*, 2020, vol. 8, no 1, p.p. 122-141, 2020. DOI: 10.3934/energy.2020.1.122.

[17] M. Baba, et. al., "Strategic and Significant Method for the Optimal Placement of Phasor Measurement Unit for Power System Network," *Symmetry*, vol. 12, no. 7, pp. 1-15, 2020. 1174. doi:10.3390/sym12071174

[18] A. Mishra and R. A. de Callafon, "Algebraic Approach to PMU Placement for Minimum Variance Linear State Estimation in Power Networks," in *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3217013.

[19] MATLAB Optimization Toolbox, The MathWorks, Natick, MA, USA. Available from: https://www.mathworks.com/help/optim.

[20] B. Xu and A. Abur, Optimal placement of phasor measurement units for state estimation. Final project report, PSERC 2005.

[21] K. Clements, "The impact of pseudo-measurements on state estimator accuracy," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/PES.2011.6039370.

[22] B. Ozsoy, and M.A. Gol, "A Hybrid State Estimation Strategy with Optimal Use of Pseudo-Measurements," *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571513.

[23] M. Farajollahi, A. Shahsavari and H. Mohsenian-Rad, "Linear Distribution System State Estimation Using Synchrophasor Data and Pseudo-Measurement," *2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*, College Station, TX, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784644.

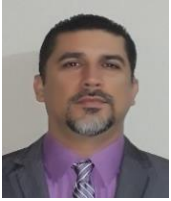
#### BIOGRAFÍAS



**MARIO LLAMAS-RIVAS** Recibió el título de Ingeniero Electricista de la Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, en 2020, y el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2022. Actualmente es Supervisor Operativo en la Gerencia del Centro Nacional de Control de Energía, Ciudad de México, México. Sus áreas de interés son el desarrollo de aplicaciones de seguridad operativa en tiempo real incluyendo los sistemas WAMS.



**CLAUDIO R. FUERTE ESQUIVEL** (Fellow, IEEE) Recibió el grado de Doctor de la Universidad de Glasgow, Glasgow, Reino Unido, en 1997. Actualmente es profesor de tiempo completo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. Sus intereses de investigación actuales incluyen el estudio de sistemas flexibles de transmisión de CA e infraestructuras críticas.



**ENRIQUE ARNOLDO ZAMORA CÁRDENAS** Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México, en 2001, y los grados de Maestría y Doctorado Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México. Sus intereses de investigación incluyen el análisis dinámico y de estado estacionario de sistemas inteligentes de energía eléctrica.



**ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ** Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México en 2001, y los grados de Maestría y Doctorado Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Es Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México. Sus intereses de investigación se centran en la operación óptima, el análisis dinámico y de estado estable de los sistemas de energía modernos.



**VICTOR J. GUTIERREZ MARTINEZ** Recibió el título de Ingeniero y los grados de Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, México, en 2000, 2004 y 2011, respectivamente. Actualmente, es profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México. Sus áreas de interés son el modelado y operación de sistemas de transmisión y distribución en el contexto de redes inteligentes.

Recibido 01 de agosto de 2022. Aceptado 09 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Distribution System Loss Reduction and Management in a Region of Mexico

VÍCTOR J. GUTIÉRREZ MARTÍNEZ<sup>1\*</sup>, EDUARDO A. ELIZARRARÁZ ALEGRÍA<sup>1</sup>, ENRIQUE A. ZAMORA CÁRDENAS<sup>1</sup>, OSVALDO RODRIGUEZ VILLALÓN<sup>1</sup>, JOSÉ G. LEÓN GONZÁLEZ<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato.

<sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad.

\*Autor de Correspondencia: vj.gutierrez@ugto.mx.

**ABSTRACT** Electric distribution systems are often characterized by poor performance and high losses within their circuits. These losses must be reduced with different methods well-proven in the industry such as capacitor placement, system management, and appropriate distributed generation modeling and location, helping to improve the overall electrical distribution companies' performance. For this purpose, by the use of the commercial package Synergi®, the determination of the suitable loss reduction method for different circuits of an electric distribution system in a region of Mexico is presented in this paper. Furthermore, some modifications to existing circuits are identified, evaluated, and suggested to achieve both the reduction of the technical losses and the improvement of the system's voltage regulation. Also, it is shown how once the suggestions derived from these studies are implemented, the expected improvement in the system's performance is achieved. Finally, the important role of a distribution network operator to increase the system's capabilities and assuring their improved performance is highlighted.

**KEYWORDS** – Distribution system; loss reduction; capacitor placement; voltage improvement; system management.

## I. INTRODUCTION

Losses in the electric distribution system have always remained an important worldwide issue to solve, either to reduce economical losses or to comply with the current performance policies. There are many different strategies to achieve these goals depending on the type of loss dealt with. The first type is the technical losses, which occur in the form of heat dissipation in different components of the distribution networks; their reduction involves not only system planning, improvement, and modeling tools; but also deploying higher-efficiency equipment, such as transformers and motors, e.g., manufacturers and researchers around the world are making efforts to minimize [1], [2] and evaluate [3] core losses of distribution transformers. The second type is the non-technical losses, which are derived from issues that occur outside the transportation of electrical energy or dissipation of power in distribution components, such as non-paying customers, past-due portfolio, bad business administration, and theft of electrical energy. Similar to technical losses, efforts are carried out to reduce non-technical losses [4]-[7].

In this context, technical losses are usually evaluated by finding the active power loss at peak load periods of the distribution system and multiplying it by the circuits loss factor [8]. This result times the considered period results in the energy losses (the commonly used periods range from monthly to yearly). It is important to mention that most SCADA systems can calculate the power losses of a distribution system, making energy loss evaluation faster and more efficient, and facilitating the engineer's job. The solutions for the two different types of losses may vary

considerably, some even include staff training and the use of new ways to disseminate information to customers to learn how to efficiently use electrical energy and reduce their energy consumption [9]. In this sense, some solutions to reduce technical losses include methods such as reactive power compensation, system management, and appropriate distributed generation location [10]. However, the electricity sector deregulation has added new constraints to the distribution system operation, since the market competition forces the distribution companies to operate under new and more strict efficiency standards. Hence, some of the well-known loss reduction methods should be properly tested and evaluated as discussed in this paper.

For the aforementioned, the impact of the restructuring of the Mexican electrical system on the distribution system operation is slightly presented in this paper. Furthermore, the technical losses of an operative region of a municipality of Mexico called Patzcuaro are calculated using the commercial software Synergi® [11], which provides the power losses in different circuits throughout the system. Then, to obtain the total technical losses, energy losses are calculated using a specialized Microsoft Excel macro provided in [12]. Both computer tools facilitate the distribution system operator's losses evaluation as well as provide an efficient and fast way to plan and reduce them in the electrical distribution systems.

## II. RESTRUCTURING OF THE MEXICAN ELECTRICAL SYSTEM

Most international electric distribution companies are immersed in a highly competitive global market. Their main purpose is to satisfy customers in terms of energy quality, price, service, and efficiency by using the proper technology and analysis tools. However, Fig. 1 shows that, although energy losses in the transmission and distribution systems of some developed countries are less than those of some developing countries [13], loss reduction still represents a challenge for all of them despite their economic development.

In this context, since the passing of a new Law regarding the deregulation of the electric industry in Mexico, its distribution system has new requirements to guarantee efficiency, energy quality, continuity, and security, since now the generation and energy marketing sectors are in the free market economy, i.e., non-governmental companies can now participate in the generation and sale sectors of electric energy and the Mexican State is the only responsible for operating the transmission and the distribution systems. Hence, for the importance of these systems to achieve a fair and competitive Mexican electricity market, the new Law stipulates that if the transmission and distribution systems operations do not meet a prespecified economic objective before two years, the Mexican Government may reserve the right to hire external help to carry out all the activities needed for these sectors [14]. This implies the proper modeling and analysis of all the changes that must be made to reduce technical and non-technical losses, which are some of the most important factors to improve. For example, Fig. 2 shows how the technical losses are increasing over the years, and it is prospected an increment of these up to 2021 [15]. It is worth noting in this Figure that the step increase in losses from 2009 to 2010 is because a former distribution company feeding the metropolitan area of Mexico City was declared in bankruptcy and the Federal Electricity Commission took charge of this area, accounting for the corresponding losses. Furthermore, a decrease in non-technical losses is also shown as a result of the implementation of different policies to address energy theft and the past-due portfolio can be observed.

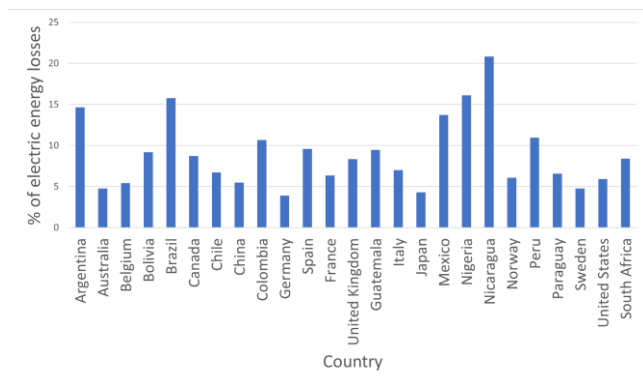


Fig. 1. Technical and non-technical transmission and distribution systems' energy losses in some countries in 2014.

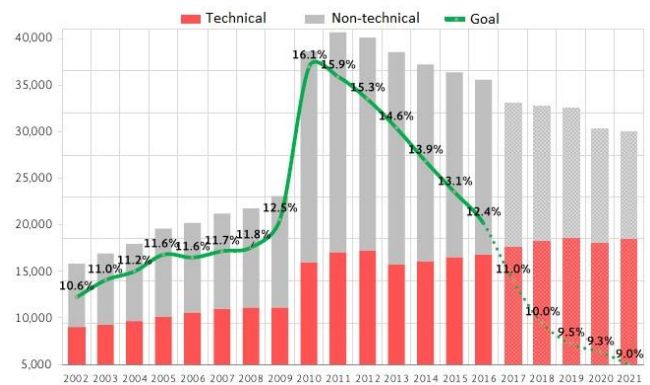


Fig. 2. Energy losses (GWh) of the Mexico distribution sector 2002-2021. Source: PRODESEN 2017-2031 (page 121), Secretaría de Energía.

Based on the aforementioned, the Mexican distribution sector must be a competitive business, i.e., it must keep trying to reduce its energy losses. For that purpose, three of the main methods of loss reduction are considered to have the major impact owing to the Mexican electrical distribution system characteristics, such as reactive power compensation, system management, and distributed generation. For instance, the simplest way to improve the power factor (PF) is the installation of capacitor banks since the reactive power compensation in a certain part of the grid provides significant benefits to the overall system. On the other hand, optimum system management helps to reduce technical losses, e.g., new service requirements increase losses, and proper loads management and the associated new infrastructure requirements may reduce their impacts on the system. The final approach considered in this paper for energy loss reduction is the appropriate location and analysis of distributed generation, which is defined as generators connected to the distribution system with a generation of less than 0.5 MW each, according to [14]. The effectiveness of distributed generation varies according to various aspects such as the proximity to loads, level of consumption of the nearby loads, and spillage of excess generation to another network with different voltage ratings. Some of the new cases of distributed generation involve renewable energies and previously installed small generators that have not been properly modeled in circuits when analyzing the grid by commonly used computational tools for the solution of power flow studies.

These are some of the new opportunities for improvement in the Mexican electrical distribution system, meaning not only a large amount of work but also many benefits. One important aspect of remodeling the system is taking into consideration the advantages Smart Grids (SG) bring to the system [16], i.e., another way to begin the improvement of the distribution networks functionality is through the implementation of the SG. One important aspect of their creation is the proper modeling of the different resources in the system, such as renewable generation, energy storage, and demand response. The cornerstone of the SG is the full deployment of the advanced metering infrastructure together with high-speed communication infrastructure for metering and control purposes. This integration of new technology can

lead to better distribution system planning and operation. Nonetheless, a key component of SG would be the modeling of distributed generation, allowing the evaluation of voltage regulation, voltage fluctuations, harmonics, and transformer configurations.

### III. ANALYSIS OF POWER LOSSES IN THE DISTRIBUTION SYSTEM OF THE PATZCUARO REGION

The single-line diagram of the distribution system under study corresponding to the area of the Municipality of Patzcuaro is shown in Fig. 3, and the length of its feeders is shown in Fig. 4. Simulations were carried out using the software Synergi®, by first modeling the system components in the software's Warehouse Module and then evaluating the system losses using the Power Loss Analysis module.

The Power Loss Analysis module of Synergi® is simple to use: first, it is assumed that the system has balanced loads by considering the peak demands of the feeder and allocating the loads along the circuits; second, a load flow analysis is performed; this results in an overview of the whole circuit power losses and the voltage regulation of the system. The resulting information is given in the format previously established in Synergi® and then is exported to Excel. To facilitate the handling of the resulting large amount of information, an Excel macro provided in [12] is used to evaluate the energy losses and to identify the location of the worst voltage regulation in the system. One of the objectives is to determine whether the circuits are within specified boundaries of losses and at the correct voltage levels.

Throughout the region, technical losses varied greatly due to the amount and type of loads connected to certain feeders. Synergi® allows double-checking the demand levels used for the study, PF, power losses in the circuit, and the total distributed generation if any. Also, determines the worst voltage regulation in the whole system on a per-phase basis, to ensure the voltage supplied to the users is within the permissible range, guaranteeing reliability and continuity in service. As an example, Tables I and II show the results of the load flow studies obtained with Synergi®.

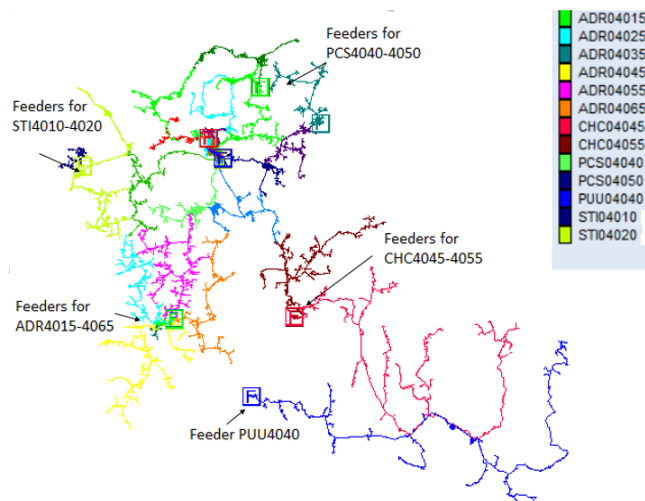


Fig. 3. Distribution system single-line diagram of the Patzcuaro area. Source: Federal Electricity Commission, Patzcuaro area.

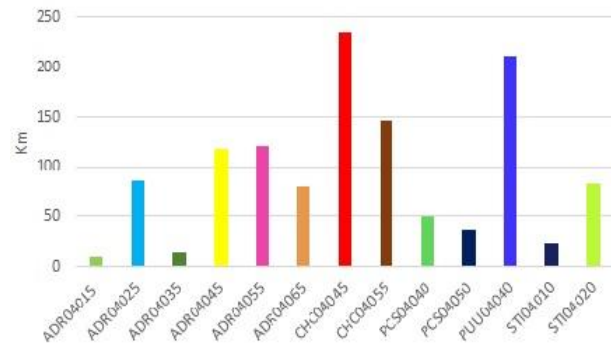


Fig. 4. Patzcuaro area feeders' length. Source: Federal Electricity Commission, Patzcuaro area.

In Table I the total power losses of the circuits ADR-4015 to ADR-4065 for May 2016 are shown; this allows the analysis of the circuits' power losses in certain sections of the zone to determine whether losses are adequate. The length of these circuits, the number of users connected, the voltage level used in the simulations (at the initial node of the circuits), the worst voltage regulation, and the corresponding name of the node are shown in Table II. It can be noticed from these results how the circuit ADR-4015 of 9.49 km with 1,757 users connected has a maximum demand of 1,060 kW and 284 kVAR; a PF of 0.97; and 4.1 kW of power losses. The worst percentage of voltage regulation of -10.125 is located at node OH-413294 (which is not shown in Fig. 3 owing to the size of the system).

The results of all the feeders are then placed into the Excel macro which calculates the energy losses using the load and loss factors of the circuit. The load factor is the customer or circuit ratio of the average demand to the maximum demand. The loss factor is obtained yearly from the distribution system operator [8].

TABLE I. SIMULATED POWER LOSSES IN THE PATZCUARO REGION.

Circuit	Max. demand (kW)	Max. demand (kVAR)	PF	Power losses (kW)
ADR-4015	1,060	284	0.97	4.1
ADR-4025	1,292	392	0.96	57.582
ADR-4035	929	292	0.95	8.045
ADR-4045	1,444	333	0.97	61.051
ADR-4055	869	36	1	12.187
ADR-4065	624	70	0.99	9.006

TABLE II. VOLTAGE REGULATION IN THE PATZCUARO REGION.

Circuit	km	Users	Simulated voltage (kV)	Worst voltage regulation (%)	Node name
ADR-4015	9.49	1,757	13.92	-0.84	SV_1228
ADR-4025	85.27	1,335	13.9	-6.25	OH_328080
ADR-4035	13.99	2,494	13.9	-1.108	OH_418731
ADR-4045	117.45	2,527	13.9	-10.125	OH_413294
ADR-4055	120.03	1,820	13.9	-3.08	OH_417695
ADR-4065	79.96	2,099	14.08	0	CB_11095

#### IV. LOSS REDUCTION APPROACHES

The approaches for power loss reduction in the distribution system vary depending on the specific characteristics presented in a circuit. Hence, depending on the section analyzed, a power loss reduction approach may be more or less efficient; for instance, if a circuit has low PF, capacitor placement may be needed to reduce the power losses. On the other hand, proper system management will prevent future problems due to a considerable loss increment owing to a new service, whereas the connection of distributed generation in sections with a high concentration of loads will help to reduce the system losses. The application of all these approaches for energy loss reduction to the distribution system of the Patzcuaro area is presented next.

##### A. CAPACITOR PLACEMENT

To determine the optimal location for capacitor banks it is necessary to first obtain the maximum and minimum demands of the circuits under study from the database of the distribution company. For this purpose, an annual graph is generated showing the minimum, average, and maximum active and reactive power demand throughout the year. The circuit analyzed was PUU-4030 of the feeder PUU-4040 shown in Fig. 3; this section presents a maximum demand of 1,415.07 kW and 544.701 kVAR with an original PF of 0.93.

This first study is to compare the results to analyze how the system will be affected by the installation of switchable or fixed capacitor banks. As a starting point, a load flow study is carried out, and then the *Capacitor Placement* option of Synergi® is used. Studies with minimum kVAR determine the rating of fixed capacitor banks, whereas studies with maximum kVAR determine switchable banks. Also, a preset on the maximum permissible reactive power of the system can be set in the software. Once setting the initial parameters, a running of the option *Update Recommended List* is carried out and the program will show a set of banks organized by the highest loss reduction the installation would provide.

After running the same analysis with the maximum demand to find possible placements for switchable banks, the software recommends a capacitor injecting 300 kVAR into the system to improve the PF to 0.98. A comparison between the base case (with no capacitors installed) and the final load flow with capacitors installed at the suggested location is shown in Table III. It is important to realize that with switchable banks the PF could reach 0.98 while the power losses will be reduced from 10.4275 kW to 9.7769 kW. While this sounds like a necessary improvement, must be evaluated the cost-effectiveness of the bank's installation, since the cost of installation may be too elevated compared to the benefits of capacitor banks in the system. Other options provided by the software are shown in Table IV. In this Table, the base case and the results with capacitors connected at the suggested locations are presented. As demonstrated, some circuits such as CHC-4015, CHC-4055, PCS-4040, and STI-4030 do not need capacitor banks installed due to their already acceptable PFs. While the other circuits either needed

fixed banks, switchable capacitors, or both to improve their PF. Installation of capacitors not only increases the PF of the circuits but also decreases the energy loss while bringing about several other benefits to the circuits. It should be pointed out that a ferroresonance study should be carried out before the cost-effectiveness evaluation of the capacitor banks installation, however, owing to the scope of this paper, no such study was carried out.

##### B. SYSTEM MANAGEMENT

Spot loads and seasonal loads create new problems for the distribution system operator, they should be adequately modeled to accurately evaluate the energy losses. Both cases are described in this Section. In the Patzcuaro area, a request for a new connection of a 3,000 kW load with a PF of 0.9 was made. To analyze the effect of this new load connected at the circuit CHC-4055, and to evaluate the technical feasibility to supply this load, it is necessary to realize a field inspection and to actualize the circuit model in Synergi® to evaluate whether the circuit is in optimal operating conditions to respond to the new service request and to determine whether new infrastructure is needed to provide adequate service to this new load. The power flow results of the base case (without the new load connected) show that the voltage drop in the circuit is 6.84% and the power losses are 104.42 kW. After considering the new load, the results show that the power losses increase considerably from 104.42 kW to 739.42 kW. This indicates that it is necessary to realize a system modification to maintain the circuit operating near its original values of voltage regulation and power losses.

TABLE III. RESULTS OF THE BASE CASE AND CASE WITH CAPACITORS INSTALLED AT NODE PUU-4030.

Node PUU-4030	Demand (kW)	Demand (kVAR)	PF	Power losses (kW)
Base case	1 415.07	544.701	0.93	10.427
Capacitor installed	1 415.07	248	0.98	9.776

TABLE IV. RESULTS OF THE BASE CASE AND CAPACITORS INSTALLED.

Circuit	PF	Power losses (kW)	Final PF	Final Power Losses (kW)	Fixed capacitor banks (kVAR)	Switchable capacitor banks (kVAR)
ADR4045	0.93	14.72	0.99	13.3	None	150
CHC4015	1	1.97	1	1.97	None	None
CHC4055	0.99	21.54	0.99	21.54	None	None
PCS4040	0.9	18.11	0.9	18.11	None	None
PCS4070	0.97	23.122	0.99	22.29	75	None
PUU4010	0.89	27.22	0.97	22.402	None	225
PUU4030	0.93	10.427	0.98	9.776	None	300
STI40110	0.9	2.279	0.97	2.03	75	75
STI4030	0.97	10.03	0.97	10.03	None	None

The proposals to achieve this are either to recalibrate the line feeding the new service or to construct a new line. After several studies, the best results are obtained by replacing the conductor from ASCR 3/0 to ASCR 336, reducing the series resistance and as a result the conductor losses. With this new recalibration, the voltage drop is 11.72% while the power losses are reduced to 349.07 kW. The length of the recalibration of the primary line is 12 km. The other option was the construction of a new line supplying the load directly from the feeder; results from simulations show a resulting voltage drop of 4.57% and power losses of 99.45 kW. This new circuit requires 11 km of ASCR 266 conductor. The total investment for the recalibration of the 12 km segment would be USD 262,000 approximately. While the total investment for the construction of the new circuit would be approximately the same amount. The similarity in prices is due to the cost difference between ASCR 336 and ASCR 266, and the infrastructure improvements to support heavier conductors.

A new factor derived from the Mexican electricity sector deregulation plays an important role at this point: since the distribution sector has the pressure to be competitive, the attention has been directed to the reduction of the technical and non-technical energy losses only, and new investments in system expansion and/or modification are restricted by the Mexican Government, especially when they show a low rate of return on investment as these two cases analyzed. For the aforementioned, the construction of a new line is suggested by the Federal Electricity Commission, since brings more overall benefits to the grid. However, the cost of the construction will be covered by the new customer to meet the criteria of return on investment imposed by the Mexican Government. As mentioned before, this was the best solution to maintain efficiency, reliability, and continuity in the service to other customers.

For the case regarding seasonal loads, a spot load connected in the circuit CHC-4065 with a rated demand of 150 kW is considered. This seasonal load does not consume electric energy constantly throughout the year because of consists of a set of pumps used for agriculture purposes mainly active during the dry season. However, for reasons of simplifying the typically performed studies, this load has been considered constantly connected to the system when yearly energy loss evaluations are performed. As obviously, the system load flows will vary considering the seasonality of the load. During May, June, and July this load operates with a demand of approximately 140 kW with a PF of 0.85, while in the other months, this load does not consume any power. As previously mentioned, while this is a key factor in load flow studies, this has not been modeled yet in Synergi®. For this reason, the model implemented in Synergi® is updated including the changes in demand of the spot load located at the mentioned location. The results demonstrate a lowering of power losses in this circuit, as expected.

Table V shows the demand of the spot load in the circuit for the year 2016 and the corresponding losses in this circuit. It can be noticed how the losses decrease due to the

consideration of the load's seasonality. This final example shows the importance of having an accurate system model and load information to have an accurate energy loss evaluation. This plays an important role in the future planning of the system or circuits affected.

### C. DISTRIBUTED GENERATION

Synergi® offers an easy way to model this new type of generation through a previously created model in the *Warehouse* module. This offers the ability to specify the generators' data and to have an exact power flow study to effectively analyze the effects that these generators would have on the system. In the circuit CHC-4065, there is a clear example of the importance of modeling distributed generation in the system. The circuit has a total of 750 kW of power generated by small hydroelectric plants connected at different nodes. The first case was to model one of these plants of 350 kW. Hence, it is possible to analyze how the modeling and consideration of these generators affect the overall loss evaluation. Due to the low energy consumption of the circuit, monthly power losses increased when this small generating plant was considered.

Table VI shows the simulation for a year assuming the same maximum demands used in previous studies. Based on the results obtained, it is expected that the energy losses will show an increase when the total of the distributed generation is considered. This highlights the importance of having a comprehensive framework for multi-year planning to determine upgrades and changes that must be made such as recommended in [17] and [18].

TABLE V. RESULTS CONSIDERING THE SEASONAL SPOT LOAD.

Year 2016	Demand (kW)	PF	Original losses (kW)	Final losses (kW)
Jan.	0	0	1.2	1
Feb.	0	0	1.1	1
Mar.	0	0	1.41	0.96
Apr.	0	0	1.73	1.51
May.	142	0.85	4.49	5.38
Jun.	143	0.85	1.15	1.45
Jul.	139	0.85	1.07	1.2
Aug.	0	0	1.22	0.72
Sep.	0	0	2.26	1.74
Oct.	0	0	1.78	1.21
Nov.	0	0	2.11	1.84
Dec.	0	0	1.68	1.38
Total			21.2	19.39



**TABLE VI.** LOAD FLOW RESULTS FOR THE BASE CASE AND THE CASE WITH DISTRIBUTED GENERATION.

Node	Max. demand (kW)	Max. demand (kVAR)	Losses (kW)	New losses (kW)
Jan.	255	-127	1.2	1.5601
Feb.	138	-235	1.1	1.2846
Mar.	264	-188	1.41	1.7548
Apr.	137	-383	1.73	2.0347
May.	189	-674	4.489	4.9118
Jun.	269	-116	1.152	1.6281
Jul.	261	-96	1.07	1.5513
Aug.	280	-6	1.22	1.6388
Sep.	382	-209	2.26	2.6674
Oct.	359	42	1.78	2.2486
Nov.	189	-407	2.11	2.4155
Dec.	182	-343	1.68	1.9789
	Total		20	26

## V. CONCLUSIONS

The importance of loss reduction in the distribution systems was discussed in this paper, particularly regarding the changes imposed by the new Mexican electrical industry Law. It has been discussed how the distribution system operator needs to propose and implement approaches to reduce energy losses and improve voltage regulation to maintain the quality, reliability, continuity, and security of the network. Three approaches were tested using the commercial software Synergi®: capacitor placement, system management, and proper modeling of distributed generation. The first method discussed was capacitor placement, which improves the PF and reduces losses. From the results obtained, it was shown how some circuits do not need capacitor banks while others need either fixed banks, switchable capacitors, or both. On the other hand, as a distribution system operator, it is important to take into consideration system management. Managing large loads strategically in a circuit by either limiting the demand or evaluating the expansion and/or modification of the grid allows an optimal operation of the system and the correct evaluation of power losses in the system.

Furthermore, it was shown how investments made into the system to supply energy to a large customer sometimes are not justified and the end user must pay for the improvements needed, otherwise, its energy demand must be limited. Including suitable models of distributed generation may help a proper evaluation of the energy losses; even is possible to suggest the correct circuit for its deployment which could be closer to larger loads. Finally, it was shown how when distributed generation is in circuits with lower consumption the power losses increase considerably. This must be considered to take full advantage of the energy produced by renewable resources. Of course, many other aspects of the system can be improved, but these three approaches are essential and provide more benefits to the

system. To create a new Mexican distribution system these factors must be considered to analyze the benefits and problems regarding the inclusion of the different components of the network, as well as their economic impact on the overall system operation.

## REFERENCES

- [1] J. C. Olivares, Y. Liu, J. M. Cañedo, R. Escarela-Pérez, J. Driesen, and P. Moreno, "Reducing losses in distribution transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 821-826, Jul. 2003.
- [2] J. C. Olivares, R. Escarela-Perez, S. V. Kulkarni, F. de León, E. Melgoza-Vasquez, and O. Hernández-Anaya, "Improved insert geometry for reducing tank-wall losses in pad-mounted transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1120-1126, Jul. 2004.
- [3] B. Gocen and S. Kul, "Investigation of the effect of lamination thickness on temperature and efficiency in transformer: research article", *ZeroBuild J.*, vol. 1, no. 01, pp. 23-29, Jan. 2023.
- [4] Al-Maskari, S., Vijayalakshmi, K. "Detection of non-technical losses in power utilities using machine learning," in *Proc. 4th EAI Intl Conf. on Big Data Innovation for Sustainable Cognitive Comp.*, Springer Intl. Publishing, Sept. 2022.
- [5] J. C. Olivares, E. Campero-Littlewood, J. L. Hernandez-Avila, R. Escarela-Perez, S. Magdaleno Adame, A. D. Theocharis, "Evaluation of stray losses in throats of distribution transformers using finite element simulation," in *Proc. 2012 Andean Region Intl. Conf.*, Cuenca-Ecuador, 7-9 Nov. 2012.
- [6] V. M. Jimenez-Mondragon, J. C. Olivares, E. Campero-Littlewood, J. L. Hernandez-Avila, R. Escarela-Perez, S. Magdaleno-Adame, "Induced current in anti-theft ducts of pole-mounted distribution transformers," in *Proc. 2012 Andean Region Intl. Conf.*, Cuenca-Ecuador, 7-9 Nov. 2012.
- [7] J. Romero, "Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction," in *Proc. IEEE-PES T&D*, Orlando, FL, USA. 2012, pp. 1-8.
- [8] W. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. New York, NY, USA: CRC Press, 2002.
- [9] S. Chandra, D. Hawkins, F. Clifton, A. Steele, and S. Reid, "Distribution network losses and reduction opportunities from a UK DNO'S perspective," in *Proc. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 15-18 June 2015; Lyon, France. pp. 1-5.
- [10] R. Sarfi, M. Salama, and A. Chikhani, "Practical aspects of performing a distribution system loss reduction study," in *Proc. IEEE Canadian Conference on Elec. & Comp. Eng.*, 5-8 September 1995, Montreal, Canada. pp. 164-167.
- [11] Synergi. (2023). Available: <https://www.dnvgi.com/services/power-distribution-system-and-electrical-simulation-software-synergi-electric-5005>.
- [12] World Bank Group Energy Sector Strategy. (WB 2009). Reducing technical and non-technical losses in the power sector. Available: <http://www.worldbank.org/>.
- [13] The World Bank, Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS>.
- [14] Official Federation Newspaper (DOF 2014), Electric industry Law. Mexico. Available: <http://www.dof.gob.mx>.
- [15] Federal Electricity Commission. Annual Report 2014, Available: <http://www.cfe.gob.mx>.
- [16] R. Arrit and R. Dugan, "Distribution system analysis and the future smart grid," *IEEE Trans. Industry Applicat.*, vol. 47, no. 6, pp. 2343-2350, Nov.-Dec. 2011.

- [17] A. Humayd and K. Bhattacharya, "Distribution system planning to accommodate distributed energy resources and PEVs," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 145, pp. 1-11, Apr. 2017.
- [18] A. Li and J. Zhong, "VVO effect improvements by optimal DER Planning in distribution systems with renewables," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 217, Apr. 2023.

## BIOGRAPHIES



**VÍCTOR J. GUTIÉRREZ MARTÍNEZ** Received the BEng (Hons.), the MSc, and the PhD degrees from the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, México, in 2000, 2004, and 2011, respectively. Currently, he is a full-time professor at the Electrical Engineering Department of the University of Guanajuato, Salamanca, Mexico. His areas of interest are the operation and control of electric power systems under the smart grid paradigm.

**EDUARDO A. ELIZARRARÁZ ALEGRÍA** Student at the Electrical Engineering Department of the University of Guanajuato. His areas of interest are the operation and control of electric distribution systems.



**ENRIQUE A. ZAMORA CÁRDENAS** Received the BEng (Hons.) degree from the Universidad de Colima, Colima, México, in 2001, and the MSc and PhD degrees from the Electrical Engineering Graduate Program of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, in 2004 and 2010, respectively. He is currently a full-time Professor at the Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.

His research interests lie in the dynamic and steady-state analysis of modern electric power systems.



**OSVALDO RODRÍGUEZ VILLALÓN** Received his BEng degree in electrical engineering from the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo in 1995 and obtained his PhD degree from the Universidad Michoacana in April 2001. Since 2000 he is a Lecturer at the Universidad de Guanajuato. His research interest areas are power systems modeling, electrical machines, and power quality.

**JOSÉ GERARDO LEÓN GONZÁLEZ** Received his BEng degree in electrical engineering from the Instituto Tecnológico de Morelia in 1995. Currently, he is a Professional of Studies at the Federal Electricity Commission in the Patzcuaro Area of the West Central Section. His research interest areas are power systems modeling and power quality

Recibido 05 de diciembre de 2022. Aceptado 28 de marzo de 2023. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Diseño e Implementación de un Sistema de Medición Electromecánico de Películas Delgadas para Aplicaciones Fotovoltaicas

JULET MARCELA MÉNDEZ HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, MARIELY ISABEL LOEZA POOT<sup>1</sup>, ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ<sup>1\*</sup>, JUAN FRANCISCO REVELES ARREDONDO<sup>1</sup>, ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, C.P. 36885, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/I. T Mérida. Av. Tecnológico Km 4.5 S/N, Mérida. C.P. 97118. México.

\*Autor de Correspondencia: noe.hernandez@ugto.mx

**RESUMEN** Este estudio describe el proceso de reconfiguración de una prueba de tensión uniaxial estándar para elementos flexibles de espesores inferiores a 1 mm, ASTM D882. Para ello un espécimen, compuesto por una película delgada conductora eléctrica que es depositada sobre un sustrato flexible, es reajustado dimensionalmente y tensionado con un dispositivo de sujeción diseñado para el caso. Implementando un sistema para la obtención de datos para el cálculo de deformaciones y resistividad eléctrica del espécimen. La información obtenida se utiliza para identificar el inicio de agrietamiento superficial en la película conductora, dicho criterio es conocido como “Crack Onset Strain”, COS. El material conductor eléctrico consiste en óxido de indio dopado con estaño, ITO, mientras que el sustrato es tereftalato de polietileno, PET. Los materiales fueron tensionados y medidos obteniendo que el valor máximo de COS es de  $0.4575 \pm 0.0676$  %. Con este resultado puede definirse la rigidez del ITO, y si esta favorece mecánicamente a la heteroestructura de dispositivos fotovoltaicos o electrónicos flexibles, considerando las condiciones de manipulación o ambientales a las cuales pueden someterse los dispositivos.

**PALABRAS CLAVE**— Integridad eléctrica, deformación, tensión uniaxial, prueba colineal de 4 puntos.

## I. INTRODUCCIÓN

La tercera generación de celdas solares fotovoltaicas se centra en el uso de películas delgadas orgánicas poliméricas y sustratos flexibles [1]–[3]. A su vez, la característica flexible se encuentra frecuentemente expuesta a recibir estímulos externos que alteren su microestructura provocando incluso el fallo del material si estos no son limitados. Tales perturbaciones son físicamente representadas por deformaciones mecánicas y pueden relacionarse directamente con su resistencia eléctrica [4]. Estudios han reportado la formación de patrones de grietas superficiales y deslaminaciones entre las películas delgadas que conforman al dispositivo, estos reportes mencionan que las grietas/fallos desencadenan interrupciones en la continuidad del transporte eléctrico del dispositivo, lo cual imposibilita su operación [5]–[7].

La relación mencionada se conoce como COS, y se obtiene mediante la conjunción de una prueba mecánica de tensión uniaxial y una prueba eléctrica colineal de 4 puntos. Matemáticamente se define utilizando la teoría de elasticidad y una correlación en la estabilidad eléctrica mediante las deformaciones unitarias experimentadas ( $\epsilon$ ) y la variación de su resistencia eléctrica instantánea entre su resistencia eléctrica inicial ( $R/R_0$ ), esto se presenta en la [Ec. \(1\)](#), donde, empleando una aproximación binomial se espera que la razón

de resistencias eléctricas se mantenga alrededor de la unidad a medida que la deformación incrementa. A su vez, la resistencia eléctrica es obtenida tomando como base la Ley de Ohm ( $V=IR$ ).

$$\frac{R}{R_0} = (1 - \epsilon)^2 \cong 1 \quad (1)$$

Para la prueba de tensión uniaxial se tomaron como referencia los estándares ASTM D882 e ISO 527 (tensión en películas delgadas poliméricas), ellos proponen un desplazamiento constante de 25 mm/min y dimensiones de especímenes de 25.4 x 25.4 mm<sup>2</sup>. Para la prueba de 4 puntas colineales la relación entre el tamaño del área de contacto (punta-película), la separación entre puntas y el dimensionamiento del espécimen son los criterios principales [8], [9]. Sin embargo, si se desea cumplir con las dimensiones proporcionadas por los estándares, una mayor cantidad de recursos, una alta modificación de parámetros de fabricación y nuevas caracterizaciones a las películas deben ser realizadas, ya que modificaciones a los procesos repercuten en su morfología final. Analizando lo anterior resulta contraproducente la elaboración de especímenes con dichas dimensiones, conociendo que el tamaño de un espécimen de laboratorio común es 25.4 x 25.4 mm<sup>2</sup>.

Partiendo de dichos obstáculos, este estudio describe la reconfiguración, ajuste, diseño e implementación de un sistema de introducción de desplazamientos y medición eléctrica de pequeño tamaño, que mantiene las relaciones de dimensión y adquisición de datos de los sistemas estándar, permitiendo el cálculo de las deformaciones y resistencia eléctrica, para la identificación del criterio COS en películas delgadas. Adicionalmente, su resultado posibilita el establecimiento de rangos óptimos de operación (para condiciones de trabajo) relacionados con dispositivos electrónicos o fotovoltaicos flexibles que posean al espécimen analizado en este estudio, el cual corresponde a una película delgada, semiconductor, semitransparente, de banda prohibida corta, ITO, que es altamente utilizada como electrodo (ánodo), depositada sobre un sustrato semitransparente flexible, PET.

## II. METODOLOGÍA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

### A. DIMENSIONES DE LOS ESPECÍMENES PARA UNA PRUEBA MECÁNICA ESTÁNDAR

Según la norma ASTM D882 [10], para tensión uniaxial de películas delgadas poliméricas, la geometría de un espécimen de película delgada polimérica no requiere de un concentrador de esfuerzos, es decir, es rectangular, hecho que minimiza la generación de esfuerzos y defectos en los bordes y sujeciones. Esta geometría cumple con la relación dimensional mínima 4:1 ( $Lm:H$ ) para área de medición y 1.5 ( $L/Lm$ ) para distancia de sujeción, donde  $Lm$  es la longitud de medición,  $H$  es el ancho total, y  $L$  la longitud total de la muestra, y su orientación es vertical. Partiendo de los datos conocidos se plantearon modificaciones a la orientación de los especímenes y su dimensión, manteniendo las condiciones de operación de la norma para especímenes considerablemente más pequeños. La orientación originalmente vertical se cambió a horizontal, permitiendo la cómoda introducción de las mediciones adicionales y se planteó como restricción de diseño la dimensión de un espécimen desarrollado en laboratorio, el cual posee un tamaño  $25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2$ , siendo entonces  $L = 25.4 \text{ mm}$ , lo cual se traduce en especímenes de  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ , conforme a las relaciones dimensionales de la norma, con área de medición efectiva de  $16.9 \times 6.35 \text{ mm}^2$ . Una visualización de lo propuesto se presenta en la Fig. 1.

### B. INTRODUCCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO (AVANCE)

Con base en investigaciones previas, la deformación elástica para diversas películas delgadas no supera el 3%, por lo tanto, esta cifra fue empleada para determinar el desplazamiento máximo a inducir en los especímenes. Considerando que, las dimensiones para los especímenes fueron establecidas en  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ , la introducción del desplazamiento debe proporcionarse de forma suave, progresiva y en una única dirección, se debe mantener un extremo fijo y uno móvil, y sus dimensiones globales deben permitir el posicionamiento del sistema sobre el porta objetivos de un microscopio para realizar seguimiento micrográfico, una herramienta de medición de uso común

(micrómetro) es seleccionada para proporcionar el avance, el cual se define según  $\epsilon_{max}/\text{Resolución mínima}$ , donde la deformación máxima está dada por  $\epsilon_{max} = 3L/100$ , y la Resolución mínima del micrómetro es de  $25.4 \mu\text{m}$ . Lo anterior equivale a, una deformación máxima de  $0.508 \text{ mm}$ , con 20 pasos de desplazamiento o avances de  $25.4 \mu\text{m}$  aplicados cada segundo.

### C. DISEÑO Y MANUFACTURA DE SUJECIONES

El micrómetro Mitutoyo Digimatic 293-831, con carrera de  $25.4 \text{ mm}$  y exactitud de  $25.4 \mu\text{m}$  en medición análoga fue empleado como fuente motriz y algunas de sus dimensiones como diámetro y longitud del husillo, diámetro y longitud del yunque, ancho y alto del marco en la posición del yunque, y ancho y alto del marco en la posición del husillo fueron tomadas como base para el diseño de las sujeciones, ver Fig. 2(a). Definiendo dimensiones y parámetros de entrada se diseñó el sistema de sujeción que mantiene un extremo fijo y uno móvil. Las sujeciones son posicionadas paralelas entre ellas empleando un sistema de riel y base. El extremo fijo posee dos contactos con el micrómetro los cuales aseguran su posición, mientras que, el extremo móvil se posiciona dentro del husillo del micrómetro permitiendo su rotación y asegurando su posición mediante un tope. El agarre de las áreas de contacto se logró mediante un sistema de mordazas dentadas, de fijación manual mediante tornillo y tuerca sin comprometer la integridad de las películas, esta permitió el ingreso y extracción de los especímenes de forma fácil y segura. El espacio abierto para adquisición de datos en cada paso de deformación se estableció manteniendo las zonas voluminosas que debían poseer las sujeciones hacia los extremos. El ensamblaje del diseño asistido por computadora, "Computer-aided design", CAD, para las sujeciones se presenta en la Fig. 2(b).

La manufactura de las sujeciones fue realizada con la impresora 3D Elegoo Mars y resina foto-polimérica de tipo ABS. La impresora conforma el diseño capa a capa desde una placa base ascendente mediante la polimerización por luz ultravioleta (longitud de onda de  $405 \text{ nm}$ ) de la resina con un avance en la dirección  $z$  de  $0.00125 \text{ mm}$ , finalizada la impresión la pieza virgen es curada durante 20 minutos con luz ultravioleta ( $405 \text{ nm}$ ) rigidizando el modelo, posteriormente, los residuos de resina son eliminados mediante un baño en alcohol isopropílico durante 30 minutos, la pieza es extraída de alcohol y dejada secar bajo luz ultravioleta, este procedimiento garantiza un acabado superficial fino.

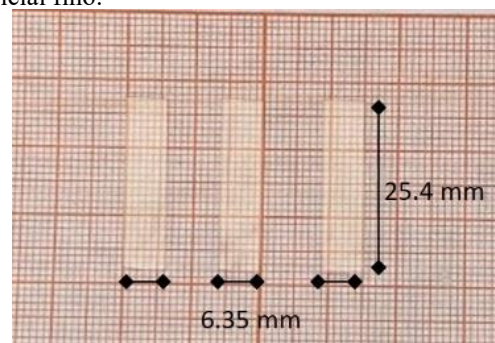


Fig. 1. Dimensiones de los especímenes.

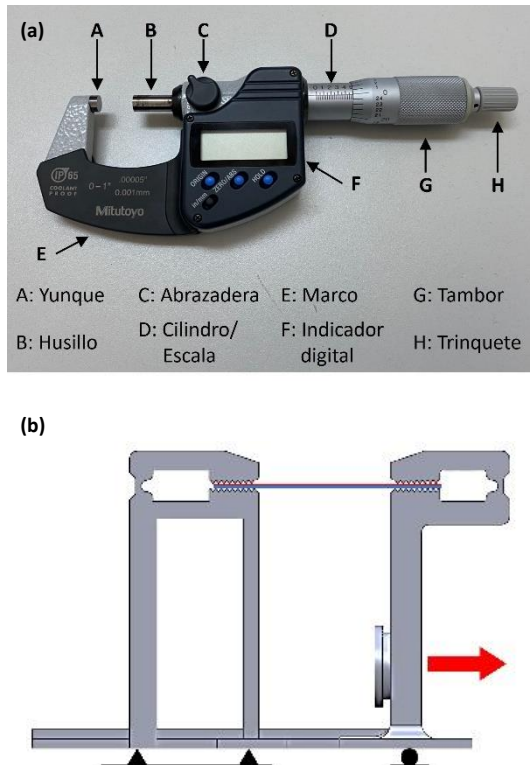


Fig. 2. Diseño de las sujeciones. (a) Partes del micrómetro, (b) CAD de las sujeciones.

#### D. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA COLINEAL DE 4 PUNTOS

Este procedimiento para medición de resistividad eléctrica en especímenes con área superficial cuadrada o redonda, consiste en la introducción de una corriente constante por un par de contactos eléctricos externos, y la medición de voltaje por un par de contactos eléctricos internos, ver Fig. 3(a). Como requisito, la separación entre contactos eléctricos ( $s$ ) debe ser uniforme y constante, además, si la superficie no posee las formas convencionales, como es el caso de la geometría de los especímenes de la Fig. 3(b), el valor obtenido debe multiplicarse por un factor de corrección geométrica proveniente de las relaciones dimensionales de área de medición  $a/b$ , donde  $a$  representa al largo y  $b$  al ancho, y la separación entre contactos eléctricos y el ancho de la película ( $b/s$ ) [11]–[13].

Para el caso de estudio, la separación entre puntas es de 2.5 mm, y su factor de forma (especímenes angostos) es de 0.9434. Adicionalmente, como una prueba de tensión conlleva el desplazamiento de los especímenes, 2 lotes de prueba fueron desarrollados, identificándose cada uno de ellos con las siglas L1 y L2. En el primero de ellos (lote 1, L1) la superficie de los especímenes mantiene su configuración básica, mientras que, en el segundo (lote 2, L2) un punto de tinta conductiva de plata con diámetro de 0.8 mm fue aplicado en cada zona de contacto con las puntas, contactos eléctricos, lo anterior se visualiza mediante los puntos centrales en la Fig. 3(b).

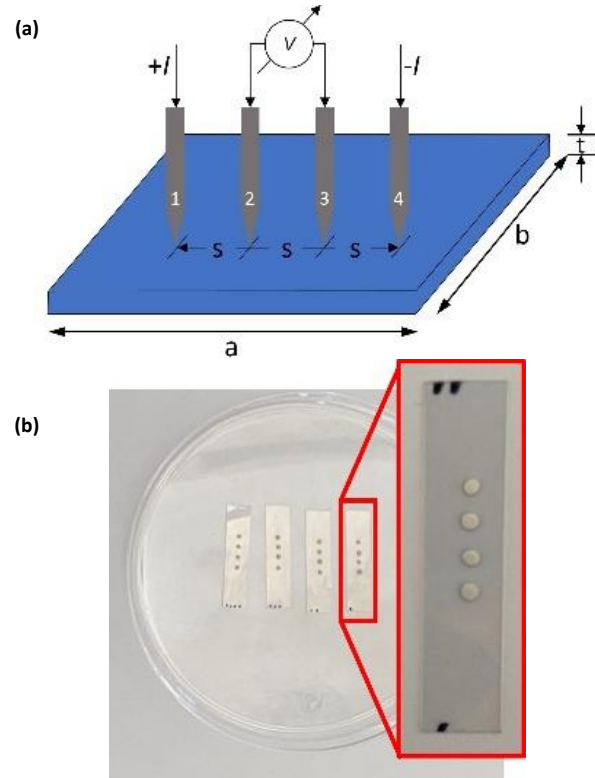


Fig. 3. Prueba colineal de 4 puntas. (a) Esquema; (b) Puntos de contacto sobre los especímenes del lote 2.

#### E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Cada uno de los lotes definidos (L1 y L2), constó de 4 especímenes (dimensión de  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ ) cortados de una misma muestra (dimensión de  $25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2$ ), e identificados como  $LxEy$ , el valor de  $x$  cambia para cada lote según 1 o 2, mientras el valor de  $y$  cambia para cada espécimen de 1 a 4. Todos los especímenes de cada lote fueron empleados para realizar la validación del sistema de tensión uniaxial horizontal. Previo a su prueba cada muestra fue lavada mediante baño ultrasónico durante 480 s con una secuencia de agentes como agua con jabón neutro, alcohol metílico y alcohol etílico, con un retiro de exceso mediante agua destilada entre un agente y otro, luego de los lavados cada muestra fue secada con aire y almacenada. Las dimensiones finales de las muestras corresponden a  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$  con una tolerancia dimensional de  $\pm 1\%$ . Para realizar las pruebas cada muestra fue posicionada y fijada con las sujeciones diseñadas.

Una descripción detallada de la Fig. 4 corresponde a, Fig. 4(a) para el conjunto de elementos para el sistema de medición eléctrica, Fig. 4(b) para el montaje de las sujeciones en el micrómetro, Fig. 4(c) para el sistema de adquisición de 4 puntas, y Fig. 4(d) para el montaje del sistema de sujeción/medición en el microscopio. El estado superficial de las muestras fue medido empleando el microscopio óptico, incorporado en el Durómetro SINOWON, con ampliación de 100x y 400x. Mientras que, empleando la fuente Keithley 2450 y el aditamento de 4 puntas, la resistencia de las películas fue adquirida en tiempo real, aplicando una corriente constante de 1 nA. El procedimiento descrito fue repetido para cada muestra y los resultados obtenidos fueron

analizados para reconocer el comportamiento de las películas ante la presencia de perturbaciones externas como la deformación introducida y su punto de fallo, es decir, donde deja de cumplirse la relación de la Ec. (1).

Posteriormente, fue desarrollada la prueba de tensión, aplicando los 20 pasos de deformación de 25.4  $\mu\text{m}$  cada uno, cumpliéndose con la deformación del 3%. Posteriormente al posicionamiento de cada espécimen y 10 s antes de iniciar la introducción del desplazamiento es iniciada cada medición eléctrica, de estos valores se extrajo la resistividad inicial, pasado este tiempo se introducen los desplazamientos y se capturan 15 mediciones eléctricas por segundo. Al aplicarse el último paso de desplazamiento se captura el estado superficial de cada espécimen y de igual forma al retirarse el desplazamiento.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El trabajo presentado describió la reconfiguración de una prueba de tensión uniaxial estándar y su combinación con mediciones eléctricas para la definición de un criterio de fallo superficial para películas delgadas. El proceso reconfigurado disminuyó las dimensiones de los especímenes empleados y continuó hasta el diseño de un sistema de sujeción, introducción de desplazamiento y adquisición eléctrica también reducido. Dado que al dispositivo motriz empleado para la introducción del avance no se le agregó un control de giro digital el mínimo avance incorporado correspondió a 0.0254 mm/s, esto debido a la exactitud analógica, por lo tanto, el avance puede ser reducido hasta la exactitud digital (1  $\mu\text{m}$ ) si al tambor se le acondiciona un control.

Los datos de deformación uniaxial, resistividad eléctrica en el plano y las capturas del estado superficial para los 2 lotes de prueba fueron agrupados, graficados y analizados para identificar el punto de inflexión o criterio COS de cada espécimen y así definir su valor para la geometría desarrollada. En la Fig. 5(a) se presentan resultados para los 4 especímenes del lote 1 (L1E1, L1E2, L1E3 y L1E4), lote sin alteración superficial, mientras que en la Fig. 5(b) se presenta la curva de deformación ( $\epsilon$ ) contra variación de la resistividad eléctrica ( $R/R_0$ ), que aplica la interpretación gráfica para determinación del COS en el espécimen 3, L1E3.

Como se observa en la Fig. 5(b) esta inicia con una sección incremental en la cual la variación de la resistencia crece a partir de la unidad, para analizar su crecimiento una regresión lineal es aplicada, posteriormente se aprecia una sección cuyos valores rondan alrededor de 1.78  $\Omega/\Omega$ , prolongándose hasta que la deformación unitaria alcanza un valor aproximado de 0.0127 mm/mm, a partir de allí se aprecia el crecimiento súbito de la variación de la resistencia, es en ese instante donde el contacto eléctrico con la película se ha perdido y los contactos eléctricos registran un incremento en el voltaje. Lo anterior puede apreciarse en la Fig. 6, donde se presenta el efecto de levantamiento y remoción de material ocasionada por el arrastre de las puntas sobre la película, como se observa la marca creada por el arrastre, se encuentra entre el paso de desplazamiento 5 y 6.



Fig. 4. Elementos de la prueba de tensión uniaxial horizontal. (a) Montaje experimental; (b) Sujeciones y sistema motriz; (c) 4 Puntas colineales; (d) Montaje en microscopio.

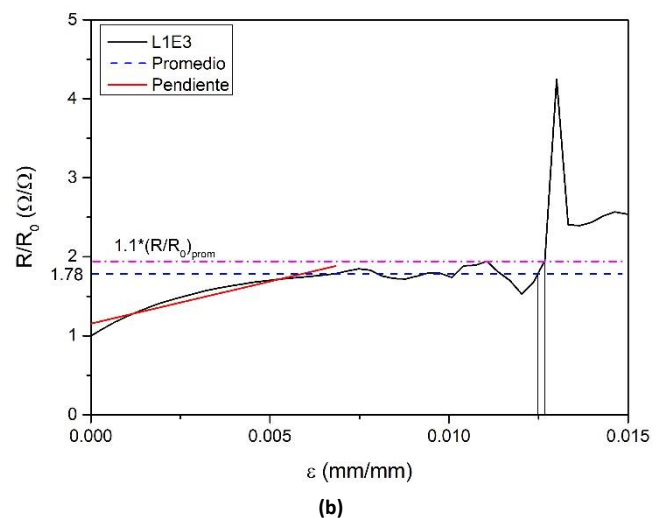
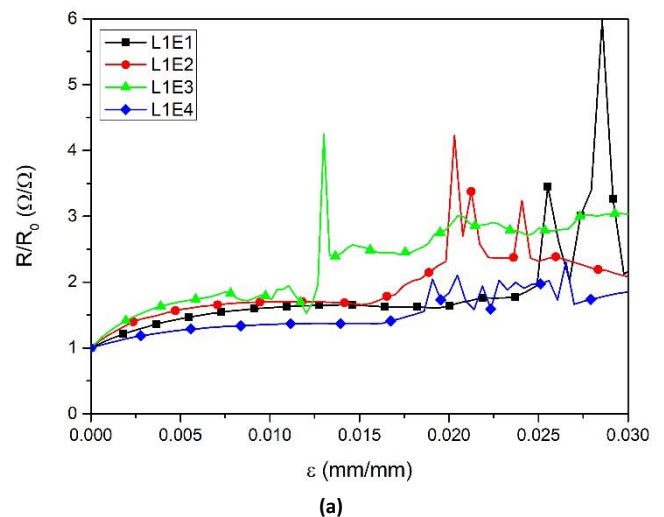


Fig. 5. Curvas de resistencia contra deformación. (a) 4 Especímenes del lote 1; (b) Especimen 3, L1E3.

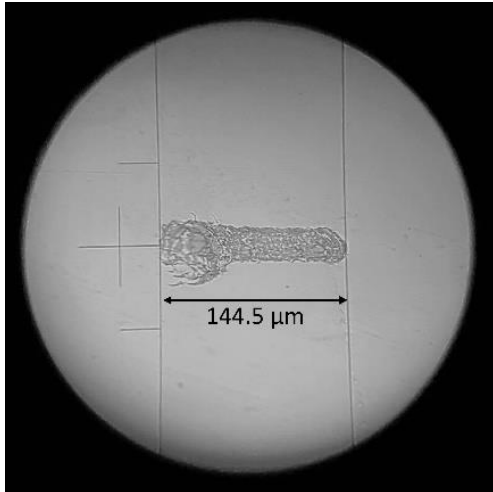


Fig. 6. Remoción de la película delgada por parte del contacto con las puntas ampliación 400X.

Por otra parte, en la Fig. 7 se presentan resultados para los 4 especímenes del lote 2 (L2E1, L2E2, L2E3 y L2E4), lote con puntos de tinta de plata en la superficie, mientras que en la Fig. 8 se presenta la curva de deformación ( $\epsilon$ ) contra variación de la resistencia eléctrica ( $R/R_0$ ) correspondiente al espécimen 2, L2E2.

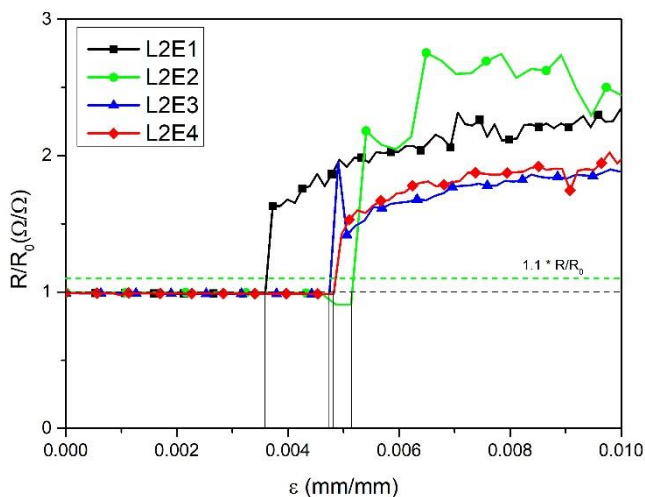


Fig. 7. Curvas de resistencia contra deformación para los 4 especímenes del Lote 2.

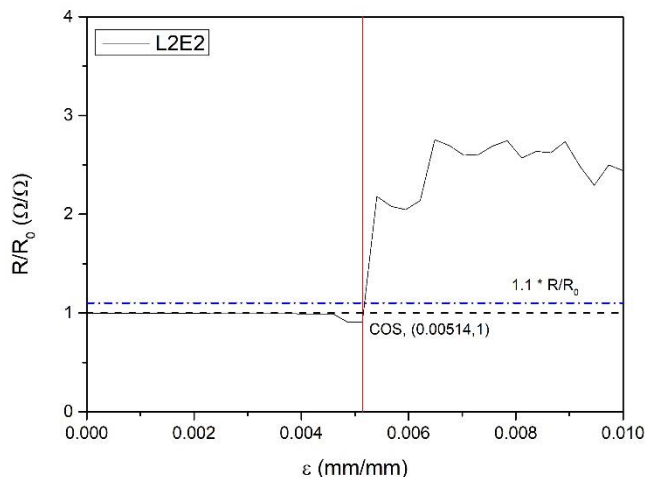


Fig. 8. Determinación del COS para el espécimen 2, L2E2.

En la Fig. 8 la curva deformación contra la variación de la resistividad eléctrica, correspondiente al espécimen 3, presenta un comportamiento diferente al presentado en la Fig. 5, donde el valor eléctrico se mantiene en la unidad hasta que abruptamente se aleja de su estabilidad. Con ese comportamiento es posible el cálculo del criterio COS para los especímenes del lote. Adicionalmente, un criterio de aceptación establecido en +10% del valor eléctrico es propuesto para compensar retardos o errores en la adquisición. A partir de la superación de este criterio se considera que ha iniciado el fallo en el dispositivo (formación y propagación de grietas), esto es visible cuando para la corriente constante aplicada el valor de voltaje adquirido incrementa drásticamente, incrementando a su vez la resistencia eléctrica (Ley de Ohm).

La curva de la Fig. 8 cumple con el planteamiento de la aproximación binomial con valores que rondan la unidad  $1 \Omega/\Omega$ , prolongándose hasta que la deformación unitaria alcanza un valor aproximado de  $0.0051 \text{ mm/mm}$ , a partir de allí se aprecia el crecimiento súbito de la variación de la resistencia, es en ese instante donde la continuidad eléctrica de la película se ha perdido y por tanto los contactos eléctricos registran el aumento súbito. Como puede apreciarse en las curvas de la Fig. 7, el comportamiento del L2E1 difiere respecto a los demás especímenes (el cambio abrupto surge a valores menores de deformación), pero, a pesar de esta diferencia, es posible la identificación del COS. Se presenta como resultado general para el lote 2, L2 un criterio COS de  $0.0046 \pm 0.0007 \text{ mm/mm}$  representado también como  $0.4575 \pm 0.0676 \%$ .

En la Fig. 9(a) se presenta una captura del estado superficial de la película delgada manteniendo el último paso de desplazamiento, las líneas verticales apreciables corresponden a las grietas ocasionadas por la superación de la deformación límite (criterio COS), apreciándose claramente como las grietas se han formado, crecido y propagado por la superficie de la película delgada. Si a partir de la formación de grietas presentadas el extremo móvil se sigue desplazando, el incremento de la deformación ensanchará las grietas y se propagarán por la superficie de la película en forma longitudinal formando el patrón de grietas conocido como patrón cuadrícula (signo de fallo total en la continuidad de la película), ver Fig. 9(b). El espécimen presentado en la Fig. 9(a) corresponde al L2E3.

Contrastando los resultados eléctricos para ambos lotes de prueba (L1 y L2), es evidente la diferencia entre la linealidad inicial de la relación corriente deformación. La adición de los puntos de plata mejora significativamente la adquisición de datos. Para todos los especímenes del lote 1 no se observa la linealidad de la aproximación binomial (alrededor de 1), por tanto, esta configuración no representa un óptimo contacto para la adquisición del COS. Caso contrario es el del lote 2, donde las gráficas confirman que la linealidad se mantiene a medida que incrementa el desplazamiento, lo cual conduce a un adecuado cálculo del criterio COS. La remoción de material ocasiona mediciones erróneas, a medida que se introduce el avance de la prueba de tensión, pues el cambio en la diferencia de potencial

adquirida se relaciona mayoritariamente con la pérdida de contacto entre las puntas y la película semiconductor, pues en su lugar, hace contacto con el sustrato. Es decir, la remoción interfiere en la continuidad del material y evita la obtención de datos para el seguimiento electromecánico de la creación de grietas.

Si los resultados del COS obtenidos para los especímenes del lote 2 de PET recubierto con ITO (espesor de 130 nm) son contrastados con investigaciones similares, puede observarse que, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado. Una comparación parcial puede realizarse con los resultados de Hengst *et al.* [14] donde, para espesores de ITO sobre PET que varían entre 200 nm y 2000 nm, el COS se encuentra entre 0.3% y 0.7%. La comparación parcial se debe a la diferencia de espesores de ITO para cada estudio. Sin embargo, también se menciona que se atribuye mayor densidad de grietas en la superficie a los espesores de ITO más gruesos, es decir el COS decrece con el aumento del espesor, aunque debe tomarse en consideración la desviación para cada caso [15].

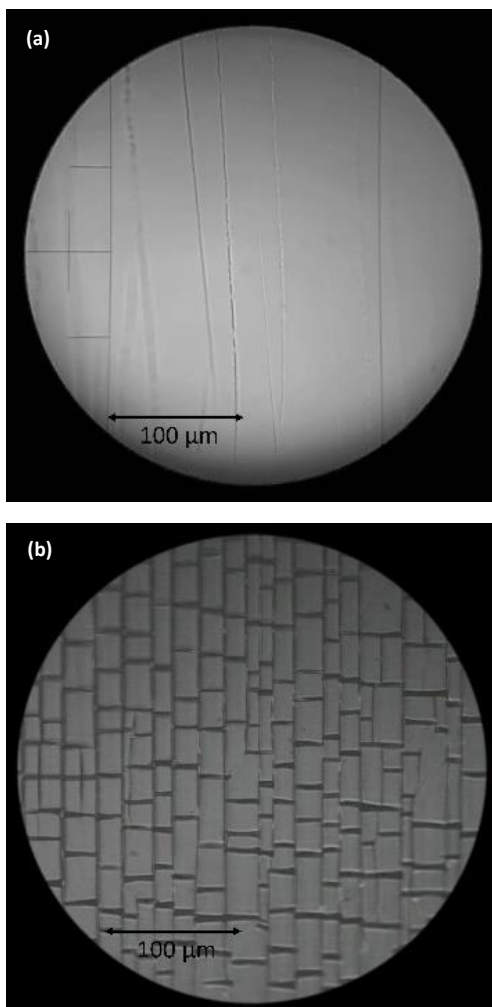


Fig. 9. Visualización del COS. (a) Inicio de la propagación de grietas en el espécimen tensionado 400x; (b) Patrón cuadrícula del espécimen 400x.

#### IV. CONCLUSIONES

La implementación del dispositivo de sujeción enfatizó el uso de procesos modernos de manufactura, pues las pequeñas dimensiones requeridas y el trabajo en paralelo con la medición eléctrica lo solicitaban. Tras la realización de pruebas se confirmó la validez del dispositivo de avance pues este cumplió con su propósito de diseño, el cual consiste en tensionar uniformemente un espécimen mientras una diferencia de potencial es adquirida por el sistema eléctrico.

Analizando los resultados se ratifica que, los puntos de tinta de plata garantizan la integridad de la superficie, impidiendo la penetración de las puntas de contacto eléctrico en la película delgada semiconductor y por consiguiente se evita su remoción, lo cual conduce a una adecuada adquisición de datos y un adecuado cálculo del criterio COS. Dato que, en comparación con investigaciones similares, se asemeja a lo esperado, garantizando que los resultados obtenidos bajo el procedimiento diseñado e implementado son reproducibles

Finalmente, a medida que se describe el proceso se expresa que, el correcto cálculo del COS depende de una adecuada adquisición de datos y resolución de la fuente. Siendo la adquisición quien tiene la mayor cantidad de variables a controlar, pues la reducción de efectos de derivación resistiva en el cableado, alineación, posicionamiento de las puntas, y contacto uniforme con la superficie evitan significativamente errores en las líneas de alimentación de corriente eléctrica y en la medición de voltaje, tareas asignadas respectivamente a las puntas externas (1 y 4) e internas (2 y 3) del modelo de 4 puntas empleado.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Yan and B. R. Saunders, "Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 82, pp. 43286–43314, Sep. 2014, doi: 10.1039/C4RA07064J.
- [2] S. Khalid, M. Sultan, E. Ahmed, and W. Ahmed, "Third-generation solar cells," *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy*, pp. 3–35, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821346-9.00019-5.
- [3] N. L. Muttumthala and A. Yadav, "Role of Semiconductors in Various Renewable Energy Systems," pp. 139–146, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-9280-2\_17.
- [4] M. J. Cordill, O. Glushko, and B. Putz, "Electro-Mechanical Testing of Conductive Materials Used in Flexible Electronics," *Front Mater.*, vol. 3, p. 22, Feb. 2016, doi: 10.3389/fmats.2016.00011.
- [5] Y. Shen, Z. Feng, and H. Zhang, "Study of indium tin oxide films deposited on colorless polyimide film by magnetron sputtering," *Mater Des.*, vol. 193, p. 108809, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.MATDES.2020.108809.
- [6] X. Chen and S. Liu, "Mechanical testing and analysis of polymer based flexible solar cell and full cell packaging," in *ICEPT-HDP 2011 Proceedings - 2011 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, Aug. 2011, pp. 1138–1142. doi: 10.1109/ICEPT.2011.6067028.
- [7] Q. Yan, L. Yan, X. Pang, L. Qiao, Y. Su, and K. Gao, "Crack initiation stress measurement of hydrogen-induced cracking with small tapered specimen method," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 814, p. 141228, May 2021, doi: 10.1016/J.MSEA.2021.141228.
- [8] T. Chommaux *et al.*, "In situ electrical and mechanical study of Indium Tin Oxide films deposited on polyimide substrate by Xe ion beam sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 741, p. 139035, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.TSF.2021.139035.



- [9] M. Farooq, A. Ansarifar, and X. Bao, "A study into crack initiation and growth in peroxide-cured silica-filled polybutadiene rubber vulcanisate under a cyclic loading condition," *Journal of Rubber Research*, vol. 24, no. 1, pp. 69–75, Mar. 2021, doi: 10.1007/S42464-020-00074-4.
- [10] ASTM International, "ASTM D882-18, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting," *Annual Book of ASTM Standards, 08.01, Plastics (1), C177-D1600*. West Conshohocken, PA, pp. 1–12, 2018. doi: 10.1520/D0882-18.
- [11] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," *Bell System Technical Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, 1958, doi: 10.1002/J.1538-7305.1958.TB03883.X.
- [12] P. Kreiml *et al.*, "Electro-mechanical behavior of Al/Mo bilayers studied with in situ straining methods," *Thin Solid Films*, vol. 665, pp. 131–136, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.tsf.2018.07.054.
- [13] M. Naftaly *et al.*, "Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques," *Electronics 2021, Vol. 10, Page 960*, vol. 10, no. 8, p. 960, Apr. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10080960.
- [14] C. Hengst *et al.*, "Mechanical properties of ZTO, ITO, and a-Si: H multilayer films for flexible thin film solar cells," *Materials*, vol. 10, no. 245, pp. 1–11, 2017, doi: 10.3390/ma10030245.
- [15] C. Peng, Z. Jia, D. Bianculli, T. Li, and J. Lou, "In situ electro-mechanical experiments and mechanics modeling of tensile cracking in indium tin oxide thin films on polyimide substrates," *J Appl Phys*, vol. 109, no. 10, p. 103530, May 2011, doi: 10.1063/1.3592341.

## BIOGRAFÍAS



**JULET MARCELA MÉNDEZ HERNÁNDEZ** Es Maestra en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato, México (2018), e Ingeniería Mecánica por Universidad Industrial de Santander, Colombia (2014). Actualmente es estudiante de último año del programa Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. Sus líneas de investigación/trabajo involucran la caracterización mecánica y eléctrica de películas delgadas semiconductoras relacionadas con celdas solares fotovoltaicas orgánicas flexibles, mediante métodos convencionales y no convencionales de la mecánica.



**MARIELY ISABEL LOEZA POOT** Es egresada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, donde obtuvo el grado de Doctora en Ciencias en la Especialidad de Física Aplicada en 2020. A lo largo de su formación se ha dedicado a la síntesis, impurificación y desarrollo de materiales semiconductores en forma de película delgada y su aplicación en la fabricación de prototipos de celdas solares fotovoltaicas. Actualmente realiza una estancia posdoctoral CONACYT en la DICIS de la Universidad de Guanajuato con un enfoque en la fabricación de celdas solares poliméricas.



**ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ** Es profesor Titular A adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. En el 2012 obtuvo el grado de Doctor en Tecnología Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional, y de 2013 a 2015 realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN. Actualmente realiza investigación en el área de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, con un enfoque hacia el desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en celdas solares fotovoltaicas y la modificación superficial de materiales metálicos. Ha impartido clases a nivel licenciatura y posgrado, y dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado.



**JUAN FRANCISCO REVELES ARREDONDO** Es Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato, México (2014). Actualmente es profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. Sus áreas de investigación son el Diseño y la Manufactura, enfocándose principalmente en procesos de manufactura tales como: Conformado de láminas, conformado de plásticos, fundición, manufactura aditiva y bruñido. En el área de diseño analiza el comportamiento estructural y térmico de geometrías reticulares tales como las denominadas TPMS.



**ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ** Es profesor-investigador del departamento de Ciencias de la Tierra del Tecnológico Nacional de México/I.T. Mérida. Obtuvo su grado de doctor en ciencias en el Centro de Investigación Científica de Yucatán en el año 2012. Ha sido Investigador Nacional Nivel 1 desde el año 2013 a la fecha, y ha publicado 15 artículos científicos en las áreas de mecánica de fractura, mecánica de materiales compuestos, celdas solares, nanomateriales e impresión tridimensional. Actualmente trabaja en el modelado y caracterización mecánica de celdas solares y materiales compuestos textiles.

Recibido 13 de septiembre de 2022. Aceptado 13 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Implementación del Sistema de Control de Tiristores en Tiempo Real Basado en SOGI-PLL

**GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA<sup>1\*</sup>, GUILLERMO TAPIA TINOCO<sup>2</sup>, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA<sup>1</sup>, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ<sup>1</sup>, LUIS RAMON MERCHÁN VILLALBA<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Doctorado en Ingeniería Eléctrica.

\*Autor de Correspondencia: ga.conejoacosta@ugto.mx

**RESUMEN** En este trabajo se presenta la implementación del sistema control de tiristores basado en el algoritmo de detección de fase del voltaje PLL-SOGI. Dicho sistema de control es desarrollado mediante un sistema basado en un microcontrolador C2000 de Texas Instruments el cual es programado desde Simulink. Además, se presenta un esquema de control en tiempo real para modificar el ángulo de disparo de los tiristores, desde una computadora a través de la comunicación serial con el microcontrolador.

**PALABRAS CLAVE** — Control en Tiempo Real, PLL, Tiristores.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia actuales opera una gran cantidad de sistemas basados en electrónica de potencia que tienen la capacidad de desarrollar diversas labores, entre ellas, la compensación de potencia en el sistema eléctrico [1], la conversión de energía para su uso final, la integración de fuentes renovables de energía, entre otros [2]. Dentro de estos sistemas se pueden encontrar soluciones basadas en transistores de potencia, diodos de potencia, tiristores, entre otros, donde parámetros como el nivel de potencia, voltaje y frecuencia de operación establecen que tecnología de semiconductores utilizar.

Al operar los sistemas electrónicos de potencia con la red eléctrica, es necesario que estos se encuentren siempre en sintonía con las características operativas de la red tales como magnitud de voltaje, frecuencia y fase, por lo cual, es necesario la implementación de sistemas que brinden esta capacidad de sincronización. Para este fin, se puede hacer uso de diversas técnicas, siendo la más común el uso del cruce por cero del voltaje como elemento de sincronización, lo cual puede resultar en un proceso con baja precisión y errores considerables [3], [4]. De este modo, la forma más apropiada para sincronizarse con la red eléctrica es a través de los sistemas de Phase-Locked Loop (PLL), quienes a partir de una señal oscilatoria obtienen su respectiva fase [5]. En particular, el PLL basado en integrador generalizado de segundo orden (SOGI-PLL) es comúnmente utilizado en aplicaciones monofásicas debido a su composición y adaptabilidad a la frecuencia [6].

Por esta razón en este trabajo se presenta la implementación de un sistema de control para el control de

disparo de tiristores, donde se hace uso de un algoritmo de sincronización con la red eléctrica basado en el SOGI-PLL. Este sistema de control se implementa en la tarjeta de desarrollo LAUNCHXL-728379D [7], basada en el micro controlador TMS320F28379D de Texas Instruments. Los algoritmos de control se implementarán en Simulink, y serán programados en la tarjeta mediante el paquete de software “Embedded Coder Support Package for TI C2000 - Hardware Support - MATLAB & Simulink” [8], que permite compilar los algoritmos de Simulink y programarlos en la tarjeta directamente. El sistema de control actúa sobre un conjunto de tiristores contenidos en un módulo de la marca Labvolt, el cual se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Electrónica de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Finalmente, una vez programada la tarjeta de control, se manipula en tiempo real el ángulo de control de disparo de los tiristores desde una computadora, la cual se comunica mediante el protocolo serial con el sistema de control para entregarle el ángulo que este debe considerar.

De esta forma, debido a la relevancia del sistema de control con una tarjeta de bajo costo se debe contemplar las amplias aplicaciones que se encuentran dentro del área donde se desarrolla la Ingeniería Eléctrica, tales como:

- Sistemas de Compensación de Voltaje o Potencia Reactiva.
- Control de los Componentes de Electrónica a nivel potencia.
- Conversión de energía

Entre otras aplicaciones. En este trabajo, se presenta la implementación del sistema de control de bajo costo que será utilizado para controlar componentes de potencia.

## II. SOGI-PLL

El SOGI-PLL consiste en un bloque SOGI que genera dos señales en cuadratura a partir de la señal de entrada de voltaje [6]. Para implementar la función de sincronización, éstas señales en cuadratura se envían a un PLL basado en marcos de referencia, asegurando la precisión automática en situaciones de desviación de frecuencia, debido a que puede ser afectado por corrientes armónicas de segundo orden. Con el objetivo de asegurar la estabilidad y la implementación simple, diversos PLL han sido propuestos en la literatura; sin embargo, han presentado diversos inconvenientes, dando lugar a oportunidades de mejora [8]-[10]. A lo largo del presente trabajo se muestra la implementación de un nuevo SOGI cuyo objetivo es garantizar la estabilidad y la correcta respuesta ante posibles desviaciones de frecuencia.

### A. MODELADO DE SOGI-PLL

El modelo del SOGI-PLL se muestra en la Fig. 1, donde  $Vg$  representa al voltaje de la señal eléctrica,  $\omega_0$  es la frecuencia nominal ( $2\pi 60 \text{ rad/s}$ ),  $\hat{\omega}$  y  $\theta$  corresponden a la frecuencia estimada y ángulo de fase, respectivamente [10]. De acuerdo con la Fig. 1, la transformada de Park está definida como:

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

De acuerdo con la Fórmula Mason, las funciones de transferencia de las señales de alimentación  $V\alpha$  y  $V\beta$  se pueden definir como Ec. (2) y Ec. (3) [9].

$$G\alpha(s) = \frac{V\alpha(s)}{Vg(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (2)$$

$$G\beta(s) = \frac{V\beta(s)}{Vg(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

En las Ecs. (2) y (3), se observa que la variable  $k$  es el factor de ganancia del SOGI,  $Vg = Vpsen(\omega t) = Vpsen(\theta)$  corresponde al voltaje de alimentación,  $\omega$  and  $\theta$  son la frecuencia y ángulo de fase, respectivamente [6], [11]. De esta manera, el modelo implementado se deriva bajo condiciones específicas: la frecuencia estimada es similar a la frecuencia real, por otro lado, el ángulo de fase estimado es similar al ángulo de fase real. Con el objetivo de considerar posibles señales de voltajes armónicos, la entrada  $Vq$  se puede implementar tal como se observa en la Fig. 2.

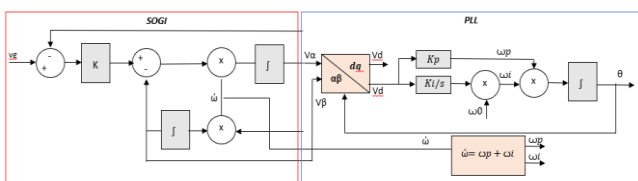


Fig. 1. Diagrama de bloque SOGI-PLL [10].

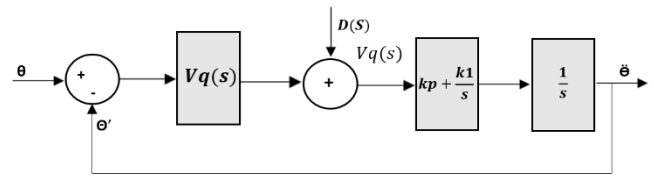


Fig. 2. Modelo de pequeña señal de SOGI-PLL [9].

Un conflicto estimado del SOGI-PLL incluye la sensibilidad a los componentes armónicos de bajo orden y la compensación de DC. Estas condiciones han sido arduamente analizadas, y derivado de esto se han implementado diversas estrategias que se encuentran disponibles en la literatura; sin embargo, a medida que aumenta la integración de redes eléctricas inteligentes, las cargas no lineales basadas en componentes electrónicos de potencia, las fuentes de energía renovables, entre otras, pueden afectar al desempeño de este elemento [9], [12].

### B. MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL EN SIMULINK

La implementación del sistema de control se desarrolla mediante las herramientas de Simulink de acuerdo con lo ya mencionado, y se implementa utilizando el módulo de tiristores disponible en el Laboratorio de Electrónica de Potencia. El sistema de control en tiempo real se realiza a través de la comunicación serial entre una computadora y la tarjeta de Texas Instruments C2000.

En la Fig. 3 se presentan los algoritmos programados en la tarjeta. En ésta, se recibe el dato del ángulo de control que proviene de la computadora, además de realizar la medición del voltaje de entrada mediante una tarjeta de adquisición de datos. A partir de la señal de voltaje se obtiene el ángulo de fase utilizando el algoritmo SOGI-PLL, y tomando este valor como referencia, es posible generar los disparos para los tiristores empleando el ángulo de control.

En la Fig. 4 se observa el algoritmo del SOGI-PLL implementado en Simulink, donde se tiene como entrada la medición del voltaje y como salida el ángulo  $\omega t$  de dicha señal.

Para la generación del ángulo de control en la computadora se considera el algoritmo presentado en la Fig. 5, donde se envía el dato del ángulo mediante comunicación serie. Para no recargar computacionalmente el equipo, previo al envío de un dato este se compara con el dato precedente para ver si son iguales, en cuyo caso simplemente no se envía nada, esperando hasta que ocurra un cambio en el ángulo a enviar. Esto favorece el que la computadora pueda operar en tiempo real al momento de enviar los datos.

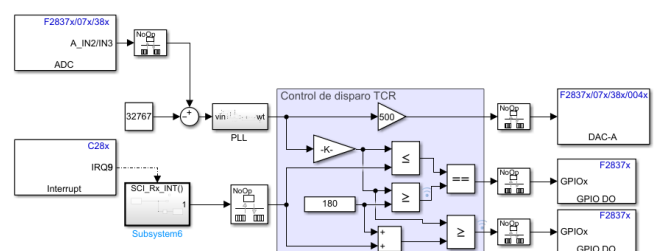


Fig. 3. Algoritmo de comunicación serial con la tarjeta C2000.

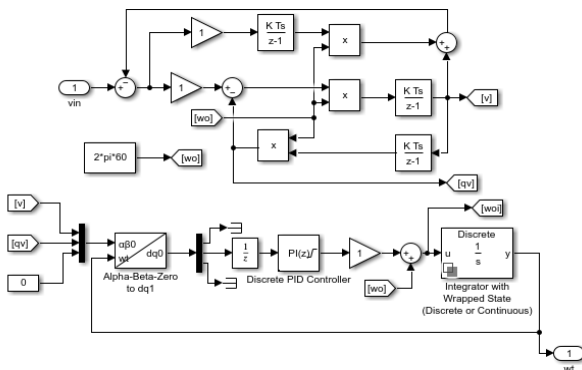


Fig. 4. Algoritmo del SOGI-PLL implementado en Simulink.

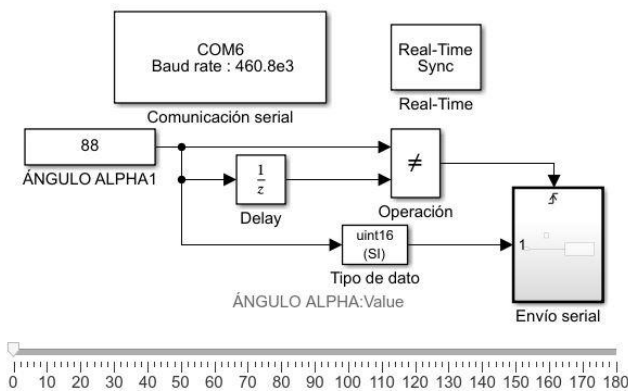


Fig. 5. Algoritmo de control en Simulink.

### C. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

En el interior del Laboratorio de Electrónica de Potencia se cuenta con el módulo de tiristores de la empresa LabVolt, así como con módulos de elementos pasivos. El módulo de tiristores integra un sistema de activación en el cual se pueden ingresar señales externas para el control de disparo. El control del ángulo de disparo del tiristor se realiza a través de la comunicación serial ya mencionada anteriormente. En la Fig. 6 se muestra detalladamente el esquema de control de disparo, donde se tiene que la computadora envía a la tarjeta de control el ángulo requerido, y ésta genera los pulsos de disparo para los tiristores. Estas señales son llevadas a los interruptores a través de una etapa de aislamiento basada en los circuitos integrados ISO-7221.

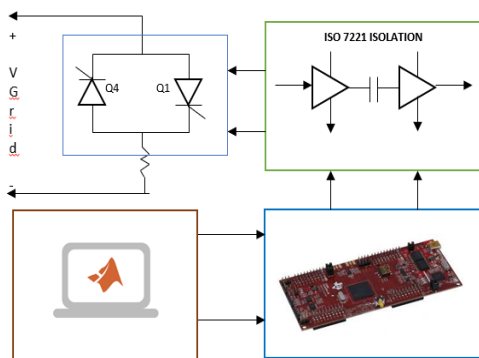


Fig. 6. Diagrama del algoritmo implementado en el sistema de control.

### III. RESULTADOS

Con el objetivo de validar el modelo del sistema de control desarrollado, se realizan múltiples pruebas en los módulos de tiristores del Laboratorio, efectuando mediciones del voltaje de alimentación  $v(t)$  y mediciones de las señales de corriente, en donde pueden identificarse los instantes en que se disparan los tiristores. Como parte del sistema de prueba se contemplan los siguientes elementos disponibles en módulos de LabVolt:

- Reactores:  $170[\Omega]$   $120[V]$   $60[Hz]$ .
- Resistencias:  $170[\Omega]$   $120[V]$   $60[Hz]$ .

Inicialmente, se registran señales considerando la medición realizada en la fase  $a$  de la red de alimentación. En la Fig. 7 se puede identificar el resultado del SOGI-PLL, verificando la similitud y la validación de la función del PLL, donde se observa que se detecta correctamente el argumento de la señal del voltaje de alimentación. Además del argumento, se registraron algunas señales de corriente con el fin de validar la precisión del sistema de control a través de los ángulos de disparo.

De este modo, para la realización de las pruebas, se considera un tiristor con carga resistiva (R). Posteriormente, la misma prueba se contempla con carga resistiva-inductiva (RL). De esta forma, para ambos casos se obtienen como resultados las figuras Fig. 8 y Fig. 9, para los casos de cargas R y RL, respectivamente.

En la Fig. 8 se ilustra el control del tiristor a través de una carga resistiva, identificando componentes armónicas en las señales de voltaje.

Los disparos de tiristores con carga RL (Ver Fig. 9) presenta buena respuesta a la variación del ángulo mediante la comunicación serial.

En estas gráficas se permite identificar el correcto funcionamiento del sistema de control. Por otro lado, cabe destacar que se implementaron estrategias computacionales con el objetivo de mejorar el rendimiento del procesador de la computadora de control, logrando así, beneficiar la operación del sistema de control ante la presencia de un pulso que va directo a los módulos del tiristor.

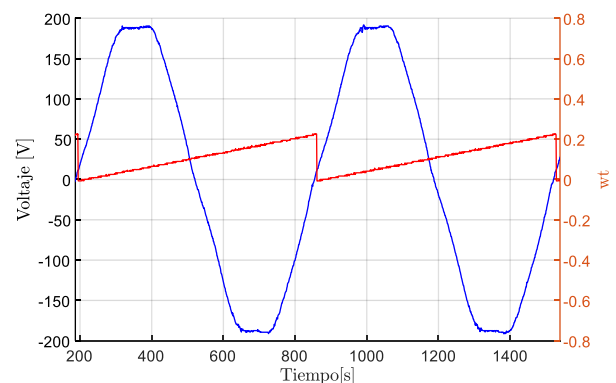


Fig. 7. SOGI-PLL con la señal eléctrica de voltaje.

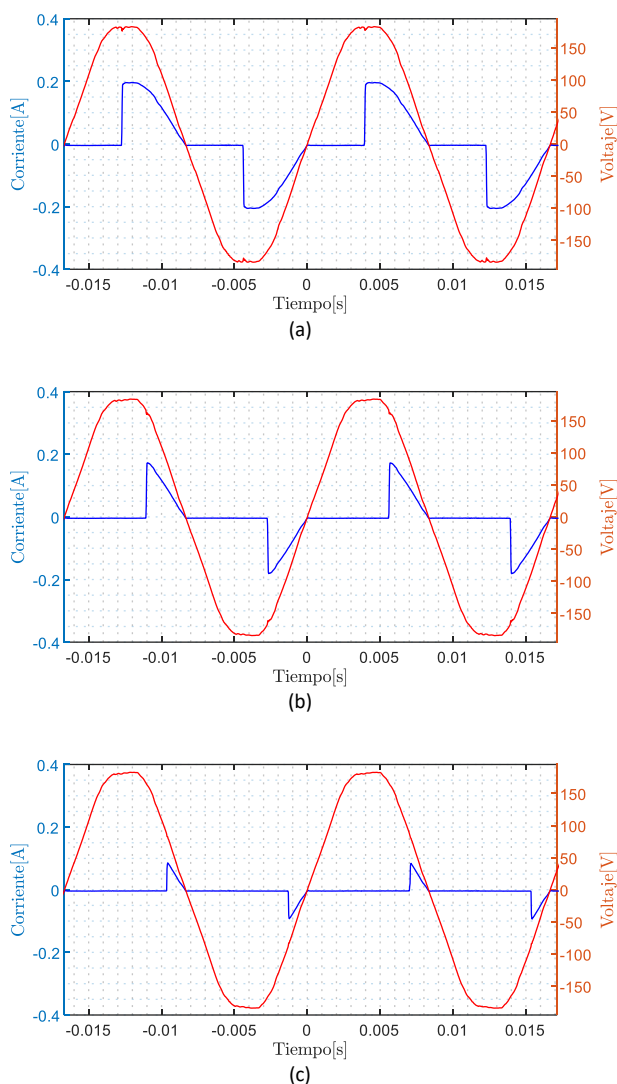


Fig. 8. Disparos de tiristor con carga resistiva (R). (a) Disparo con ángulo  $\alpha=90^\circ$ ; (b) Disparo con ángulo  $\alpha=120^\circ$ ; (c) Disparo con ángulo  $\alpha=150^\circ$ .

Finalmente, en la Fig. 10 se presenta el experimento implementado en el Laboratorio de Electrónica de Potencia.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la implementación de un sistema de control en tiempo real para tiristores, mediante una placa de desarrollo de bajo costo. El sistema experimental implementado comprende el módulo de tiristores de la marca LabVolt disponible en el laboratorio de Electrónica de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Primeramente, se evaluó la implementación del SOGI-PLL en la tarjeta de control C2000 de TI, verificando su correcta operación mediante pruebas experimentales. A continuación, se realizaron varias pruebas para validar el sistema de control de disparo para los tiristores desarrollados, a partir de las cuales se identificó una adecuada correspondencia en las acciones de control y las señales obtenidas. En las gráficas además se observa un comportamiento de distorsión armónica en la señal de voltaje, aunque dicho fenómeno se atribuye a los parámetros de la red eléctrica.

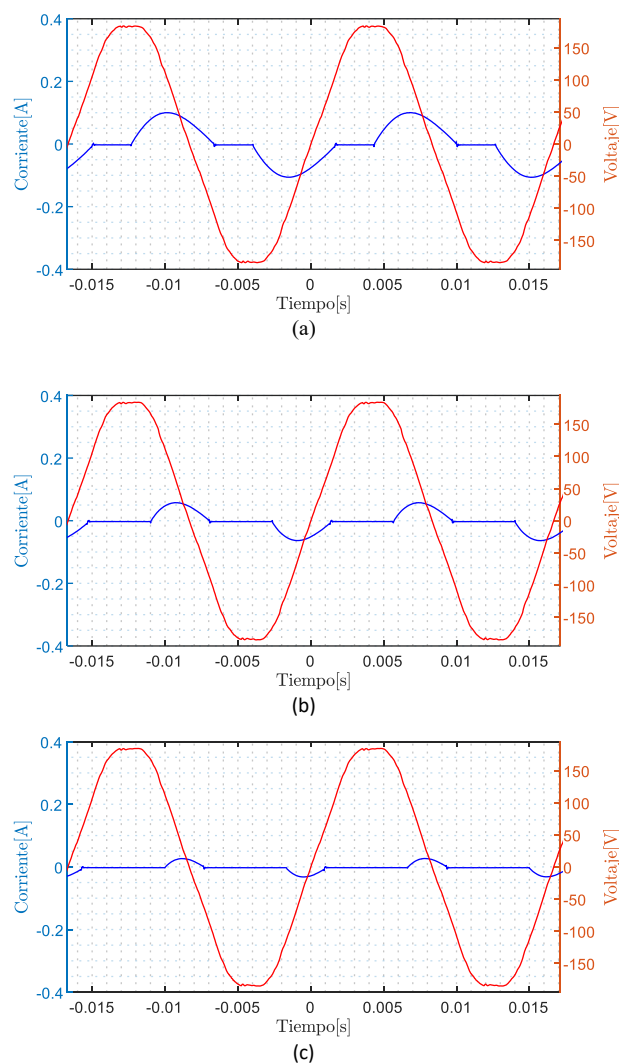


Fig. 9. Disparos de tiristor con carga RL. (a) Disparo con ángulo  $\alpha=90^\circ$ ; (b) Disparo con ángulo  $\alpha=120^\circ$ ; (c) Disparo con ángulo  $\alpha=150^\circ$ .

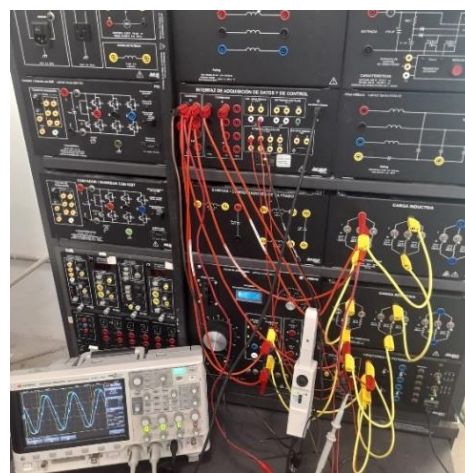


Fig. 10. Fotografía del experimento implementado.

Por lo tanto, es posible concluir que los resultados experimentales obtenidos son de buena calidad y se encuentran en concordancia con el principio de operación de los dispositivos de potencia involucrados en el sistema de prueba.

## REFERENCIAS

- [1] N. G. Hingorani, "High Power Electronics and flexible AC Transmission System," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 8, no. 7, pp. 3–4, Jul. 1988.
- [2] A. Ghosh and L. Gerard, "Applications of Power Electronics to Power Distribution Systems - A tutorial," in *IEEE PES General Meeting*, 2005.
- [3] L. Stastny, R. Mego, L. Franek, and Z. Bradac, "Zero Cross Detection Using Phase Locked Loop," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 294–298, 2016.
- [4] D. Nedeljkovic, V. Ambrozic, J. Nastran, and D. Hudnik, "Synchronization to the network without voltage zero-cross detection," *Proc. Mediterr. Electrotech. Conf. - MELECON*, vol. 2, pp. 1228–1232, 1998.
- [5] D. Jovcic, "Phase locked loop system for FACTS," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1116–1124, Aug. 2003.
- [6] J. Xu, H. Qian, Y. Hu, S. Bian, and S. Xie, "Overview of SOGI-Based Single-Phase Phase-Locked Loops for Grid Synchronization under Complex Grid Conditions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39275–39291, 2021.
- [7] "LAUNCHXL-F28379D Development kit | TI.com." [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>. [Accessed: 17-Mar-2022].
- [8] "Embedded Coder Support Package for TI C2000 - Hardware Support - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000-embedded-coder.html>. [Accessed: 17-Feb-2022].
- [9] M. Xie, H. Wen, C. Zhu, and Y. Yang, "DC Offset Rejection Improvement in Single-Phase SOGI-PLL Algorithms: Methods Review and Experimental Evaluation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12810–12819, 2017.
- [10] F. Xiao, L. Dong, L. Li, and X. Liao, "A Frequency-Fixed SOGI-Based PLL for Single-Phase Grid-Connected Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1713–1719, 2017.
- [11] K. Liu, X. Xu, M. Chen, B. Liu, L. Wu, and V. C. S. Lee, "A Hierarchical architecture for the future internet of vehicles," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 7, pp. 41–47, 2019.
- [12] S. Kalkoul, H. Benalla, K. Nabti, and A. Reama, "Comparison among Single-phase PLLs Based on SOGI," *Proc. - 2020 6th Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2020*, pp. 118–122, Oct. 2020.

## BIOGRAFÍAS



**GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA** Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca. Su área de interés incluye Electrónica de Potencia y la Calidad de la Energía.



**GUILLERMO TAPIA TINOCO** Nació en la ciudad de Zamora, Michoacán, el 16 de abril de 1982. Realizó estudios de Licenciatura y Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, obteniendo el grado en 2006 y 2008, respectivamente. Realizó estudios de Doctorado en la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, obteniendo el grado de Doctor en septiembre del 2022. Su área de interés es la aplicación de algoritmos inteligentes aplicados a dispositivos

compensadores en redes inteligentes.



**ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ** Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México, en el 2001; y el grado de Maestro en Ingeniería y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Actualmente es Profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato. Sus

intereses de investigación versan en tópicos de redes eléctricas modernas.



**JOSÉ M. LOZANO GARCÍA** Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales

intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



**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, implementación de sistemas electrónicos analógicos-digitales, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.

Recibido 12 de septiembre de 2022. Aceptado 15 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Producción de Biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas

**JEAN CARLO VELARDE-MEZA<sup>1\*</sup>, LITZY JHOANNA TIZNADO-OSUNA<sup>1</sup>, YOSHLIN MONTSERRAT AGUILERA-HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO<sup>1,2</sup>.**

<sup>1</sup>Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

<sup>2</sup>Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

\*Autor de Correspondencia: 2020030111@upsin.edu.mx.

**RESUMEN** El uso de biomasa representa una fuente de productos energéticos con potencial para disminuir el uso de los combustibles fósiles y acumulación de gases de efecto invernadero; uno de los principales biocombustibles es el biogás, el cual puede complementar/sustituir al gas natural en la generación de electricidad. El objetivo de este artículo fue desarrollar un proceso de co-digestión anaeróbica en un reactor semicontinuo, utilizando residuos agroindustriales de mango como sustrato y heces caninas como inóculo, para esto se partió del análisis de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) de ambos materiales. Se obtuvieron porcentajes de ST de  $36.75 \pm 0.02$  y SV de  $91.82 \pm 0.0055$  para los residuos de mango, mientras que para las heces caninas se obtuvieron ST:  $21.25 \pm 0.02$  y SV:  $62.485 \pm 0.02$ . Se desarrolló la digestión anaeróbica semicontinua por un periodo de 15 días, se monitorearon las condiciones del reactor, finalmente se obtuvo una producción de 0.520 litros de metano acumulados al finalizar el proceso de co-digestión, que se traducen en un potencial teórico de producción de energía eléctrica de 0.0052 kWh (21.89 kWh por tonelada de mezcla), que podría contribuir al cubrimiento parcial de la actual demanda energética regional y sobre todo al manejo de residuos.

**PALABRAS CLAVE**— Biogás, sustrato, co-digestión, biodigestor semicontinuo.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. PARADIGMA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

Desde que el ser humano desarrolló metodologías para generación de energía a escala industrial, la mayoría de su producción se ha basado fundamentalmente en el uso de combustibles fósiles; los cuales, a pesar de ser muy eficientes energéticamente, presentan una sensible inestabilidad en su precio y además, generan una serie de efectos negativos sobre el medio ambiente; por tal motivo, se ha llevado a cabo una exploración incesante en búsqueda de nuevas fuentes de energía, que presenten un menor impacto ambiental y características renovables [1].

Dentro de los esfuerzos realizados a nivel internacional, México se unió a varios países del mundo mediante el Acuerdo de París, cuyo objetivo es reducir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero que van al ambiente, donde destacan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases. A pesar de esto, algunos autores reportan que, incluso con un estricto cumplimiento de las metas de reducción de emisiones que se han fijado a nivel mundial, se pronostica que, en los siguientes años, el planeta podría presentar incrementos entre 3 y 4 grados Celsius sobre la temperatura promedio histórica. Ante esta

realidad, la transición energética es considerada hoy en día como uno de los principales pilares de la mitigación del cambio climático; por otro lado, una de las áreas claves para lograr esta transición, es el desarrollo y uso de los biocombustibles [2].

### B. EL BIOGÁS COMO OPCIÓN ENÉRGICA

Los biocombustibles son aquellos productos energéticos obtenidos mediante la transformación de materia orgánica (o biomasa), estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos y se caracterizan por tener un impacto ambiental menor que sus contrapartes no renovables; dentro de este tipo de productos energéticos se destacan el biodiésel, el bioetanol y el biogás [3]. Este último es una mezcla de gases que se genera por procesos naturales, usualmente en dispositivos específicos denominados biodigestores, el fundamento del proceso de obtención de biogás es la degradación biológica de materia orgánica mediante la acción de microorganismos en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno). El biogás generalmente está compuesto por metano (50-75%), dióxido de carbono (35-40%) y algunos gases traza como el nitrógeno (0.5-5%), sulfuro de hidrógeno (0.1%), hidrógeno (1-3%), y vapor de agua [4].

Una manera de producir biogás de manera controlada es mediante biodigestores, los cuales consisten en una cámara sellada que propicia la degradación anaeróbica de materiales como aguas negras, lodos activados o residuos biodegradables, donde se observan mezclas de materia orgánica con un consorcio de microorganismos presentes en él, esto es lo que se conoce como *inóculo*. Otro factor importante del proceso es la materia orgánica que se va a degradar, usualmente se obtiene a partir de residuos generados por actividades humanas, plantas, o productos vegetales y es conocido como *sustrato* [5].

Esta tecnología ha sido bien estudiada y presenta múltiples ventajas: disminuye la carga orgánica de los desechos orgánicos que están presentes en los residuos orgánicos, disminuye la contaminación ambiental, produce un gas combustible que puede emplearse para complementar y/o satisfacer las demandas de energía de algunas comunidades y, paralelamente genera un subproducto que tiene potencial uso como fertilizante y/o mejorador de suelos [3,4].

### **C. INÓCULOS Y SUSTRATOS ALTERNATIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

Una de las premisas relacionadas con la producción de biogás es encontrar materiales que se puedan utilizar como inóculos y sustratos de manera conveniente; dentro de las opciones de materia orgánica utilizable como sustratos destacan los residuos generados en la producción de alimentos [5].

Por otro lado, la industria alimentaria tiene una gran importancia en México, ya que emplea aproximadamente a más del 4% de las personas económicamente activas. De igual forma, la producción bruta en esta industria representa casi el 6.5% del total de la economía [6]. Según diversos autores, algunos residuos de la industria alimentaria, especialmente los derivados de frutas y verduras (tales como el plátano, papaya, jitomate, cebolla y mango), tienen un alto potencial para ser aprovechados para la generación de biogás, dentro de estas opciones, los residuos de mango han generado un gran interés con fines energéticos por los altos contenidos de materia orgánica y una alta disponibilidad [7].

Además, Sinaloa es considerado el tercer productor de mango en el país, debido a que participa con aproximadamente el 32% de la exportación nacional. Actualmente, en el municipio de El Rosario se registra la presencia de 1538 productores de mango. De acuerdo con cifras reportadas por el Gobierno Mexicano, Sinaloa es responsable de la producción de cerca de 397,780 toneladas de mango, donde, después del proceso de exportación una parte se queda en el país para consumo nacional, de este producto una parte es procesada, generando grandes cantidades de residuos. También, se ha reportado que aproximadamente entre un 10 a un 20% de la producción

total de mango no es aprovechado, por lo que es desechado sin fines de utilización, y en algunos casos puede extenderse hasta el 50% [8]. Actualmente, a nivel regional estos residuos no tienen un uso establecido que permita darles un valor agregado y que a su vez contribuya a reducir pérdidas económicas, así como a la mitigación de los problemas ambientales que su mal manejo provoca.

Por otra parte, el otro factor vital en la digestión anaeróbica son los inóculos, dentro de estos los más utilizados son lodos activados obtenidos de plantas tratadoras de aguas, residuos sólidos urbanos y heces obtenidas de diversos animales (destacando ganado vacuno, porcino y equino); se ha generado gran interés en encontrar inóculos alternativos que presenten potencial para obtener biogás; una opción interesante se encuentra en el sector doméstico, específicamente en los desechos de mascotas [9]. Este tipo de residuos generan una gran cantidad de materia orgánica en forma de desechos, en México, hasta el año 2021 se reportó un acumulado de 80 millones de mascotas, entre las cuales, 43.8 millones de ellas son animales caninos; éstos son capaces de producir en promedio 300 gramos de excremento al día, por lo que, tomando en cuenta las estadísticas anteriores, se puede considerar que en el país se generan aproximadamente 13,140 toneladas diarias de excremento canino [9]. Estos materiales tienen potencial aplicación en la producción de biogás ya que se pueden considerar como inóculos anaeróbicos, aunque en general su rendimiento no es muy alto (30-40 % de eficiencia); sin embargo, al realizar co-digestiones con materiales vegetales su potencial aumenta [9, 10]; es importante mencionar que a pesar las grandes cantidades generadas de este material, este ha sido pobremente estudiado, dejando un vacío de información en el uso de heces caninas como fuente de biogás.

Es por ello que, una vez analizadas las características de la biomasa residual de mango y la cantidad de residuos que se generan por temporada, así como también el hecho de que los residuos domésticos como heces caninas han sido poco estudiados como inóculos anaeróbicos, el presente proyecto analizó el potencial de posicionar estos materiales como posibles materia primas para la producción de biogás, con el objetivo de contribuir al manejo adecuado de estos residuos y permitir también la reducción de la carbonización al planeta de una manera pertinente.

## **II. DESARROLLO**

### **A. MATERIALES**

La biomasa residual de mango fue donada por la desecadora de mango “Los Aguilares Produce, S. de R.L. de C.V.”, ubicada en El Rosario, Sinaloa, México; responsables de producir toneladas de residuo de mango Ataulfo, el cual actualmente es desechado directamente en rellenos sanitarios, llegando a generar residuos todos los días dentro de los meses de mayo, junio y julio.



Para la preparación de la biomasa de mango, se realizó un pre-tratamiento de secado al sol que duró aproximadamente 4 días. Posteriormente fueron trituradas para reducir su tamaño. Finalmente, ésta fue almacenada a  $4 \pm 1$  °C hasta su posterior uso.

Por otro lado, el inóculo se obtuvo de una mascota local, la cual se encontraba con un buen estado de salud y es alimentada de manera regular y exclusivamente con alimento para perro, además, se mantuvieron condiciones de crianza estables.

## B. MÉTODOS

### 1. Caracterización de inóculo y sustrato – determinación de Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Humedad (H) y Sólidos Fijos (SF) o cenizas

Los contenidos de H, ST, SV y SF se evaluaron según lo reportado por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [11].

Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105°C por 15 min en un horno de secado (Novatech® HS35-ED), se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso ( $W_{crisol}$ ). Posteriormente, se colocaron 20 g de muestra (inóculo o sustrato) y se registró su peso ( $W_{muestra}$ ), finalmente se secaron las muestras a 103-105°C por 24 h. Se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se registró el peso ( $W_{total}$ ). El porcentaje de ST se calculó utilizando la Ec. (1). Las pruebas se realizaron por triplicado y el resultado se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar [11].

$$\%ST = \frac{W_{total} - W_{crisol}}{W_{muestra} - W_{crisol}} \times 100 \quad (1)$$

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

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

Para la determinación de SV y los SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla a 550°C durante 60 min, posteriormente el residuo fue pesado ( $W_{volátil}$ ). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, se calcularon empleando las Ecs. (3) y (4) [11].

$$\%SV = \frac{W_{total} - W_{volátil}}{W_{total} - W_{crisol}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%SF = \frac{W_{volátil} - W_{crisol}}{W_{total} - W_{crisol}} \times 100 \quad (4)$$

### 2. Condiciones teóricas, cálculos y dimensionamiento

Una vez determinados los valores de ST y SV para sustrato e inóculo, para el desarrollo de digestión anaeróbica se determinó utilizar una proporción de 70% y 30% respectivamente, esto porque la fuente de inóculo se encontró limitada por la cantidad de producción diaria. Aquí es necesario destacar que la proporción de inóculo-sustrato se encontró dentro de lo recomendado por diversos autores. Además, este mismo factor se utilizó para elegir un diseño de biodigestor semicontinuo, pues de esta forma el inóculo se incorporaría lo más fresco posible durante las cargas diarias [12, 13, 14]. De acuerdo con la bibliografía, el porcentaje de ST recomendado para biodigestores semicontinuos va desde 8% hasta 12%, por lo que fue necesario realizar una dilución de la mezcla con agua [12]. En el presente proyecto, los ST se utilizaron en una dilución de 8% por kg de mezcla inóculo-sustrato, la cantidad de agua necesaria para esto se calculó mediante la Ec. (5):

$$\%S.T. (diluída) = \frac{(1 \text{ kg de mezcla})(S.T. de la mezcla)}{1 \text{ kg de mezcla} + \text{cantidad de agua}} \quad (5)$$

Para el cálculo del volumen del biodigestor se tomó en cuenta que la producción de inóculo diaria era aproximadamente de 120 g/día, además de que el tiempo de retención hidráulica (TRH) determinado fue de 15 días; la Ec. (6) muestra la relación del volumen con el TRH y la cantidad de mezcla inóculo-sustrato (tasa de carga orgánica o TCO):

$$(TRH)(TCO) = \text{Volumen del biorreactor} \quad (6)$$

Basándose en los cálculos presentados, se optó por utilizar un biodigestor con capacidad total de 20 L, con un espacio de cabeza de 52.5% para la acumulación de biogás, lo cual arrojó una tasa de carga orgánica de 0.5 L/día que representa solo un 5.26% de la carga total fija, misma que se encuentra dentro del rango recomendado [5, 12]. Esto no solo contribuyó a la facilidad de búsqueda de materiales, sino que también previno el caso hipotético de que la producción de inóculo no fuera suficiente, pues redujo su participación en un poco menos de la mitad. Las cantidades de cada uno de los elementos de acuerdo con la proporción antes mencionada se encuentran en la Tabla I.

TABLA I. CONDICIONES TEÓRICAS DEL BIODIGESTOR.

Parámetros	Mezcla
PSTM	32.1%
TRH	15 días
ST	8%
TB	Semicontinuo
Temperatura	Rango mesofílico
TCO	0.5 L/día
CF	9.5 L

PSTM: Promedio de ST de la mezcla (sin diluir); THR: Tiempo de retención hidráulica; ST: Sólidos totales (diluidos); TB: Tipo de biodigestor; TCO: Tasa de carga orgánica; CF: Carga fija.

En cuanto a la temperatura del proceso, se optó por utilizar un rango mesofílico, principalmente por dos razones, primero, dado que los microorganismos del inóculo se obtuvieron directamente de un organismo vivo es muy probable que los consorcios bacterianos trabajen de manera más eficiente bajo esas temperaturas; en segundo lugar se decidió realizar la digestión anaeróbica a la temperatura ambiente natural, donde, por las características del clima regional se permitió aprovechar el rango de temperatura de la localidad durante el mes de agosto, llegándose a presentar temperaturas máximas registradas de 32 °C, mientras que por las noches se llegaron a presentar temperaturas mínimas de 25 °C, esto permitió realizar un proceso sin muchos requerimientos energéticos.

### 3. Diseño, construcción del biodigestor y puesta en marcha

Se utilizó un biodigestor de 20 L de polietileno de baja densidad, mismo que se adaptó para colocar un sistema de toma de muestras en la parte inferior, esto para el monitoreo del proceso de digestión anaeróbica. A su vez, en la parte superior se contó con un dispositivo de control de salida del gas generado, lo que permitió las mediciones de la producción obtenida en el proceso. Además, se implementó un tubo de PVC cortado en diagonal, que funcionó como sistema de alimentación (Fig. 1).

La agitación del sistema se realizó de manera manual al menos dos veces al día durante todo el proceso de digestión anaeróbica, esta agitación es importante para evitar formación de espumas, además de favorecer una mezcla homogénea y adecuada del inóculo y el sustrato [13]. Para la medición del biogás generado se implementó un sistema de eudiometría utilizando hidróxido de sodio 0.5M como solución de medición (Fig. 1D), lo que permitió medir directamente el contenido de metano formado en la digestión anaeróbica [14]. Finalmente, el proceso se diseñó para realizar una digestión anaeróbica con una carga diaria semicontinua de 0.5 L de mezcla fresca (inóculo más sustrato). El digestato saliente se utilizó para monitorear los parámetros de pH y temperatura dentro del biodigestor.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### A. CARACTERIZACIÓN DEL INÓCULO Y SUSTRATO

La Tabla II muestra los resultados de la caracterización del sustrato y del inóculo.

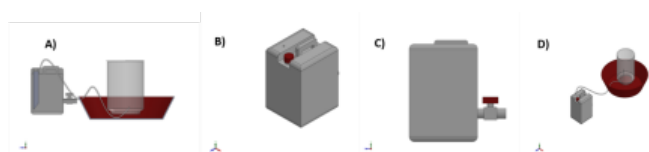


Fig. 1. A) Vista lateral del biodigestor. B) Vista isométrica del reactor modificado. C) Vista lateral del reactor modificado. D) Vista del biodigestor ensamblado.

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO.

Parámetros	Mango	Heces caninas
%H	63.25 ± 0.02	78.75 ± 0.02
%ST	36.75 ± 0.02	21.25 ± 0.02
%SV	91.82 ± 0.0055	62.485 ± 0.02
%SF	8.181 ± 0.0055	37.515 ± 0.02

H: Humedad; ST: Sólidos totales; SV: Sólidos volátiles; SF: Cenizas

Las pruebas de caracterización del sustrato muestran que hubo un contenido de H relativamente alto, esto se puede explicar debido a que se realizó un proceso de secado al sol, que algunos autores consideran que no son los más eficientes para alcanzar un secado completo, sin embargo, con el potencial disminución del gasto energético del proceso se considera conveniente, además, el contenido de H obtenido después del proceso de secado es adecuado ya que este tipo de materiales usualmente presenta valores de H que oscilan entre 95 y 98 % [14, 15, 16].

Por otro lado, en cuanto a los SV, los residuos de mango presentaron porcentajes de 91.82 ± 0.0055 %, valores cercanos a los reportados por Gonzáles-Arenas [15] y Luna-Avelar [14, 16] quienes reportaron resultados para mango Kent y Haden, obteniendo valores entre 95.55 y 96.90 respectivamente. Este factor es importante ya que los SV representan el contenido de materia orgánica disponible para transformarse biológicamente en biogás, es decir, mientras más altos valores de SV contenga el material, mayor potencial teórico tiene para obtención de biogás [5,12]. Este resultado se conecta con los SF, ya que el porcentaje restante de los SV son los minerales que usualmente no se pueden aprovechar mediante procesos bioquímicos, por eso es recomendable que los materiales que se utilizarán como sustratos tengan valores bajos de este parámetro (menores a 10 %), lo que se cumple en el presente trabajo [12].

En cuanto al inóculo, se obtuvo un 78.75 ± 0.02% de H, valor inferior comparado con los reportes otros autores [9, 10, 11] quienes determinaron un rango de H entre 96 y 98.5%, esta diferencia puede explicarse por el manejo que se tiene del inóculo desde que se obtiene hasta que se utiliza, además de que los reportes no son uniformes en las regiones de estudio ni en las condiciones de alimentación de los animales. En cuanto a los SV, es decir la cantidad de materia orgánica disponible para transformarse, se reportó un 62.485 ± 0.02, valor que se encuentra muy por encima de lo determinado por otros autores, quienes reportaron valores entre 5 y 20%, es importante mencionar que las posibles variaciones de SV en las heces caninas se pueden deber a múltiples factores, que van desde la alimentación, edad, raza y hábitos del animal [9, 10, 11].

Por las características observadas tanto en inóculo como sustrato, se puede suponer que ambos materiales tienen propiedades adecuadas para realizar procesos de digestión anaeróbica, aunque en el presente artículo no se realizaron mediciones de la relación carbono/nitrógeno (C/N), según la

bibliografía reportada previamente los residuos de mango pueden presentar rangos de C/N entre 78 y 86 [14, 15, 16], mientras que las heces caninas se han reportado con valores C/N que oscilan entre 15- 17 [9, 10, 11], esto permite suponer que los materiales de manera individual no presentan valores de C/N adecuados (el rango óptimo de este parámetro se encuentra entre 15-30), pero la posible combinación de estos pudiera arrojar un valor dentro del rango adecuado para la digestión anaeróbica [5].

## B. MONITOREO DE LAS CONDICIONES EN EL REACTOR

En la Fig. 2, se muestran los registros de las temperaturas tanto del ambiente como del interior del reactor; se observa que la temperatura interna del reactor generalmente estuvo por encima de la temperatura promedio ambiental que se presentó durante el periodo de digestión, lo que indica que durante el proceso se mantuvieron condiciones mesofílicas, para que la digestión anaeróbica se realizara de manera adecuada.

Por otro lado, en la Fig. 3 se muestran los valores en los que se mantuvieron algunos parámetros dentro del reactor (temperatura y pH). En cuanto a la temperatura se observó que fue en aumento hasta un punto máximo y luego se mantuvo en un valor constante.

En cuanto al pH se registró un ligero descenso a lo largo de los primeros días, eso pudiera indicar que entró en etapa de acidogénesis, posteriormente se mantuvo el pH sin presentar un incremento notable, esto es anormal porque usualmente al salir de la etapa de acidogénesis se observa un incremento en el pH (debido a las etapas de acetogénesis y de metanogénesis), lo que no se observó en el presente trabajo.

El comportamiento de estos valores concuerda con lo reportado por otros autores [9,10, 11], donde se registraron comportamientos similares en la temperatura y pH en digestiones anaeróbicas con materiales similares.

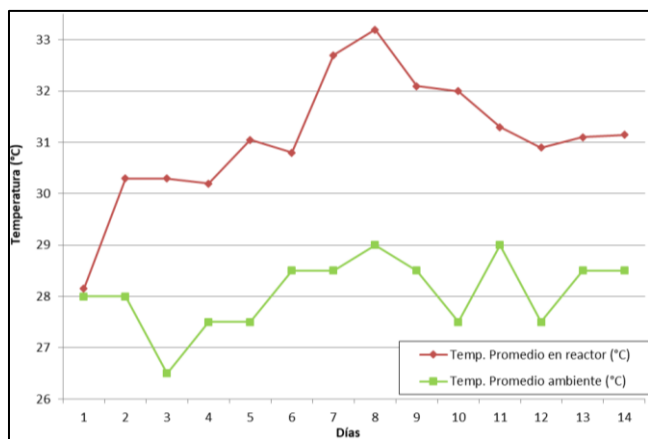


Fig. 2. Registro de temperaturas durante el proceso de digestión anaeróbica.

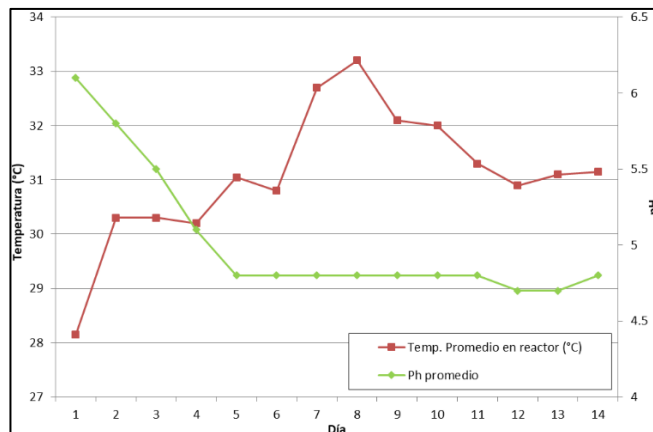


Fig. 3. Registro de las condiciones dentro del reactor.

## C. PRODUCCIÓN DE METANO ACUMULADA EN LA CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Al finalizar el proceso de digestión anaeróbica se obtuvo una producción acumulada de 0.520 L de metano ( $\text{CH}_4$ ); en relación con el volumen de operación del reactor (9.5 L) se obtuvieron 0.054 L de metano por cada litro de mezcla en el reactor ( $\text{L CH}_4 / \text{L}$ ), indicando que la mezcla de materiales presenta buen potencial para la producción de metano.

Okoroigwe *et al.* [10], reportaron una producción de 0.508 L de biogás por L de mezcla en el reactor. Aunque los resultados en el presente trabajo son menores, los autores no realizaron discriminación entre el biogás generado y el contenido de metano, además de que el tipo de material utilizado presentaba diferentes características.

Phetyma *et al.* [9], obtuvieron una producción de biogás de entre 1.67 y 1.97  $\text{L CH}_4/\text{L}$ , en una digestión de 28 días, utilizando heces de perro en co-digestión con residuos vegetales. Cabe la pena mencionar que en el trabajo realizado se buscaron optimizar las relaciones de inóculo-sustrato.

Otro factor importante en las diferencias obtenidas en el presente trabajo con otras referencias es el tamaño del reactor, ya que se empleó un biorreactor con volumen de 20 L (actual experimento), contra equipos con volúmenes entre 50 y 200 L (en los reportes previos); y se ha mencionado que utilizar volúmenes mayores en el proceso de digestión tiene un impacto importante en la cantidad de biogás/metano que se genera [5].

Por otro lado, diversos autores realizaron pruebas de la relación de carbono nitrógeno (C/N) de este tipo de materiales [9,10,11,14,15,16], donde se observó que generalmente los residuos de mango presentan valores altos (con rangos entre 78-86) y las heces caninas valores bajos (que oscilan entre 15-17), por lo que la idea de realizar co-digestiones con estos materiales puede potenciar la producción de biogás, aunque en el presente trabajo no se analizaron estos parámetros.

Una de las aplicaciones principales del biogás es la generación de calor y/o electricidad. La estimación de la electricidad que potencialmente se puede obtener a partir del biogás es recomendable para predecir la inversión y costo operativo de la potencial planta de digestión anaeróbica, así como el costo de producción del biocombustible, entonces, tomando en cuenta las características del biogás, tales como su poder calorífico de 36 MJ, que es el equivalente a un aproximado de 10 kWh por m<sup>3</sup> [17], en el presente trabajo, con la producción obtenida de 0.520 L equivalentes a 0.0052m<sup>3</sup> de metano producido a partir de 2.375 kg de mezcla es posible producir alrededor de 0.0052 kWh de electricidad.

Si se quiere aumentar la escala de producción mediante el aprovechamiento de las grandes cantidades de residuos generado por la agroindustria del mango y del sector doméstico de mascotas; por cada tonelada de mezcla se estarían produciendo aproximadamente 21.89 kWh de electricidad, lo que sería equivalente a la alimentación de 43 refrigeradores con un consumo de 0.5 kWh cada uno.

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la caracterización de los residuos agroindustriales de mango de la región y las heces caninas, donde se concluye que ambos materiales presentan altos valores de ST y SV, características adecuadas para procesos de digestión anaeróbica. Se recomienda para investigaciones posteriores el análisis de relación de carbono/nitrógeno (C/N) de los materiales usados para poder valorar y modificar los contenidos de las mezclas inóculo sustrato en busca de mejorar las condiciones del proceso.

Ambos residuos poseen las cualidades necesarias para procesos de digestión anaeróbica de manera individual, sin embargo, los estudios sobre el aprovechamiento de las heces caninas aún son muy escasos, lo que contrasta con la relevancia que tiene este tipo de residuo ya que con las grandes cantidades que se generan representan riesgos sanitarios importantes, por lo que el presente estudio puede representar un campo de oportunidad tanto para la investigación como para la industria, e incluso para los hogares.

Al aumentar la escala teórica de producción, se obtienen valores teóricos significativos en cuanto a la capacidad de producción de energía eléctrica, por lo que, con un análisis más detallado que involucre costos de producción, mantenimiento, etc. (que no fueron el fin de este documento), se podría sumar alguna propuesta interesante para el área de la generación.

Los resultados de potencial metanogénico del proceso semicontinuo de co-digestión, a pesar de encontrarse por debajo de otros trabajos (que manejan reactores con mayores volúmenes) abren la posibilidad del uso de estos materiales como posibles fuentes de biogás/biometano en la región. Lo

que coadyuvaría a mejorar el manejo de estos importantes residuos que en caso de no disponerse de manera adecuada pueden tener impactos negativos en el ambiente.

#### REFERENCIAS

- [1] Gobierno de México. "Energías renovables en México". [En línea]. Disponible en <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-cienciahoy/1526-energias-renovables-en-mexico> (accedido el 14 de julio de 2022).
- [2] D. Castañeda, "México y la historia de sus transiciones energéticas", Nexos, 18 de marzo de 2021. Accedido el 14 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://economia.nexos.com.mx/mexico-y-la-historia-de-sus-transiciones-energeticas/>
- [3] C. Álvarez 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional.
- [4] "Reactor de biogas". SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspectives/tecnologias-de-tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-yalmacenamiento/reactor-debiogas#:~:text=Un%20reactor%20de%20biogas%20es,parte%20superior%20de%20la%20cámara> (accedido el 15 de julio de 2022).
- [5] Santos-Ballardo DU, Rossi S, Reyes-Moreno C, Valdez-Ortiz A. 2016. Microalgae potential as a biogas source: current status, restraints and future trends. *Rev Environ Sci Biotechnol*. doi: 10.1007/s11157-016-9392-z
- [6] Secretaría de Economía de México. "Industria alimentaria". <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/industria-y-comercio/informacionsectorial/industria-industria-alimentaria> (accedido el 14 de julio de 2022).
- [7] "Proyecto para producción de biogás". Autotransporte. <https://www.autotransporte.mx/combustibles/proyecto-para-produccion-de-biogas/> (accedido el 15 de julio de 2022).
- [8] A. I. Reho, "Producción de mango en el sur de Sinaloa", Hortalizas, 14 de mayo de 2015. Accedido el 15 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.hortalizas.com/cultivos/produccion-de-mango-en-el-sur-de-sinaloa/>
- [9] Phetyima N., Wanthonga T., Kannikaa P., Supngama A. 2015. Biogas Production from Vegetable Waste by using Dog and Cattle Manure. *Energy Procedia* 79: 436 – 441.
- [10] Okoroigwe E.C., Ibeto C.N., Okpara C.G. 2010. Comparative study of the potential of dog waste for biogas production. *Trends in Applied Sciences Research*. 5(1): 71-77.
- [11] Seyitoglu S.S., Avcioglu E., Haboglu M. R. 2022. Determination of the biogas potential of animal waste and plant location optimization: A case study. *International Journal of energy Research*. 46(14) 20324-20338.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <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>
- [13] D.U. Santos-Ballardo, X. Font, A. Sánchez, R. Barrena, S. Rossi, A. Valdez-Ortiz. 2015. Valorisation of biodiesel production wastes: anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and co-digestion with glycerol. *Waste Manag. Res.* 33(3), 250–257, <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X15572182>.
- [14] K. D. Luna Avelar, N. Y. Mejías Brizuela, A. Valdez Ortiz, L. J. Germán Baez, D. U. Santos Ballardo. 2018. Efecto de pre-tratamientos sobre la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de la

industria procesadora de mango. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias. 9 (21): 1562–1580.

- [15] Y. Gonzáles Arenas, "Análisis del potencial de producción de metano a partir de residuos agroindustriales de mango", Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, 2019. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.upsin.edu.mx/formatos/tesis/YadrissiaGonzalezArenas11746.pdf>
- [16] K.D. Luna-Avelar, R. Barrena, X. Font, A. Sánchez, D.U. Santos-Ballardo, L.J. Germán-Báeza, A. Valdez-Ortiz. 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.
- [17] 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/10.1088/1755-1315/230/1/012075>

## AGRADECIMIENTOS

A los programas educativos de Ingeniería en Energía y Biotecnología UPSIN, por brindar su apoyo en cuanto a equipamiento, a la desecadora de mango “Los Aguilares Produce, S. de R.L. de C.V.”, y Jean Carlo Velarde por la donación del material, a la laboratorista Rosa Guadalupe Brion Gonzales, y a la Ingeniera en Energía Mara Fernanda Juárez Cota, Julián Osuna y Christian Beltrán Sosa, por el apoyo técnico brindado, y finalmente al Dr. David Ulises Santos Ballardó por su acompañamiento y asesorías brindadas a lo largo de este proyecto.

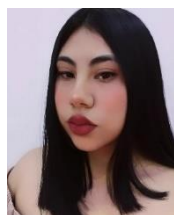
## BIOGRAFÍAS



**JEAN CARLO VELARDE-MEZA** Actualmente cursa el Séptimo cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Experiencia en la elaboración de proyectos para la solución de problemas energéticos. Sus líneas de interés son la Energía de la Biomasa, la Eficiencia Energéticas y las Energías Renovables.



**LITZY JHOANNA TIZNADO-OSUNA.** Cursa el séptimo cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Aficionada a la ciencia en todas sus expresiones. Sus líneas de interés son la Energía Nuclear, Energía del Hidrógeno, Física en general y las Energías Alternativas.



**YOSHLIN M. AGUILERA-HERNÁNDEZ** Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Con capacidad para desarrollar soluciones a problemáticas sociales y ambientales a través de investigaciones cuyos objetivos son aportar en ciencia y tecnología, experiencia en desarrollo y creación de prototipos enfocados al área de fotovoltaica e hidráulica. Capacidad y experiencia en desarrollo y redacción en trabajos de investigación social, participación en olimpiadas de biología y certificada en instalación fotovoltaica por la fundación Carlos Slim. Actualmente interesada en trabajos de investigación enfocados a la bioenergía.



**DAVID U. SANTOS-BALLARDO** Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; 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.