



MEMORIAS

Congreso Internacional de Energía

2024

CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

NOVIEMBRE 6, 7 Y 8

Edición 2024 de las Memorias del Congreso
Internacional de Energía, CIENERGIA UG.

OFICIAL: www.cinergiaug.org



CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

2024

COMITÉ DEL CONGRESO

PRESIDENTE

Dr. José Merced Lozano García
Director del DIE de la UG

COORDINACIÓN GENERAL

Dr. Luis Ramón Merchán Villalba
PTC del DIE de la UG

SECRETARIO GENERAL

Dr. Jesús Martínez Patiño
PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN EDITORIAL

Dr. Osvaldo Rodríguez Villalón
Víctor Javier Gutiérrez Martínez
PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN TÉCNICA

Dr. Arnoldo Zamora Cárdenas
PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN DE LOGÍSTICA

Dr. Rafael Guzmán Cabrera
Mtro. Irving Wilihado Reyes Buenfil
M.I. Elena del Rocío Dávila Álvarez
PTC del DIE de la UG

COORDINACIÓN DE DISEÑO Y DIFUSIÓN

Dra. Xiomara González Ramírez
M.E. D. J. del Carmen Mendoza Ornelas
L.A.D. Lesli Yared Villegas Fonseca
Departamento de Vinculación CINERGIA UG



CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

2024

COMITÉ TÉCNICO

Dr. Alejandro Pizano Martínez

PTC del DIE de la UG

Dr. Adrián González Parada

PTC del DIE de la UG

Dr. Miguel Ángel Gómez Martínez

PTC del DIE de la UG

Dr. J. Juan Rosales García

PTC del DIE de la UG

Dr. Héctor Javier Estrada García

PTC del DIE de la UG

Mtra. Elena del Rocío Dávila Álvarez

PTC del DIE de la UG

Dr. Néstor Daniel Galán Hernández

PTC de Ing. en Energía de la UPSIN



Dentro de los participantes se tuvieron representantes de las siguientes instituciones:

Área Académica

1. Universidad de Guanajuato.
2. Universidad de Tennessee.
3. Universidad de UPSALA.
4. Universidad de Nottingham.
5. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
6. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
7. Universidad Nacional Abierta y A distancia de México (UNADM).
8. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
9. Instituto Tecnológico de Culiacán.
10. Instituto Tecnológico de Morelia.
11. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán.
12. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
13. Universidad Autónoma del Estado de México.
14. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Unidad Mazatlán.
15. Universidad Politécnica De Sinaloa.
16. Universidad de Colima.
17. TecNM/CENIDET.
18. Universidad Tecnológica De Manzanillo.
19. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV).

Área Industrial

1. Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).
2. Unión Nacional de Constructores Electromecánicos (UNCE).
3. Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato (CINERGIA UG).
4. Sigtronic.
5. INEL.
6. WASION.
7. Schneider Electric.



CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

2024

PREFACIO

En la séptima edición del Congreso Internacional de Energía de la Universidad de Guanajuato, CIENERGIA UG 2024, el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Guanajuato (UG) y el Comité Organizador invitaron a la comunidad científica y tecnológica, nacional e internacional, a ser parte de este encuentro con el objetivo de proporcionar un entorno de intercambio y difusión del conocimiento científico para promover el fortalecimiento y el avance de trabajos en los temas de energía. Las actividades que se llevaron a cabo durante el marco del congreso fueron las siguientes:

- 1. Conferencias Magistrales:** Conferencias impartidas por especialistas del área energética; representativos de Reino Unido, Estados Unidos y Suecia.
- 2. Presentación en sesión técnica:** Un total de 30 Sesiones impartidas en modalidad híbrida por estudiantes, especialistas e investigadores del área energética y afines.
- 3. Exposición Industrial:** Exposición por parte de diferentes empresas del área energética. Exponiendo la aplicabilidad industrial y hablando sobre sus productos y desarrollos más destacados.
- 4. Talleres:** Impartición de 2 Talleres presenciales:
 - 1) Soldadura exotérmica e iniciador electrónico a distancia.
 - 2) Preparación de cables XLP e instalación de accesorios de media tensión.

El evento se llevó a cabo de manera híbrida por medio de una plataforma virtual y dentro de las instalaciones de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), de la Universidad de Guanajuato, del 6 al 8 de noviembre de 2024, y se contó con un aproximado de 200 participantes.



CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

2024

CONTENIDO

Modelado de Sistema de Generación Fotovoltaico con Seguimiento de Punto de Máxima Potencia en EMTP-ATP **08**

Juan Manuel Cano Gallardo
José Merced Lozano García
Arturo García Pérez
Luis Ramon Merchan Villalba

Simulación y Análisis de un Sistema Eléctrico que Incorpora un Inversor Formador de Red ("Grid Forming") **15**

Yannick García Zepeda
Osvaldo Rodríguez Villalón
Héctor Javier Estrada García

Prototipo IoT para el Monitoreo y Control Remoto en Laboratorio de Sistemas de Riego **23**

Salomón Flores-García
Aaron A. Maciel-Armenta
Israel E. Herrera-Díaz
Noé Saldaña-Robles
Jonathan Cepeda-Negrete
Guillermo Tapia-Tinoco

Perspectiva de los Sistemas Solares Fotovoltaicos para Riego Agrícola en el Estado de Guanajuatoas **30**

Elmer G. Robles Lecona
Víctor J. Gutiérrez Martínez
Enrique A. Zamora Cárdenas

Diseño del rotor de un aerogenerador ASWT para entornos urbanos **38**

Daniel Juan José Ortiz Velázquez
Erik Rosado Tamariz
Rafael Campos Amezcu

El STATCOM: Estado del Arte, Topologías, Técnicas de Modulación, Control, Aplicaciones y Tendencias Futuras **45**

Diego Gutiérrez Torres
Juan M. Ramírez
José Lozano García

Análisis de Rentabilidad de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos de Generación Distribuida **53**

Herbe Barrios Rodríguez
José Alfredo Manzo Preciado
Luis Felipe Martínez Soto

Disminución de absorción de luz solar de la mezcla de polímeros P3HT:PCBM depositados en PET/ITO **61**

Carlos Montero Tavera
Eric Noé Hernández Rodríguez
Wilma Betzabé Rojas Salinas
Mariely Loeza Poot



CIENERGIA UG

CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA

2024

Determinación del potencial bioquímico de metano (BPM) de residuos de berenjena (*Solanum melongena*)

Karina González Ramírez
David Ulises Santos Ballardo
Andrea de Jesús Gárate Osuna
Karla Denisse Luna Avelar
Miguel Betancourt Lozano
Jennifer Vianey Félix Medina

66

Efecto de la degradación de residuos de pescado empleando mosca soldado negro sobre el potencial metanogénico

Alondra Estefanía de la Parra López
Miguel Betancourt Lozano
Bruno Gómez Gil
Erick Josué Navarro Barrón
Sofía Guadalupe Lerma Carreón
Karla Denisse Luna Avelar

73

Análisis de estrategias de modulación para un DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje

Luis Alejandro Ávila Álvarez
Luis Eduardo Ugalde Caballero

79

Ejemplo base de dimensionamiento de un sistema de bombeo solar aislado para riego agrícola

Elmer G. Robles Lecona
Enrique A. Zamora Cárdenas
Víctor J. Gutiérrez Martínez

86



Modelado de Sistema de Generación Fotovoltaico con Seguimiento de Punto de Máxima Potencia en EMTP-ATP

Juan Manuel Cano Gallardo¹, José Merced Lozano García², Arturo García Pérez¹, Luis Ramon Merchan Villalba²

¹Universidad de Guanajuato, DICIS, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

²Universidad de Guanajuato, DICIS, Departamento de Ingeniería Electrónica.

jm.canogallardo@ugto.mx

jm.lozano@ugto.mx

arturo@ugto.mx

lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN Este trabajo presenta el modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos utilizando EMTP-ATP, con el objetivo de maximizar la potencia mediante un algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT). Se implementa el método de perturbación y observación para ajustar dinámicamente el punto de operación de los paneles solares y optimizar la extracción de energía bajo diversas condiciones ambientales. En una simulación con una disminución abrupta de la temperatura de 25°C a 5°C, el sistema mostró un incremento notable de 10 kW en la potencia activa generada. Este resultado demuestra la capacidad del MPPT para adaptarse eficazmente a cambios en las condiciones operativas, mejorando tanto la eficiencia como la estabilidad de los sistemas fotovoltaicos.

PALABRAS CLAVE— EMTP-ATP, MPPT, simulación, fotovoltaico.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, el consumo global de energía eléctrica ha aumentado significativamente debido a la incorporación de nuevas tecnologías en diversos sectores, desde aplicaciones domésticas hasta complejas instalaciones industriales y de explotación de recursos. Este incremento en la demanda energética requiere la inclusión de nuevos generadores en los sistemas eléctricos, pero también plantea la necesidad de considerar los impactos ambientales, particularmente las emisiones de CO₂ asociadas con muchas formas tradicionales de generación basadas en combustibles fósiles [1]. Así, las energías renovables han ganado relevancia por su menor impacto ambiental y sustentabilidad. Dentro de las energías renovables, la energía solar fotovoltaica ha mostrado un crecimiento notable. Según el reporte de Estadísticas de Capacidad Renovable 2024 de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), la capacidad global instalada por fuentes renovables creció en 473,382 MW entre 2022 y 2023, de los cuales 345,534 MW (aproximadamente el 73%) corresponden a la energía solar fotovoltaica.[2]

A medida que la adopción de energías renovables continúa creciendo, la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se vuelve un tópico de gran relevancia. Optimizar la producción de energía solar no solo ayuda a satisfacer la creciente demanda energética, sino que también reduce la dependencia de fuentes no renovables y las emisiones de carbono asociadas.

Para la extracción de la energía solar fotovoltaica se dispone de diversas topologías que permiten hacer uso de los paneles solares en arreglos que brindan niveles adecuados de voltaje y corriente para una correspondiente potencia, desde pequeñas instalaciones hasta grandes plantas solares [3]. Para la optimización de la operación de los arreglos fotovoltaicos se implementan algoritmos de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés *Maximum Power Point Tracking*) cuyo objetivo es ajustar el nivel de voltaje en los terminales de los arreglos solares fotovoltaicos de modo que se extraiga la máxima potencia disponible [4]. Esta actividad la desarrolla el MPPT continuamente debido a que las condiciones de la generación cambian constantemente. Este algoritmo es ejecutado por un sistema de conversión de energía, que puede ser un controlador de carga, inversor, micro inversor en sus diversas topologías y número de fases.

El análisis de los sistemas de generación fotovoltaica abarca diferentes tipos de estudios y herramientas, siendo uno de gran relevancia la simulación de transitorios electromagnéticos, donde se puede analizar la operación detallada del sistema en sus señales eléctricas ante condiciones operativas como maniobras, fallas, etc. Para el desarrollo de esta actividad se cuenta con la herramienta de acceso abierto Electromagnetic Transient Program ATP-EMTP, la cual permite el modelado detallado en el dominio del tiempo de sistemas eléctricos de potencia [5]. El manejo del software se hace de forma gráfica y sencilla mediante la interfaz ATPDraw [6]. El software EMTP-ATP permite el

desarrollo de diversos tipos de estudios, por lo cual ha sido ampliamente usado para análisis de sistemas de generación distribuida [7], incluyendo el impacto de tecnologías de control de inversores del tipo grid-following y grid forming [8,9]. En [10] la consideran para el análisis de la respuesta dinámica de una microrred con energía solar, eólica e hidráulica. En [11] plantean el análisis de transitorios de sobre voltaje de una red de distribución en presencia de sistemas de generación distribuida incluyendo energía solar fotovoltaica, para la cual implementan un sistema basado en inversores monofásicos y un algoritmo MPPT desarrollado con la herramienta de EMTP-ATP TACS (Transients Analysis of Control Systems). De este modo se observa la relevancia del software dentro del análisis de sistemas de generación distribuida. Por otro lado, EMTP-ATP brinda modelos detallados de componentes básicos de sistemas eléctricos, pero no incluye modelos de paneles solares, baterías, entre otros; por lo cual la implementación de este tipo de componentes se debe desarrollar haciendo uso de herramientas de programación que dispone el software y componentes eléctricos básicos como fuentes de corriente, voltaje y componentes pasivos.

Así, éste trabajo plantea el modelado detallado de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica con seguimiento de punto de máxima potencia en presencia de un inversor centralizado trifásico, lo cual permite estudiar de manera precisa las señales eléctricas en diferentes condiciones de operación.

II. Sistema de generación fotovoltaico en ATP-EMTP

El sistema de generación solar fotovoltaica de esta propuesta incluye un conjunto de paneles solares fotovoltaicos denotado por un arreglo solar fotovoltaico, un bus de corriente continua (DC, por sus siglas en inglés Direct Current), un convertidor de DC a corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés Altern Current), y una etapa de filtrado para la conexión con la red eléctrica. El esquema general del sistema se muestra en la Fig. 1.

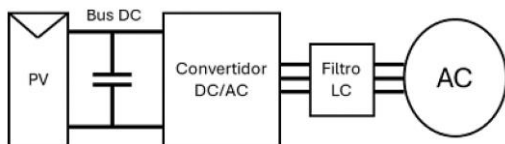


Fig. 1. Esquema general sistema de generación fotovoltaica.

La implementación del sistema fotovoltaico en EMTP-ATP se muestra en la Fig. 2, cuyos elementos se describen a continuación. donde el bloque denominado 'DET DC/AC' representa el inversor. En la Fig. 4 se ilustra la configuración del arreglo solar fotovoltaico, en el cual las fuentes de corriente son controladas por un bloque MODELS. La Fig. 10 presenta la implementación del algoritmo de control, donde una de sus entradas es la referencia de voltaje

proporcionada por el algoritmo MPPT, y la salida de control es el voltaje requerido en los terminales del inversor. El algoritmo MPPT se encuentra dentro del bloque MODELS llamado mpptvpv, cuyos detalles se explican en la sección Algoritmo MPPT.

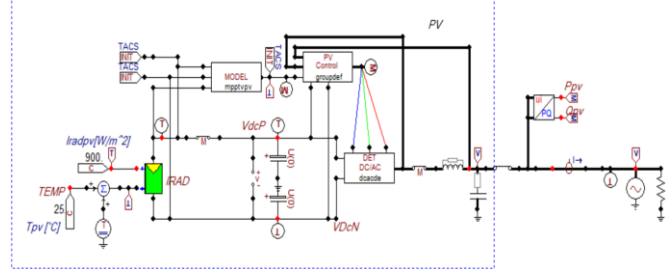


Fig. 2. Implementación en EMTP-ATP

A. Arreglo de paneles solares

El arreglo de paneles solares fotovoltaicos se modela mediante una fuente de corriente controlada como se presenta en la Fig. 3. La cual está gobernada por las Ec. (1) y Ec. (2). El modelo que se utiliza se adaptó del ejemplo 25 (PV interface with controls) de los incluidos por defecto con el software ATP-DRAW [5]. Este arreglo consta de una topología de que incluye 300 paneles solares los cuales están distribuidos de tal manera que se conectan 30 paneles en serie, este arreglo se repite 10 veces para ser conectados en paralelo. Cada panel solar cuenta con un valor nominal de voltaje de corto circuito de 36.8V y una corriente de corto circuito nominal de 8.2A de tal manera que el arreglo completo de paneles solares puede entregar un máximo de 90.528KW.

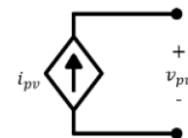


Fig. 3. Modelo del arreglo solar fotovoltaico.

La ecuación principal para calcular la corriente en función del voltaje se describe en la Ec. (1). Donde, I_{PV} es la corriente del panel en amperes, K_1 es la constante de ajuste para la corriente de cortocircuito, K_2 es la constante del modelo, V_{PV} es el voltaje en terminales del panel en voltios y E_M es el factor de idealidad. La corriente de cortocircuito ajustada por irradiancia se calcula utilizando la fórmula de la Ec. (2). Donde I_{SCG} es la corriente de cortocircuito ajustada por irradiancia en amperes, I_{SCO} es la corriente de cortocircuito ajustada a la temperatura en amperes y I_{RAD} es el Nivel de irradiancia en Watts por metro cuadrado. La implementación del arreglo solar fotovoltaico en el software se presenta en Fig. 4.

$$I_{PV} = I_{SCO} - I_{SCO} K_1 (\exp(K_2 V_{PV} E_M) - 1.0) \quad (1)$$

$$I_{SCG} = I_{SOG} I_{RAD} 1000 \quad (2)$$

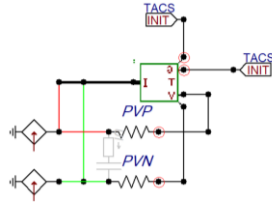


Fig. 4. Implementación del arreglo solar fotovoltaico.

B. Algoritmo MPPT

El algoritmo MPPT optimiza la extracción de potencia en sistemas fotovoltaicos mediante el ajuste dinámico del punto de operación del panel solar. La curva característica de potencia de un panel varía en función de la radiación solar y la temperatura, y el MPPT busca operar en el punto donde la potencia es máxima. En este trabajo, se está utilizando el método de perturbación y observación para implementar el MPPT. Este método ajusta la tensión del panel en función de la variación de la potencia medida, con el objetivo de encontrar el punto óptimo de máxima potencia. El método perturbación y observación se basa en observar las variaciones en la potencia y la tensión para realizar ajustes continuos, permitiendo que el sistema se adapte a las condiciones cambiantes y mejorando significativamente la eficiencia del sistema fotovoltaico. En la Fig. 5 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo perturbación y observación, que ilustra el proceso de ajuste de la tensión para alcanzar el punto de máxima potencia.

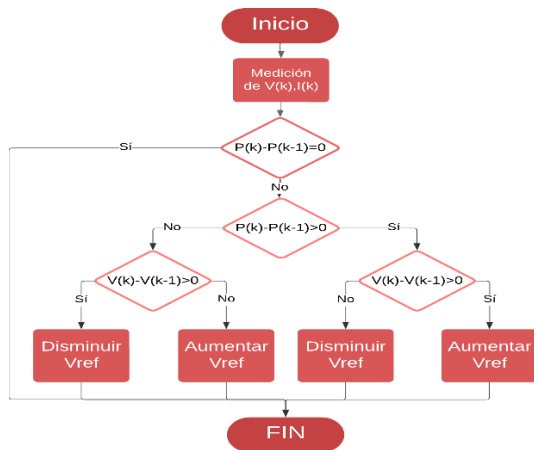


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT.

El bloque mpptvpv posee el contenido del algoritmo MPPT, y se encuentra ubicado entre el panel fotovoltaico y el bloque de control del arreglo del panel fotovoltaico como se presenta en la Fig. 6. El algoritmo MPPT manda la señal de voltaje de referencia de DC a la etapa de control para que ésta ajuste lo necesario y establezca el nivel de voltaje que

permita extraer la máxima potencia del arreglo solar fotovoltaico según las condiciones de operación

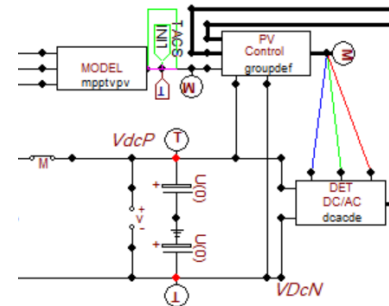


Fig. 6. Ubicación del bloque que contiene el algoritmo MPPT.

El código mostrado en el apéndice A presenta el algoritmo MPPT implementado.

C. Inversor

El inversor considerado para este trabajo corresponde a un inversor trifásico de 2 niveles, el cual opera cada una de sus fases de forma independiente bajo la técnica de modulación PWM. Los transistores de potencia se implementan mediante un interruptor ideal controlado por una señal TACS junto con un diodo en paralelo. De este modo el inversor es controlado por tres señales moduladoras para cada una de las masas

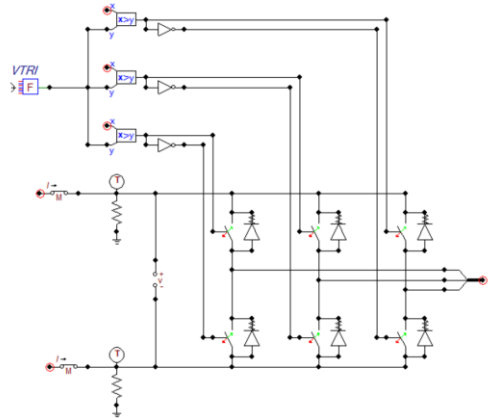


Fig. 7. Implementación de inversor trifásico de medio puente.

D. Control del sistema de generación

El control del sistema fotovoltaico se basa en regular el voltaje del bus de DC mediante un inversor que inyecta potencia activa controlada hacia la red eléctrica. Esta regulación establece un nivel de voltaje óptimo en el bus de DC para la extracción de la máxima potencia disponible del arreglo solar fotovoltaico. El esquema de control se implementa en el marco de referencia DQ0, lo que permite un manejo más preciso de las variables eléctricas del sistema. Para sincronizar el sistema con la red eléctrica, se utiliza un

lazo de seguimiento de fase [12] (PLL, por sus siglas en inglés), que asegura una correcta sincronización de fase durante la transformación a coordenadas DQ0.

El control del convertidor DC-AC requiere el modelado en el sistema de referencia DQ0, utilizando la transformación de PARK, lo cual demanda la obtención de una fase de referencia. Esta fase de la red eléctrica de corriente alterna se obtiene mediante el sistema PLL, como se ilustra en la Fig. 8 [6].

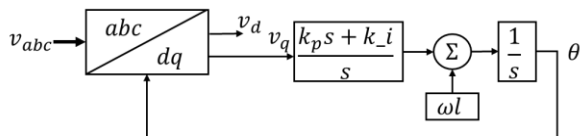


Fig. 8. Sistema PLL para el control del sistema.

Este control no solo ajusta el flujo de potencia activa hacia la red, sino que también administra las corrientes necesarias para regular la potencia reactiva. La potencia activa, clave para la operación eficiente del sistema, se define mediante un lazo de control adicional que ajusta el voltaje de máxima potencia del arreglo solar de acuerdo con las condiciones variables, como la radiación solar y la temperatura ambiental. De este modo, se asegura que el sistema funcione de manera estable y confiable.

El esquema completo de control, con sus lazos de regulación de potencia y el uso del PLL para la sincronización con la red, se presenta en la Fig. 9, donde se detallan las interacciones entre los diferentes componentes encargados de la regulación de energía. La implementación del esquema de control y del PLL en EMTP-ATP se desarrolla mediante elementos del tipo TACS, resultando en el modelo presentado en Fig. 10 [13].

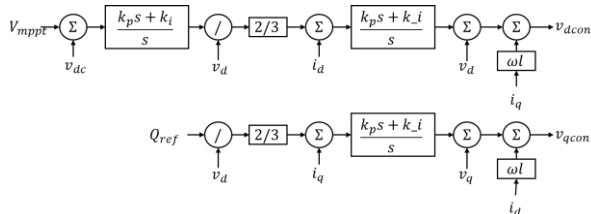


Fig. 9. Esquema de control sistema de energía solar fotovoltaica.

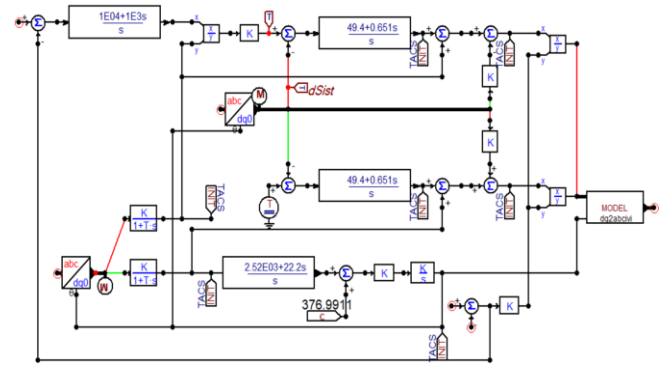


Fig. 10. Esquema de control del sistema solar fotovoltaico.

III. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación y simulación del sistema fotovoltaico modelado utilizando el software EMTP-ATP. Se analizará la capacidad del algoritmo MPPT para maximizar la producción energética bajo diversas condiciones operativas. Además, se evaluarán las respuestas del sistema a diferentes configuraciones y parámetros ambientales, tales como variaciones en la radiación solar y temperatura. Los resultados se ilustrarán mediante gráficos que mostrarán el rendimiento del arreglo fotovoltaico, la efectividad del control del inversor y el impacto de las estrategias de optimización implementadas. A través de este análisis, se pretende demostrar la efectividad de las técnicas desarrolladas para mejorar la eficiencia y estabilidad de los sistemas solares fotovoltaicos.

A continuación, se presenta un caso de prueba de 8 segundos de duración en el que la irradiancia se mantiene constante, mientras que la temperatura sufre un cambio abrupto, descendiendo de 25°C a 5°C durante los segundos 2 a 4 de la simulación como se muestra en la Fig. 11

Tras realizar la simulación del sistema con la perturbación en la temperatura, se obtuvo un incremento en la potencia activa como se muestra en la Fig. 12 en donde la señal de potencia activa (identificada como PPV) se indica con color azul (en KW) y la señal de potencia reactiva (identificada como QPV) se indica con rojo (en KVARs), además, este cambio en la magnitud de la potencia activa tuvo una duración igual a la duración de la perturbación como se presenta en la Fig. 20 en donde se puede apreciar que mientras la temperatura (roja) tuvo una disminución de 20°C la potencia (azul) activa se incrementó en aproximadamente 10 KW.

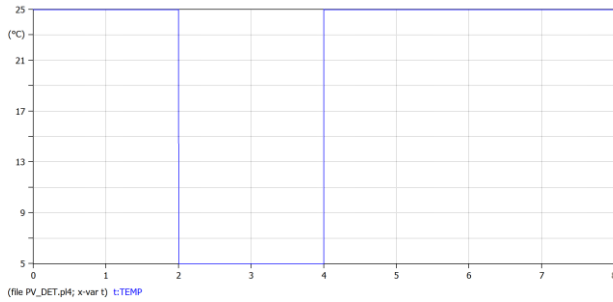


Fig. 11. Perfil de temperatura.

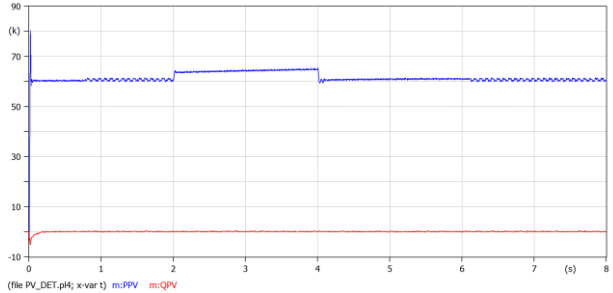


Fig. 12. Potencia activa y reactiva suministradas por el panel solar (Potencia activa en WATT azul, potencia reactiva en VAR roja)

El perfil de voltaje en el bus de DC, mostrado en la Fig. 13, presenta un comportamiento incremental debido a la naturaleza del panel solar, hasta alcanzar un punto de estabilidad. Posteriormente, cuando ocurre la perturbación de temperatura, el voltaje comienza a elevarse nuevamente. Este comportamiento relacionado con la temperatura se puede observar claramente en la Fig. 19, donde se aprecia cómo el voltaje aumenta en respuesta al cambio de temperatura. El voltaje alcanza su valor máximo al finalizar la perturbación de temperatura, y a partir de ese punto comienza a disminuir. Este voltaje es controlado por el voltaje de referencia del algoritmo MPPT, como se muestra en la Fig. 14. La Fig. 15 presenta un fragmento del voltaje del bus de DC (en azul), superpuesto a la señal de referencia del MPPT (en rojo), donde se observa cómo el voltaje de DC se acopla a la señal de referencia.

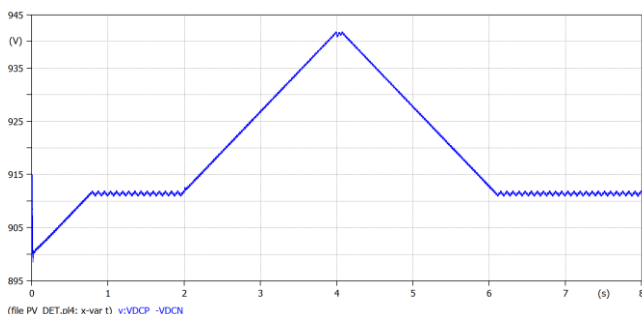


Fig. 13. Voltaje en terminales de bus de DC en Volts.

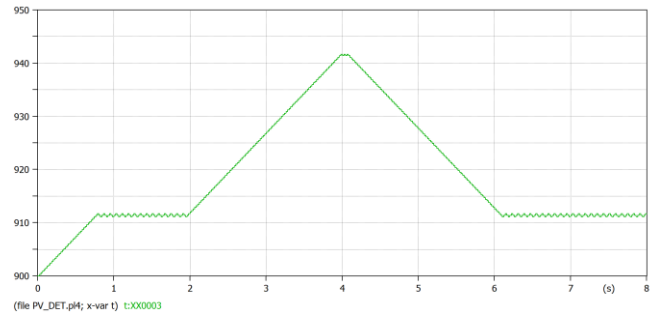


Fig. 14. Voltaje de referencia MPPT.

La corriente de AC entregada por el sistema a la salida del inversor también se ve comprometida por la perturbación ambiental, como se muestra en la Fig. 16, donde se observa un pequeño incremento en su magnitud. Este efecto es más evidente hacia el final de la perturbación, ya que, una vez finalizada, la corriente adquiere un comportamiento estable.

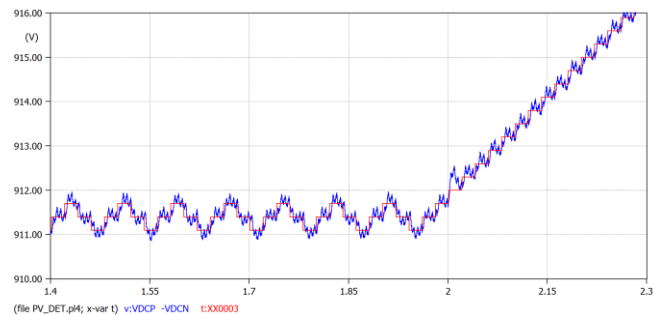


Fig. 15. Seguimiento del voltaje del bus de DC a voltaje de referencia MPPT.

La corriente de AC entregada por el sistema a la salida del inversor también se ve comprometida por la perturbación ambiental, como se muestra en la Fig. 16, donde se observa un pequeño incremento en su magnitud. Este efecto es más evidente hacia el final de la perturbación, ya que, una vez finalizada, la corriente adquiere un comportamiento más estable.

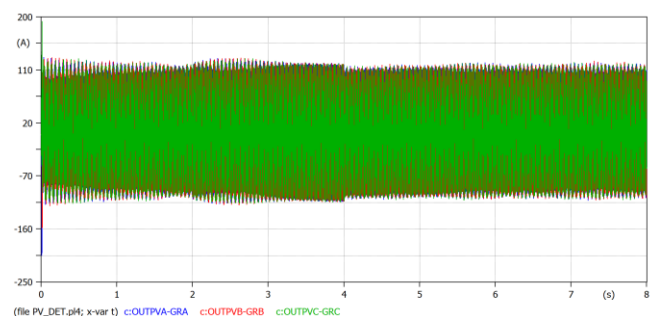


Fig.16. Comportamiento de la corriente trifásica suministrada por el sistema de generación fotovoltaica.

El sistema de control utiliza un marco de referencia DQ0, en el cual la componente D es de especial interés. En la Fig. 17 se muestran las componentes D de referencia (en azul) y la componente D del sistema (en rojo). Se observa que ambas siguen un comportamiento similar, elevándose en respuesta

al aumento de temperatura. La Fig. 18 presenta un fragmento de estas componentes, donde se aprecia cómo la componente D del sistema se acopla al comportamiento de la componente D de referencia.

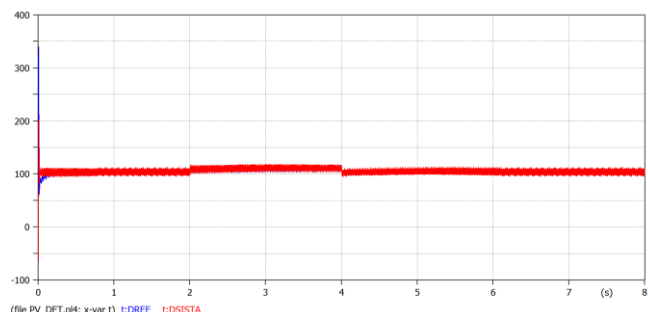


Fig. 17. Comportamiento de la componente D del sistema y de referencia (Corriente de referencia azul y corriente medida roja, las dos en amperes).

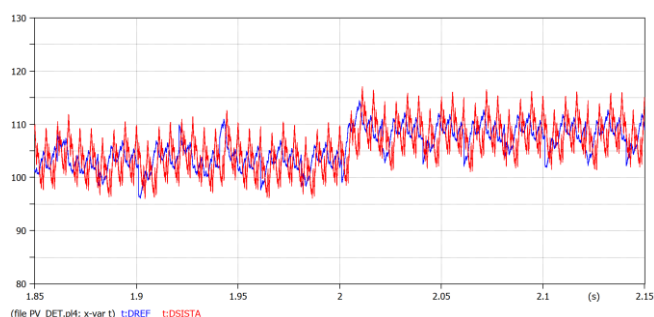


Fig. 18. Seguimiento de componente D del sistema a la componente D de referencia.

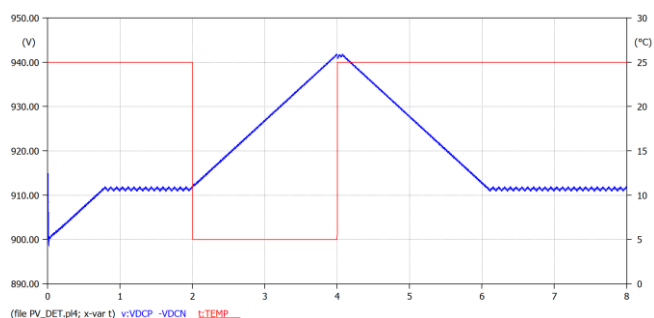


Fig. 19. Comportamiento del voltaje en bus de DC en respuesta a la perturbación de temperatura.

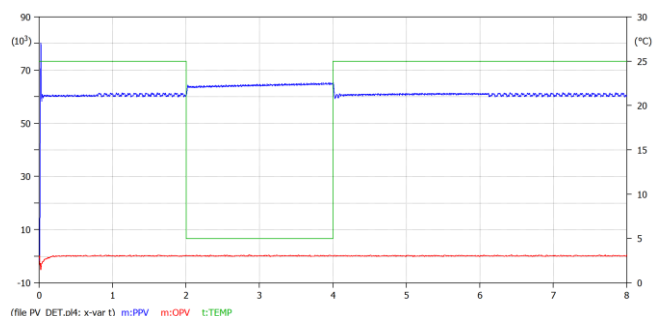


Fig. 20. Comportamiento de potencia activa y reactiva en respuesta a perturbación de la temperatura.

IV. Conclusiones

La simulación demuestra que el algoritmo MPPT desempeña un papel crucial en la estabilidad del sistema fotovoltaico frente a perturbaciones de temperatura. Durante el descenso de 20°C, la potencia activa se incrementó en aproximadamente 10 KW, y el voltaje en el bus de DC presentó un comportamiento estable, controlado eficientemente por el MPPT, que ajustó el voltaje de referencia para maximizar la potencia, tal como se muestra en las Fig. 12 y 14.

El voltaje del bus de DC, tras una elevación causada por la perturbación, se acopló perfectamente a la señal de referencia controlada por el MPPT, asegurando una operación continua y optimizada del sistema (Fig. 15). A su vez, el aumento de corriente en la salida del inversor mostró que, aunque hubo un impacto transitorio debido a la perturbación ambiental, el MPPT logró estabilizar el sistema rápidamente.

Finalmente, el MPPT garantiza la maximización de la potencia y el control preciso del voltaje bajo condiciones variables, minimizando los efectos negativos de las perturbaciones y asegurando una operación estable y eficiente del sistema fotovoltaico.

REFERENCIAS

- [1] IEA (2024), Electricity 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>, Licence: CC BY 4.0
- [2] IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf
- [3] Tiwari, G. N., and Swapnil Dubey. 2010. Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications. Cambridge: Royal Society of Chemistry. <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=49973>.
- [4] C. Deline, "Inverters, Power Optimizers, and Microinverters," in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed., A. Luque and S. Hegedus, Eds. Wiley, 2016, pp. 530-538. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118927496.ch47>
- [5] European EMTP Users Group EEUG. The electromagnetic transient program ATP-EMTP. Recuperado el 10 de 07 de 2024, de <https://atp-emtp.org/index.php>.
- [6] Høidalen, H. K. (2012). ATPDraw Graphical preprocessor to ATP Electromagnetic transients program. Recuperado el 10 de 07 de 2024, de <https://www.atpdraw.net/information.php>
- [7] A. Engler, "Modelling of Distributed Energy Resources with ATP-EMTP," en *European ATP-EMTP Users Group Meeting and Conference*, 12-14 Sept. 2005, Varsovia, Polonia.
- [8] R. Musca, G. Zizzo and A. Manunza, "Grid-Following and Grid-Forming MODELS in ATP-EMTP for Power Systems Simulation," *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Rome, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT56783.2022.9951732.
- [9] M. B. Luchini, O. E. Batista, F. V. Lopes, R. L. A. Reis, y B. A. Souza, "Equivalent grid-following inverter-based generator model for ATP/ATPDraw simulations," *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109624, 2023. doi: 10.1016/j.epsr.2023.109624.
- [10] Lin, Y., Sun, H. B., Song, X. R., and Li, L. C. 2012. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP. *Renewable Energy* 39 (1): 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.018>.
- [11] Awad, E.A. and Badran, E.A. (2020), Mitigation of transient overvoltages in microgrid including PV arrays. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 14: 2959-2967. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1035>



- [12] Karimi-Ghartema, M. (2014). Synchronous Reference Frame PLL. En Enhanced Phase-Locked Loop Structures for Power and Energy Applications (págs. 133-145). doi:10.1002/9781118795187.ch6
- [13] J. M. Uribe Jaime, Z. E. Ramírez Caudillo, A. G. Martínez Oñate, O. O. Girón Zavala, C. D. Saucedo Prieto, J. P. Castañeda Ramírez, y L. R. Merchan Villalba, "Diseño e implementación de una microrred en EMTP-ATP para el análisis de transitorios electromagnéticos," *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 28, p. 14, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4519/3996>

ENDEXEC
ENDMODEL

Apéndices

Apéndice A

Código MPPT

```
MODEL MpptVpv -- Simple MPPT algorithm + Inverter control for PV
CONST SQR3 {VAL: 1.732050808}, Twop {VAL: 6.28318531}
DATA Ton {dflt: 0.020} -- time for inverter start-up, in sec
      Tmppt {dflt: 0.005} -- cycle period for MPPT, in sec
      DeltaV {dflt: 1.0} -- Voltage step in volts
      Vmpptini {dflt: 1.0} -- Vmppt initial
INPUT DCP, DCN, IDC
OUTPUT Vmppt
VAR Vmppt, PPVR, PPVF, Tmpp, TCIC, VmpNe, VmpOl, Flag, POLD,
      Tmpp, Vdc, IDC1
HISTORY PPVF {dflt: 0.0}, TCIC {dflt: 0.0}, VmpNe {dflt: Vmpptini},
      VmpOl {dflt: 0.0}
POLD {dflt: 0.0}--, IACI {dflt: 0.0}
INIT
  Tmpp := 0.01
  Flag := 0.0
ENDINIT
EXEC
  IDC1 := IDC
  Vdc := (DCP - DCN)
  PPVR := Vdc * IDC
  CLAPLACE(PPVF/PPVR) := (1/s0)/(1/s0+Tmpp/s1)
  -- PV Maximum Power Point Tracking
  If T> Ton Then
    TCIC := TCIC + Timestep
    If TCIC>=Tmpppt Then
      If POLD>=PPVF Then
        If VmpNe>=VmpOl Then
          Flag:= DeltaV
        else
          Flag:=-DeltaV
        Endif
      else
        If VmpNe>=VmpOl Then
          Flag:=-DeltaV
        else
          Flag:= DeltaV
        Endif
      Endif
      POLD := PPVF
      VmpOl := VmpNe
      VmpNe := VmpNe-Flag
      TCIC := 0.0
    Endif
  EndIf
Vmppt := VmpNe
```

BIOGRAFÍAS



Juan Manuel Cano Gallardo Recibió el título de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en el año 2022 por parte de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la electrónica de potencia, las energías renovables, las microrredes y el diseño de máquinas eléctricas.



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.



Arturo García-Pérez recibió los títulos de B.E. y M.E. en electrónica de la Universidad de Guanajuato, México, y el doctorado en ingeniería eléctrica de la Universidad de Texas, Dallas, EE. UU. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Guanajuato. Es miembro senior del IEEE e investigador nacional nivel 3 por CONAHCYT. Sus campos de interés incluyen el procesamiento digital de señales, el monitoreo e identificación de fallas eléctricas en máquinas eléctricas y las perturbaciones en la calidad de la energía.



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



Simulación y Análisis de un Sistema Eléctrico que Incorpora un Inversor Formador de Red ("Grid Forming")

YANNICK GARCIA ZEPEDA, OSVALDO RODRIGUEZ VILLALON, HECTOR JAVIER ESTRADA GARCIA

Universidad de Guanajuato, División de Ingeniería Campus Salamanca Irapuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica

y.garciazepeda@ugto.mx

osvaldo@ugto.mx

hestrada@ugto.mx

RESUMEN En este artículo, se presenta una simulación de un inversor formador de red (GFMI) utilizando la herramienta SIMULINK. El objetivo principal es analizar el comportamiento del GFMI tanto en condiciones estables como en situaciones anómalas, tales como fallas en la red o variaciones en la carga. Además, el artículo ofrece una explicación detallada sobre qué es un inversor formador de red y destaca su importancia en la implementación dentro de las redes eléctricas

PALABRAS CLAVE — Formato, estilo, documento.

I. INTRODUCCIÓN

En la transición hacia redes eléctricas más sostenibles, la integración de energías renovables ha emergido como una estrategia clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar las fuentes de energía. Sin embargo, esta transición también plantea desafíos significativos en términos de estabilidad y confiabilidad de la red. Tradicionalmente, las máquinas síncronas han desempeñado un papel crucial como generadores de energía, proporcionando estabilidad mediante su capacidad de inercia física y su respuesta a disturbios en la red [2] [3] [4] [6] [8]. Con el aumento de la penetración de recursos energéticos distribuidos (DER) renovables, como los paneles solares y las turbinas eólicas, surge la necesidad de tecnologías que puedan emular estas funciones críticas de las máquinas síncronas.

Los inversores formadores de red (GFMI) han surgido como una solución prometedora para enfrentar estos desafíos. Los GFMI están diseñados para proporcionar servicios adicionales que ayudan a mantener la estabilidad de la red en condiciones de operación normales y anómalas [2] [3] [4] [7] [8]. Estos inversores tienen la capacidad de equilibrar las cargas, proporcionar soporte en caso de caídas de tensión o frecuencia, emulando así el comportamiento de las máquinas síncronas [3] [4] [5] [6].

El papel de los GFMI se vuelve especialmente crucial cuando se consideran los diversos disturbios que pueden afectar a la red eléctrica, como fallas en la generación, fluctuaciones en la carga o eventos inesperados en el sistema. La capacidad de los GFMI para manejar estos disturbios es fundamental para garantizar una transición fluida hacia una

red eléctrica dominada por energías renovables. Al hacerlo, no solo se preserva la estabilidad de la red, sino que también se optimiza el uso de las fuentes de energía renovables, maximizando su impacto positivo en el medio ambiente y en la eficiencia del sistema eléctrico.

Este artículo explora la importancia de los GFMI en el contexto de una red eléctrica moderna, analizando su capacidad para reemplazar las funciones tradicionales de las máquinas síncronas y gestionando los diversos disturbios que pueden presentarse en la red [3] [5] [6] [7] [8]. A través de simulaciones y estudios de caso, se busca destacar cómo los GFMI pueden ofrecer una respuesta efectiva a los desafíos emergentes y contribuir a una integración más robusta y confiable de las energías renovables en la red eléctrica.

A su vez, para evaluar la capacidad de los GFMI en este contexto, se ha desarrollado una simulación utilizando la herramienta SIMULINK de MATLAB, siguiendo un modelo propuesto en la referencia [1] a través de diagramas de control establecidos, así como el planteamiento de un sistema de potencia máquina-bus infinito.

Este diagrama proporciona una base sólida para modelar y analizar el comportamiento del GFMI en diferentes condiciones operativas [8]. A través de esta simulación, se pretende destacar cómo los GFMI pueden imitar eficazmente las funciones de las máquinas síncronas y ofrecer una respuesta robusta a los disturbios en la red.

La Fig. 1 muestra el esquema de referencia utilizado para el desarrollo y explicación del inversor formador de red (GFMI) simulado. Este esquema sirvió como base para definir la estructura del sistema, los componentes

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024

involucrados y las interacciones entre ellos, facilitando así el análisis y la implementación de los algoritmos de control utilizados en la simulación.

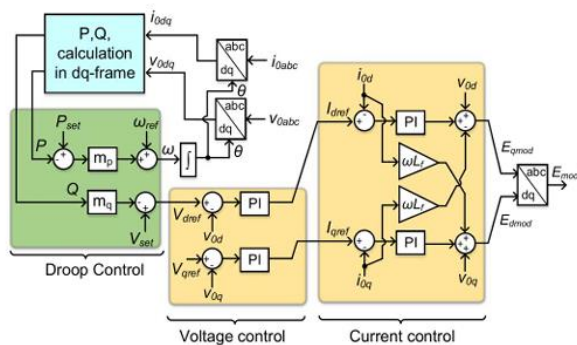


Fig. 1. Modelo de referencia [1]

II. Aspectos Generales del GFMI

El inversor formador de red (GFMI) desempeña un papel fundamental en la integración de energías renovables en la red eléctrica, ofreciendo una alternativa viable a las máquinas síncronas tradicionales. Su principal objetivo es gestionar la conversión de la energía generada por fuentes renovables, como la solar o la eólica, y su inyección a la red eléctrica de manera eficiente y estable [3] [4] [6] [7].

Uno de los aspectos más destacados del GFMI es su capacidad para implementar controles de voltaje y frecuencia. A través de estos controles, el inversor puede regular la tensión y la frecuencia de la red [5], asegurando que se mantengan dentro de los límites operativos deseados. Esto es especialmente importante en un entorno donde las energías renovables pueden ser intermitentes y variables, requiriendo un control preciso para mantener la estabilidad del sistema [2].

La estabilidad transitoria es otro aspecto crítico del GFMI. En situaciones de perturbaciones, como cortocircuitos o cambios repentinos en la carga, el inversor debe ser capaz de responder rápidamente para evitar caídas en la frecuencia o fluctuaciones de voltaje que puedan comprometer la integridad de la red. La capacidad de reaccionar eficazmente ante estas situaciones es esencial para garantizar un suministro eléctrico confiable y seguro [3] [4] [6].

Además, la implementación del GFMI en microrredes ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad del sistema eléctrico. En una microrred, el GFMI puede operar de manera autónoma o en paralelo con la red principal, gestionando la generación y el consumo local de energía [2]. Esto permite una mayor integración de recursos renovables, favoreciendo la autonomía energética y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

En resumen, el inversor formador de red no solo facilita la integración de energías renovables en la red eléctrica, sino

que también ofrece soluciones avanzadas de control y estabilidad, contribuyendo significativamente a la evolución de los sistemas eléctricos modernos y su transición hacia un futuro más sostenible [7].

III. Modelo del GFMI

En el modelo de control de la simulación del GFMI que se muestra en la Fig. 2. [1], es esencial convertir los componentes en coordenadas de operación natural abc tanto de voltaje como de corriente a componentes $dq0$ a través de la transformación de Park. Para ello se utiliza un lazo de retroalimentación que actualiza el ángulo θ necesario para que el bloque abc to $dq0$ realice la transformación que a su vez permite el cálculo de las potencias activa P y reactiva Q . Esta conversión permite el seguimiento en tiempo real a través del *droop-control*, que gestiona el control de estatismo y constituye un elemento clave del esquema de control para inversor. La potencia activa se regula mediante la frecuencia, mientras que la potencia reactiva se controla ajustando la amplitud del voltaje [1].

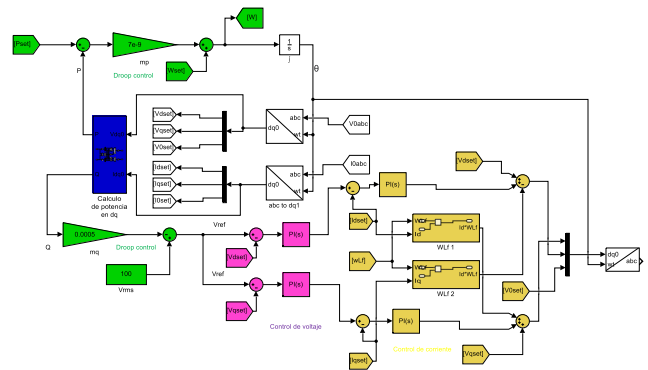


Fig. 2. Esquema de control del inversor formador de red (GFMI) [1]

El control de caída o *droop control* es un método comúnmente utilizado en sistemas eléctricos para regular la frecuencia y la tensión en sistemas de generación distribuida o microrredes. Su principio se basa en ajustar la potencia activa y reactiva de los generadores en función de las desviaciones en la frecuencia y la tensión del sistema. En términos sencillos, cuando la carga aumenta, la frecuencia del sistema tiende a disminuir; el droop control ajusta automáticamente la potencia generada para restablecer el equilibrio sin necesidad de comunicación centralizada entre generadores. Es una estrategia robusta y eficiente, especialmente en escenarios donde se requiere operar múltiples fuentes de generación de manera coordinada.

El droop-control es esencial para ajustar la frecuencia mediante la regulación de la potencia real, la cual proporciona retroalimentación como se muestra en la Fig. 3. Esta retroalimentación facilita la adaptación y el ajuste de los componentes del sistema. En el esquema de droop-control

que se muestra en la Fig. 4, se proporciona la referencia de componentes (V_{ref}) para regular el voltaje correspondiente, lo cual es esencial para el funcionamiento adecuado del control de voltaje. Las salidas de los controladores de voltaje PI se utilizan como referencia para el control de la corriente [1].

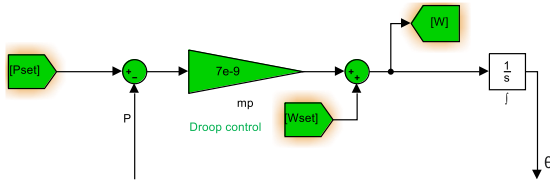


Fig. 3. Esquema de control del droop-control

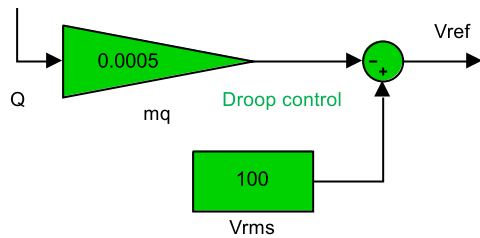


Fig. 4. Esquema de control del droop-control

La implementación del control de voltaje y el control de corriente en la simulación se muestra en la Fig. 5. Este se basa en el uso de componentes de referencia en el sistema en coordenadas $dq0$.

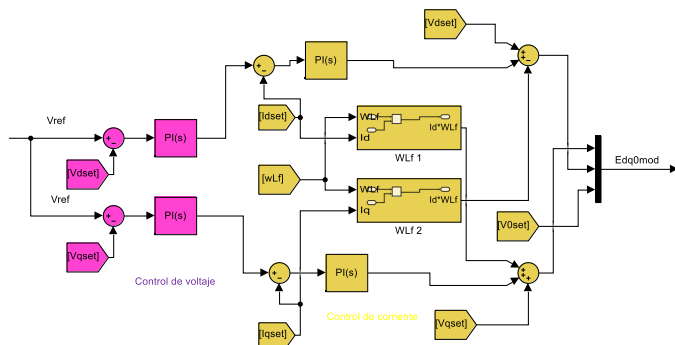


Fig. 5. Esquema de control de voltaje y corriente

En el caso del control de voltaje, se utilizan las referencias obtenidas de las transformaciones $dq0$ para ajustar el voltaje del sistema. Un controlador PI recibe estas referencias y las compara con las mediciones del voltaje real, ajustando las salidas del inversor para mantener el voltaje dentro de los límites deseados. Este enfoque permite una regulación más efectiva y rápida, adaptándose a las variaciones en la carga [1].

Por otro lado, el control de corriente se basa también en las componentes $dq0$. Las referencias de voltaje generadas por el controlador de voltaje se utilizan para establecer objetivos de corriente en el inversor. Un controlador PI ajusta las señales de control, asegurando que el inversor responda adecuadamente a las variaciones de carga y mantenga la estabilidad del sistema. Esta implementación en el sistema $dq0$ simplifica el control al reducir el número de variables a gestionar, mejorando la eficacia y el rendimiento del sistema.

Finalmente, es fundamental combinar los lazos de control para realizar la conversión de componentes $dq0$ a componentes abc .

IV. Modelo matemático del GFMI

A. Cálculo de la potencia

Las tensiones V_{abc} y las corrientes I_{abc} trifásicas de salida del inversor, expresadas en coordenadas estacionarias abc , se pueden transformar a un sistema de referencia rotativo de cuadratura directa $d-q$ mediante la transformación de Park. Los componentes $d-q$ de la tensión y la corriente resultantes se utilizan como señales de entrada en el bloque de cálculo de potencia, donde es posible determinar la potencia activa P y la potencia reactiva Q de acuerdo con las correspondientes ecuaciones de potencia [9].

$$P = \frac{3}{2} [V_{0d} I_{0d} + V_{0q} I_{0q}] \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2} [-V_{0d} I_{0q} + V_{0q} I_{0d}] \quad (2)$$

donde V_{0d} , I_{0d} son las componentes de tensión y corriente del eje d ; V_{0q} , I_{0q} son las componentes de tensión y corriente del eje q .

B. Droop control

El flujo de potencia activa P y reactiva Q en la red de BT puede expresarse mediante las ecuaciones siguientes considerando que la red es mayormente inductiva [9],

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_1 V_2 \cos \theta - V_1^2}{X} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la expresión de las ecuaciones de flujo de potencia en las ecuaciones anteriores, las estrategias del *droop control* de potencia en la red de BT pueden expresarse según las ecuaciones.

$$V_{ref} = V_{set} - m_p Q \quad (5)$$

$$w = w_{set} + m_p(P_{set} - P) \quad (6)$$

donde P y Q son la potencia activa y reactiva reales; P_{set} es la potencia activa nominal; w_{set} y V_{set} son el valor nominal de la frecuencia angular en rad/seg y la amplitud de tensión en la red, respectivamente; w y V_{ref} son la referencia de entrada de la frecuencia angular y la magnitud de tensión respectivamente; m_p y m_q son los coeficientes de estatismo de la potencia activa y reactiva.

C. Control de voltaje y corriente

El lazo de control de tensión proporcional-integral (PI) genera señales de corriente de referencia d - q de salida (I_{dref} , I_{qref}) mientras compara la señal de referencia de tensión modificada con los componentes de tensión d - q reales (V_{dset} , V_{qset}) en el lado de entrada.

Como configuración de control del lazo de control de tensión que se utilizó en este modelo, los componentes d - q de la corriente de referencia (I_{dref} , I_{qref}) pueden expresarse según las ecuaciones [9].

$$I_{dref} = \left[k_p + \frac{k_i}{s} \right] (V_{ref} - V_{dref}) \quad (7)$$

$$I_{qref} = \left[k_p + \frac{k_i}{s} \right] (V_{ref} - V_{qref}) \quad (8)$$

donde V_{dref} y V_{qref} son las componentes de tensión real del eje d y del eje q ; I_d e I_{dref} son las componentes de corriente real y de referencia del inversor del eje d ; I_q e I_{qref} son las componentes de corriente real y de referencia del inversor del eje q ; k_p y k_i son las ganancias proporcional e integral del controlador PI que para esta simulación se les dio un valor de 1.

El lazo de control de corriente basado en PI genera una señal de tensión de salida (E_{dmod} , E_{qmod}) en forma d - q que se utiliza como tensión de referencia para el bloque de modulación por ancho de pulsos (PWM) del inversor. Las ecuaciones de tensión del inversor en forma d - q pueden escribirse según las siguientes ecuaciones [9],

$$E_{dmod} = V_{dset} - I_{qset}\omega L_f + \left[k_p + \frac{k_i}{s} \right] (I_{dref} - I_{dset}) \quad (9)$$

$$E_{qmod} = V_{qset} + I_{dset}\omega L_f + \left[k_p + \frac{k_i}{s} \right] (I_{qref} - I_{qset}) \quad (10)$$

donde E_{dmod} y E_{qmod} son la señal de tensión de salida en forma d - q ; ω es la frecuencia angular de la red; L_f es la inductancia; V_{dset} es la componente de tensión del eje d ; V_{qset} es la componente de tensión del eje q ; I_{dset} e I_{dref} son la componente de corriente real y de referencia del eje d ; I_{qset} e I_{qref} son la componente de corriente real y de referencia del eje q ; k_p y k_i que para esta simulación se les dio un valor de 1.

V. Simulación de una red con GFMI

Para evaluar el desempeño de los inversores formadores de red, se llevaron a cabo simulaciones destinadas a replicar las condiciones reales a las que estos dispositivos están sometidos en una red eléctrica. En estas simulaciones, se modeló un sistema eléctrico máquina-bus infinito como se muestra en la Fig. 6 que imita las características y comportamiento de un sistema eléctrico real, incluyendo factores como la variabilidad en la carga, las fluctuaciones en la generación de energía y las interacciones entre múltiples inversores. Este enfoque permitió observar cómo los inversores responden a diferentes condiciones operativas y cómo se comportan en presencia de perturbaciones y cambios en la red.

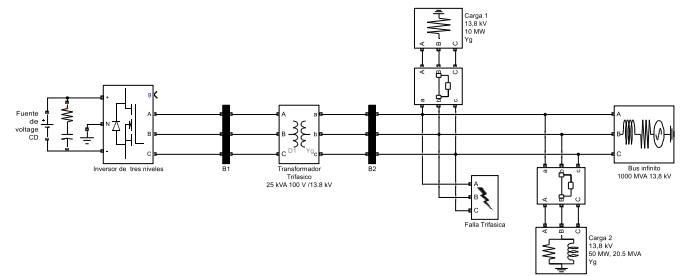


Fig. 6. Esquema de la red eléctrica

La simulación se estructura en torno a una fuente de voltaje de CD de 100 V, que simula una fuente de energía renovable en el sistema. Esta fuente está conectada a un inversor, cuyo nivel de voltaje en su salida es de $100V_{rms}$ y se conecta a un transformador para elevar el nivel de voltaje del inversor a 13.8 kV, lo cual es adecuado para su integración en la red eléctrica convencional.

El circuito de electrónica de potencia del inversor está compuesto por MOSFETs y diodos. Los MOSFETs y diodos son fundamentales para la conversión eficiente de energía, gestionando la conmutación y rectificación durante el proceso. El control del inversor se realiza mediante modulación por ancho de pulso (PWM), implementada a través del bloque PWM Generator (3-Level) de Simulink. Este bloque genera las señales de control para convertidores basados en modulación PWM con una topología de tres niveles, permitiendo el control de dispositivos de conmutación como FET, GTO o IGBT. Además, es compatible con tres tipos de convertidores: puente medio monofásico, puente completo monofásico y puente trifásico.

Además, el inversor está diseñado para recibir la señal proveniente del GFMI, el cual controla los dispositivos de electrónica de potencia mediante pulsos, regulando así la operación del inversor. En esta configuración, el GFMI ajusta

la modulación de los pulsos para gestionar el desempeño del inversor, permitiendo una operación precisa y eficiente del sistema simulado. Este enfoque facilita la evaluación del comportamiento del inversor bajo condiciones de funcionamiento que replican el entorno de una red eléctrica real.

En la simulación, se ha incorporado un transformador a la salida de las terminales de voltaje del inversor para ajustar y regular el voltaje generado. Este transformador tiene la función de elevar o reducir el voltaje a niveles que coincidan con los de una red eléctrica convencional.

El uso del transformador (25 kVA 100 V /13.8 kV) que tienes los valores de impedancia que se muestra en la Fig. 7, es esencial para garantizar que el voltaje producido por el inversor sea compatible con los estándares de la red eléctrica, facilitando así la integración del sistema de energía renovable con la red existente. Al adaptar el voltaje a los niveles convencionales, el transformador asegura que la energía suministrada pueda ser utilizada de manera efectiva y segura en el sistema eléctrico general.

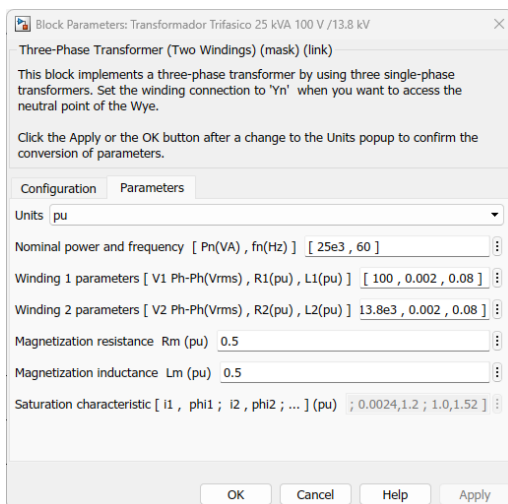


Fig. 7. Valores de impedancia del Transformador (25 kVA, 100 V /13.8 kV)

Finalmente, en la simulación se añadieron elementos adicionales para replicar de manera más precisa las condiciones comunes de una red eléctrica. Se incorporó una carga al sistema, que permite analizar cómo el inversor y el resto del sistema responden a las demandas energéticas y variaciones en la carga. Esto es crucial para evaluar el rendimiento del sistema bajo condiciones de operación realistas.

Además, se simuló una falla en el sistema para estudiar cómo el inversor formador de red responde ante perturbaciones y situaciones anómalas. La inclusión de una falla ayuda a evaluar la capacidad del sistema para mantener la estabilidad y la integridad operativa en presencia de problemas.

Finalmente, el hecho de que sea un sistema conectado a un bus infinito, que representa una fuente de energía con capacidad ilimitada en la simulación, significa que este actúa como una referencia estable para el sistema, ayudando a analizar el comportamiento del inversor y la red bajo condiciones de suministro ininterrumpido y estable.

Estos elementos combinados permiten una evaluación global del sistema, proporcionando una visión detallada de su desempeño en condiciones normales y en situaciones de falla, y asegurando que el sistema pueda operar de manera segura y eficiente en un entorno de red eléctrica real.

VI. Escenarios simulados

En la simulación desarrollada, se han aplicado diversos escenarios para replicar las condiciones comunes de una red eléctrica y evaluar el comportamiento de los diferentes parámetros que la componen. La simulación busca emular de manera realista el entorno de una red eléctrica, incorporando elementos como cargas variables, fallas y una fuente de energía estable, para observar cómo el sistema responde a situaciones típicas y perturbaciones. Al igualar las condiciones de operación de la red eléctrica, se pretende analizar el desempeño del sistema, identificar posibles áreas de mejora y asegurar que todos los componentes interactúen de manera efectiva bajo diversas circunstancias.

A. Sistema operando en estado estable

Se simuló el sistema de la red eléctrica con un inversor formador de red (GFMI) estableciendo un escenario de operación de estado estable, en el cual las condiciones operativas no sufren ningún tipo de perturbación. Este escenario representa el estado ideal en el que el sistema funcionaría la mayor parte del tiempo, asegurando un rendimiento óptimo y predecible.

En esta configuración de estado estable, el GFMI opera bajo condiciones constantes de carga y generación, permitiendo un análisis claro del comportamiento del sistema. En la Fig. 8 se presentan las formas de onda del voltaje en terminales del inversor, donde es posible observar un ligero transitorio numérico inicial que eventualmente desaparece alcanzando la operación de estado estable sinusoidal, el cual es el objetivo de este primer experimento. Este estado de operación se demuestra en la Fig. 9, para el cual el sistema formador de red opera en condiciones de estado estable.

En la Fig. 10 se observa la forma de onda de la frecuencia producida a la salida del inversor. Puede observarse que se mantienen dentro del margen de la frecuencia de operación de 60 Hz, lo cual se traduce en que los controles de voltaje y frecuencia responden adecuadamente a las referencias

establecidas. Este escenario trata de demostrar que el inversor mantiene la operación en estado estable del sistema en condiciones normales y es un escenario que sirve como base para futuras simulaciones que incluyan perturbaciones y variaciones en la red.

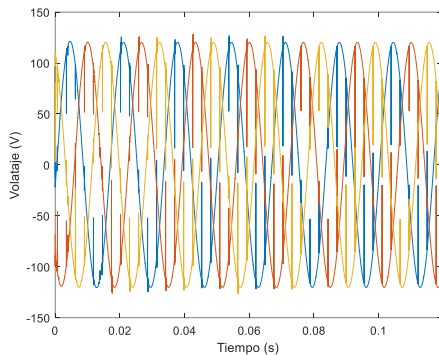


Fig. 8. Voltaje en la salida del inversor al inicio de la simulación en estado estable

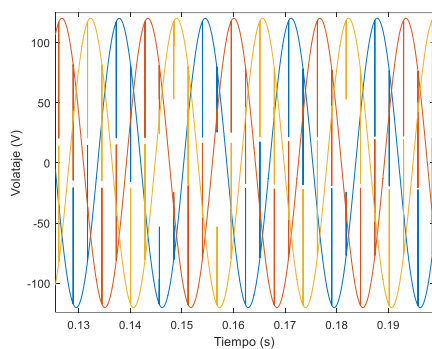


Fig. 9. Voltaje en la salida del inversor en estado estable

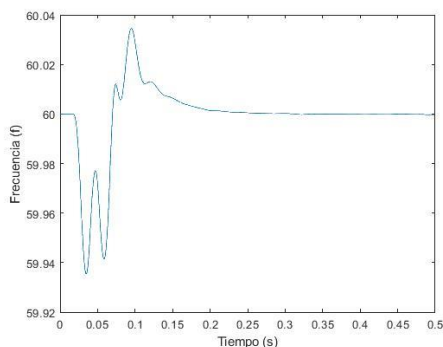


Fig. 10. Frecuencia en la salida del inversor en estado estable.

B. Cambio en la carga

Ahora, el sistema de la red eléctrica con el inversor formador de red (GFMI) se simula estableciendo un escenario en el que se conecta y desconecta carga de manera

controlada. Este enfoque permite observar el comportamiento de la frecuencia en la salida del inversor bajo condiciones dinámicas.

Durante la simulación, al conectar una carga, el sistema enfrenta un cambio en la demanda de potencia, lo que puede provocar cambios en la frecuencia como se muestra en la Fig. 11. Por otro lado, al desconectar la carga, la reducción de la demanda puede causar un aumento en la frecuencia. Al monitorear estos cambios, se puede analizar cómo el GFMI responde a las variaciones en la carga, ajustando su salida para mantener la frecuencia dentro de límites aceptables.

La simulación tuvo una duración de 2 segundos, durante la cual se realizaron conexiones y desconexiones de carga para analizar el comportamiento de la frecuencia en la salida del inversor formador de red (GFMI). En este contexto, la Carga 1 se conecta a los 0.5 segundos, lo que genera un incremento en la demanda de potencia y, potencialmente, una caída en la frecuencia.

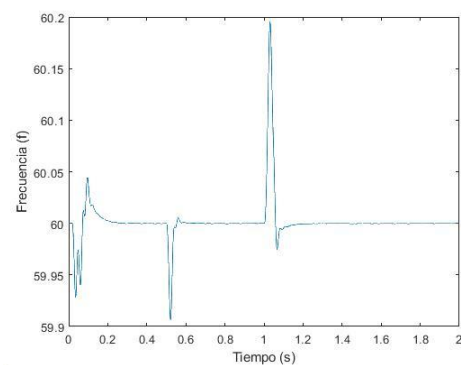


Fig. 11. Frecuencia en la salida del inversor cambiando la carga.

Posteriormente, al instante de tiempo de 1 segundo, la Carga 2 se desconecta, lo que provoca una disminución en la demanda de potencia y puede resultar en un aumento de la frecuencia. A lo largo de estos 2 segundos, se puede observar cómo el sistema reacciona a estos cambios en la carga, permitiendo analizar la capacidad del GFMI para mantener la estabilidad de la frecuencia en respuesta a las fluctuaciones en la demanda. Esta simulación proporciona datos importantes sobre la dinámica del sistema y su rendimiento ante situaciones de carga variable.

C. Falla trifásica a tierra

Se simuló el sistema de la red eléctrica con el inversor formador de red (GFMI) estableciendo un escenario crítico en el que se produjo una falla trifásica a tierra. Este tipo de falla es uno de los peores escenarios que pueden presentarse en una red eléctrica, ya que puede causar interrupciones significativas en la operación y afectar la estabilidad del sistema.

Durante la simulación, se introdujo la falla trifásica a tierra para observar cómo el GFMI y el sistema en su conjunto responden a esta perturbación. Se monitoreó la frecuencia como se muestra en la Fig. 12 en la salida del inversor, ya que una falla de este tipo puede provocar caídas abruptas en la frecuencia debido a la pérdida repentina de potencia en la red.

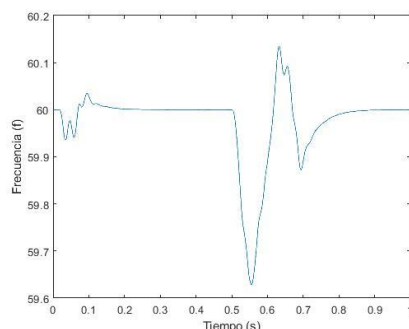


Fig. 12. Frecuencia en la salida del inversor en la falla trifásica a tierra.

La simulación permitió evaluar la capacidad del GFMI para detectar la falla y reaccionar adecuadamente, ajustando su operación para intentar estabilizar la frecuencia y minimizar el impacto en el sistema. Este análisis es crucial para entender cómo se comporta el sistema en situaciones adversas y para desarrollar estrategias de control que mejoren la resiliencia de la red eléctrica ante fallas graves.

La simulación tuvo una duración total de 1 segundo, durante el cual se introdujo la falla, que se presenta a los 0.5 segundos de la simulación, lo que provocó un choque inmediato en la operación del inversor formador de red (GFMI) y en la frecuencia de salida.

A los 0.6 segundos, la falla se liberó, permitiendo observar cómo el sistema respondía a esta perturbación y cómo la frecuencia se recuperaba tras la eliminación de la falla. Durante este breve período, se pudo analizar la caída en la frecuencia causada por la falla y la posterior estabilización a medida que el sistema intentaba restablecer su funcionamiento normal.

Esta simulación es fundamental para entender la dinámica del sistema en situaciones de emergencia, proporcionando datos valiosos sobre la capacidad del GFMI para manejar perturbaciones severas y su efectividad en la restauración de la estabilidad de la frecuencia en la red eléctrica.

VII. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo, presentado en una plataforma orientada a objetos a través de la Matlab Simulink de un convertidor formador de red "grid forming" detallando las partes que lo conforman, dando énfasis en los

aspectos de control del convertidor. Este ha sido simulado bajo diferentes condiciones en un sistema eléctrico convertidor-bus infinito. El desarrollo de la simulación del sistema eléctrico ha permitido emular diversas condiciones operativas para observar la respuesta del sistema ante diferentes escenarios, incluyendo la operación en estado estable como perturbaciones tales como fallas y cambios en la carga. Este enfoque fundamental para comprender cómo los inversores formadores de red (GFMI) pueden operar dentro del sistema eléctrico de potencia y de alguna manera emular las funciones de un sistema electromecánico.

La importancia de implementar nuevas fuentes de energía renovable en la red eléctrica radica en la necesidad de avanzar hacia un sistema energético más sostenible y resiliente. Los GFMI juegan un papel fundamental en esta transición, ya que permiten integrar eficientemente estas fuentes intermitentes, sustituyendo a las máquinas síncronas tradicionales y mejorando la flexibilidad operativa de la red.

La relevancia de los inversores formadores de red en la modernización del sistema eléctrico es una alternativa que permite el suministro de energía confiable y sostenible en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] J. Hernandez-Alvidrez, A. Summers, M. J. Reno, J. Flicker and N. Pragallapati, "Simulation of Grid-Forming Inverters Dynamic Models using a Power Hardware-in-the-Loop Testbed", 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, 2019, pag. 1-8.
- [2] B. Marinescu, O. Gomis-Bellmunt, F. Dörfler, H. Schulte and L. Sigrist, "Dynamic Virtual Power Plant: A New Concept for Grid Integration of Renewable Energy Sources", IEEE Access, vol. 10, pag. 104980-104995, 2022.
- [3] H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, "Grid Forming Converters in Renewable Energy Sources Dominated Power Grid: Control Strategy, Stability, Application, and Challenges", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 6, pag. 1239-1256, Noviembre 2021.
- [4] U. Markovic, O. Stanojev, P. Aristidou, E. Vrettos, D. Callaway and G. Hug, "Understanding Small-Signal Stability of Low-Inertia Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 5, pag. 3997-4017, Sept. 2021.
- [5] Roger Domingo-Enrich, Xiuqiang He, Verena Haberle, Florian Dorfler, "Dynamic Complex-Frequency Control of Grid-Forming Converters", arXiv preprint arXiv:2404.10071, 2024.
- [6] C. Arghir and F. Dörfler, "The Electronic Realization of Synchronous Machines: Model Matching, Angle Tracking, and Energy Shaping Techniques", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 4, pag. 4398-4410, Abril 2020.
- [7] O. Gomis-Bellmunt, S. D. Tavakoli, V. A. Lacerda and E. Prieto-Araujo, "Grid-Forming Loads: Can the Loads Be in Charge of Forming the Grid in Modern Power Systems?", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 2, pag. 1042-1055, Marzo 2023.
- [8] J. Wang and K. Ma, "Inertia and Grid Impedance Emulation of Power Grid for Stability Test of Grid-Forming Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 2, pag. 2469-2480, Feb. 2023.
- [9] A. Vinayagam, K. Swarna, S. Khoo, A. Oo and A. Stojcevski, "PV Based Microgrid with Grid-Support Grid-Forming Inverter Control- (Simulation and Analysis)," Smart Grid and Renewable Energy, Vol. 08, No. 01, pag. 1-30, 2017.



BIOGRAFÍAS



YANNICK GARCIA ZEPEDA, es estudiante de Ingeniería Eléctrica en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Actualmente se encuentra cursando su último semestre de su programa educativo y está próximo a egresar, destacándose en su formación académica y con interés en el área de control de sistemas eléctricos.



OSVALDO RODRÍGUEZ VILLALÓN, obtuvo su doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el año 2012. Realizó una estancia posdoctoral en el Federal Institute of Technology ETH ZURICH, Suiza, entre el 2014 al 2016. Es profesor-investigador adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Sus áreas de interés son el análisis de estabilidad ante oscilaciones no lineales en sistemas eléctricos, estudio de redes eléctricas inteligentes mediante análisis de datos, producción de Hidrógeno por medio de fuentes alternativas de energía, análisis espectral de sistemas eléctricos de potencia mediante técnicas basadas en observación de datos



HÉCTOR JAVIER ESTRADA GARCÍA Doctor en Ciencias, orientación: Instrumentación y Control, 2008, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México, en cotutela con la Ecole Centrale de Nantes y la Université de Nantes, Francia. Principales áreas de interés son smart grids, sistemas eléctricos y de control con retardos en tiempo. Actualmente es Profesor del Departamento de Ing. Eléctrica, DICIS, Univ. de Guanajuato, México.



Prototipo IoT para el Monitoreo y Control Remoto en Laboratorio de Sistemas de Riego

Salomón Flores-García¹, Aaron A. Maciel-Armenta¹, Israel E. Herrera-Díaz¹, Noé Saldaña-Robles¹, Jonathan Cepeda-Negrete¹, Guillermo Tapia-Tinoco¹.

¹Departamento de Ingeniería Agrícola, División de Ciencia de la Vida, Universidad de Guanajuato, Carretera Irapuato-Silao km 9; El Copal, C.P. 36500; Irapuato, Gto.

s.flores.garcia@ugto.mx

aa.macielarmenta@ugto.mx

eherrera@ugto.mx

saldanar@ugto.mx

j.cepeda@ugto.mx

g.tapia@ugto.mx

RESUMEN Este artículo presenta la modernización de los sistemas de monitoreo y control de un laboratorio dedicado a la enseñanza de sistemas de riego a nivel universitario. El laboratorio cuenta actualmente con infraestructura hidráulica, sensores de flujo y actuadores operando con una arquitectura centralizada y cableada. En este trabajo se propone el diseño e implementación de un prototipo de laboratorio que permite monitorear y controlar el flujo en la tubería principal del sistema de riego. El flujo se controla mediante una válvula de paso acoplada mecánicamente a un servomotor y la medición del flujo se realiza con un caudalímetro YF-S201. Las tareas de monitoreo y control recaen en un microcontrolador ESP32 que permite ejecutar tareas en modo local y modo remoto. En modo local la válvula es controlada por un potenciómetro y el flujo se muestra en una pantalla OLED. Para el modo remoto se explotan las ventajas del internet de las cosas lo que permite monitorear y controlar el flujo de manera remota.

PALABRAS CLAVE— IoT, Laboratorio riego, control remoto.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito agrícola, la formación de recursos humanos altamente capacitados es esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos del sector. Los laboratorios universitarios dedicados al estudio de sistemas de riego juegan un papel crucial en esta formación, proporcionando a los estudiantes experiencias prácticas que complementan sus conocimientos teóricos sobre hidráulica, sistemas de control y tecnologías de riego [1]. Sin embargo, para mantenerse al día con los avances tecnológicos y garantizar una educación de calidad, es vital que estos laboratorios incorporen innovaciones tecnológicas [2]. La modernización de los laboratorios universitarios a través de la integración de nuevas tecnologías es una estrategia clave para mejorar la eficiencia y efectividad en el proceso educativo. En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT) emerge como una tecnología transformadora que está revolucionando la interacción entre máquinas y usuarios [3]. El IoT permite una comunicación fluida y en tiempo real entre dispositivos a través de internet, facilitando un control más preciso y una monitorización remota de sistemas [4].

La implementación del IoT en combinación con sistemas modulares ofrece una solución innovadora para desarrollar infraestructuras distribuidas en laboratorios [5]. Los sistemas modulares y adaptables proporcionan varias ventajas significativas: facilitan la expansión y actualización del sistema sin la necesidad de modificaciones extensivas,

permiten una personalización según las necesidades específicas de cada estación de trabajo, y mejoran la flexibilidad operativa al permitir que los módulos sean intercambiables y actualizables de manera sencilla [6]. Además, la posibilidad de operar en modos locales y remotos optimiza el control y la monitorización de los sistemas, brindando una mayor versatilidad y accesibilidad.

En este sentido y con el fin de modernizar el monitoreo y control del laboratorio de riego de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato, se propone la implementación de un prototipo de laboratorio que permite monitorear y controlar el flujo en la tubería principal del sistema de riego. El control del flujo en la tubería se realiza mediante una válvula de paso acoplada a un servomotor y para la medición del flujo se utiliza un caudalímetro. El cerebro del prototipo está basado en el microcontrolador ESP32 y este permite la operación en modo local y en modo remoto utilizando comunicación IoT. Se presenta un diseño modular con características de fácil conexión y desconexión lo que le permite ser ubicado en cualquier ubicación física del laboratorio.

II. PROBLEMÁTICA

La Fig. 1 ilustra el laboratorio de sistemas de riego, mostrando los dos sistemas de tuberías existentes. En la Fig. 1(a), se puede ver la red de tuberías y sus respectivas estaciones de trabajo donde se pretende implementar el

prototipo. Cada estación de trabajo cuenta con una bajada de agua controlada por una electroválvula y se tiene un medidor de flujo disponible. Por otro lado, en la Fig. 1(b) se muestra la red de tuberías que alimenta las estaciones de trabajo y corresponde a la ubicación donde se probó el funcionamiento del prototipo, ya que su instalación resultaba más sencilla. Dicha estación cuenta con un sistema de bombeo que alimenta las estaciones de trabajo. En esta estación se monitorea y controla el caudal proporcionado por la bomba a las estaciones de trabajo. Como se observa en la Fig. 1(a), actualmente la infraestructura disponible requiere una gran cantidad de cableado y una arquitectura centralizada. Es decir, actualmente se controlan todas las estaciones de trabajo desde un microcontrolador Arduino y para esto se utilizan cables para el envío/recepción de señales de monitoreo y control. Estas condiciones de operación provocan fallas intermitentes y errores de medición persistentes que afectan el desarrollo de las prácticas. Debido a esto, en este trabajo se propone desarrollar un prototipo de fácil conexión en cada estación de trabajo. Dicho prototipo cuenta únicamente con su terminal de alimentación y conexión a sensores y actuadores. Adicionalmente, explotando las ventajas de internet de las cosas, se podrá controlar de manera remota cada estación de trabajo. La contribución del prototipo mejora la infraestructura del laboratorio de riego al controlar un sistema de tuberías diseñado para realizar prácticas. Este laboratorio tiene seis descargas, cada una equipada con caudalímetros y válvulas. Con la incorporación de este prototipo en cada una de las descargas, se optimizará la infraestructura del sistema, haciéndolo más funcional y permitiendo que las prácticas se lleven a cabo de manera más eficiente.

Adicionalmente, se aborda el intercambio de información y las herramientas utilizadas.

A. CONEXIÓN DE PROTOTIPO

La Fig. 2 ilustra los elementos del prototipo implementado. El microcontrolador ESP32 actúa como el núcleo del sistema, recibiendo y procesando todas las señales de entrada y salida de los demás componentes. Además, el ESP32 se encarga de gestionar el funcionamiento del prototipo y tiene la capacidad de conectarse a internet para operar en los dos modos disponibles (local y remoto).

Para medir el caudal, se ha empleado un caudalímetro (YF-S201), que determina el caudal mediante una señal PWM que envía pulsos al GPIO35; la frecuencia de estos pulsos varía en función de la velocidad del líquido. Para mostrar el caudal, se ha utilizado una pantalla OLED que se comunica a la ESP32 a través de dos pines ya designados (SCL y SDA). El servomotor, encargado de operar la válvula mediante un acoplamiento mecánico, recibe la señal de control a través del GPIO19 del ESP32. Su funcionamiento se regula mediante un potenciómetro que envía una señal analógica al ESP32 por medio del pin GPIO32. El interruptor (switch) gestiona el modo de funcionamiento del prototipo al enviar una señal digital al pin GPIO33. La colaboración de estos componentes permite alcanzar el objetivo de monitorear y controlar el caudal de la tubería.

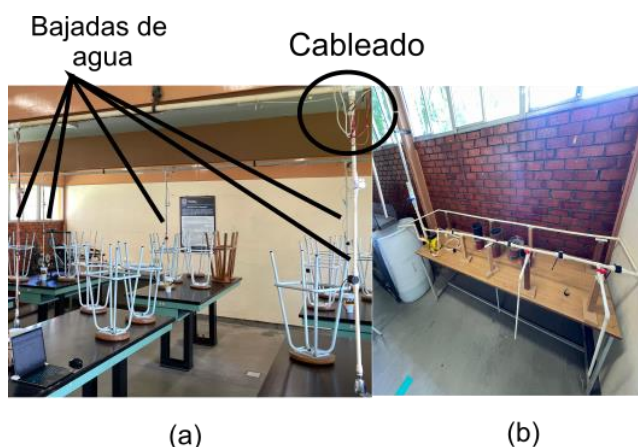


Fig. 1. Laboratorio de sistemas de riego. (a) Sistema de tuberías donde se instalará el prototipo, (b) Sistema de tuberías donde se probó el prototipo.

III. SISTEMAS DE MONITOREO Y CONTROL

En esta sección se presentan los elementos que conforman el prototipo y su modo de operación.

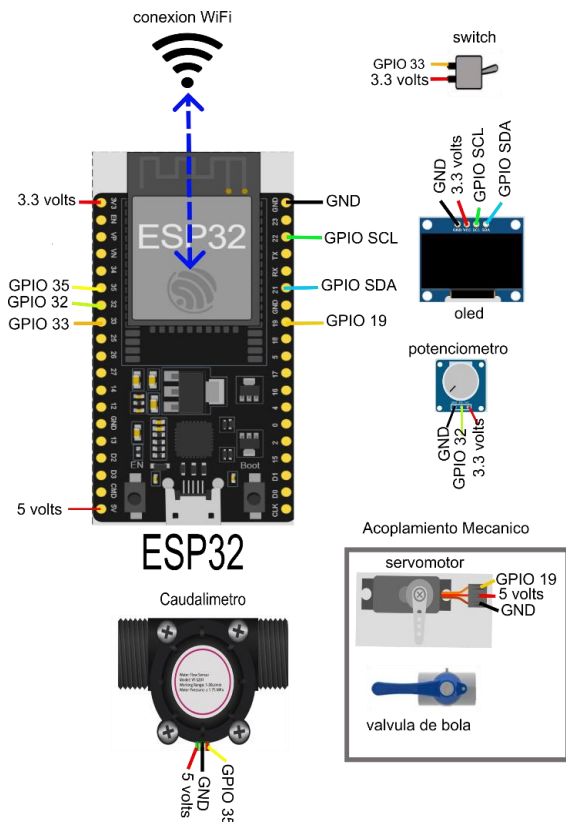


Fig. 2. Conexiones entre ESP32 y sus componentes en el circuito.

B. RELACIÓN ENTRE ESP32 Y NODE-RED

En la Fig. 3 se muestra la conexión entre el bróker, el ESP32 y la plataforma Node-Red. Un Bróker MQTT actúa como intermediario entre los dispositivos, gestionando la información mediante servicios de suscripción y publicación. Al estar conectado al WiFi, el ESP32 puede comunicarse con el Bróker, permitiéndole tanto publicar datos al Bróker como suscribirse para recibir datos de este. Los datos intercambiados pueden ser variables en formato numérico o de texto. Para gestionar el control, el ESP32 y Node-RED utilizan dos tópicos: uno para la publicación de datos y otro para la suscripción. Los tópicos funcionan como filtros de mensajes, de modo que la información publicada solo se envía a los tópicos que están suscritos a el tópico que la publica.

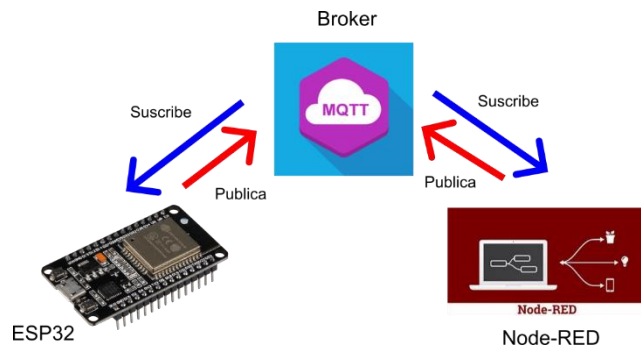


Fig. 3. Relación entre el ESP32, el bróker y Node-RED.

IV. DISEÑO DEL PROGRAMA DE MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA

En esta sección se describen las características del programa del lazo principal, así como cada una de las interrupciones que se utilizan.

A. DISEÑO PRINCIPAL DEL PROGRAMA

La Fig. 4 ilustra el diagrama de flujo principal del programa implementado en el microcontrolador ESP32. El programa inicia con la declaración de librerías, seguida de la inicialización de variables, el establecimiento de banderas de interrupciones y la inicialización de las interrupciones que se ejecutaran en el programa. En el lazo principal, se gestionan cuatro interrupciones activadas por temporizador y una señal externa proveniente del interruptor de control que define el modo de operación (local o remota). Las dos primeras interrupciones corresponden al modo remoto, mientras que las dos últimas controlan el modo local. La interrupción 1 se encarga de mostrar en Node-Red los datos del sensor de flujo, y su actualización es controlada por el temporizador 2 (1 segundo). Este intervalo se ha establecido teniendo en cuenta el funcionamiento del caudalímetro, que mide los pulsos enviados por segundo y, mediante un factor de conversión, determina el caudal en litros por minuto (L/min). La interrupción 2 se emplea para controlar el servomotor desde Node-Red, con una actualización de datos gestionada por el temporizador 3 (0.1 segundos). Este intervalo permite realizar el movimiento del servomotor de manera más rápida, facilitando un control más preciso del motor. La interrupción 3, actualizada por el temporizador 1 (0.1 segundos), se utiliza para controlar el servomotor de manera local mediante el potenciómetro. El intervalo reducido de tiempo permite lograr una mayor precisión en el control del servomotor en modo local. La interrupción 4, actualizada por el temporizador 0 (1 segundo), tiene el propósito de enviar las lecturas del sensor a la pantalla OLED.

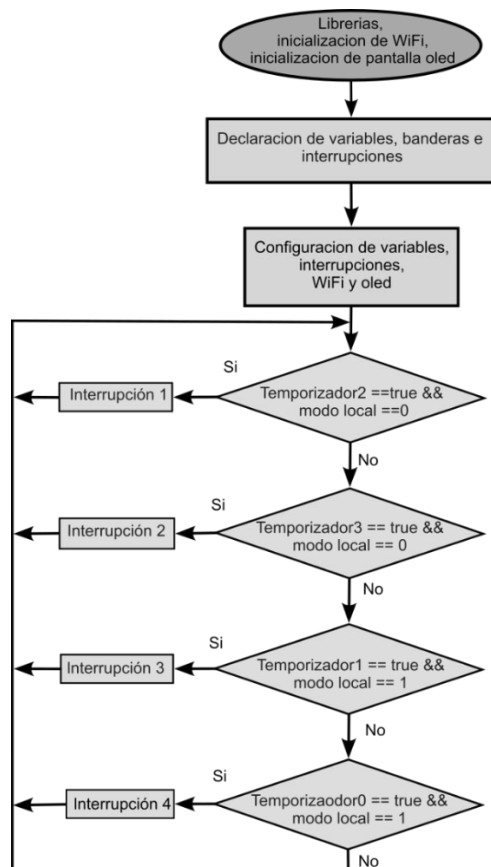


Fig. 4. Diagrama de flujo sobre el programa principal.

B. DISEÑO DE INTERRUPCIONES

La Fig. 5 ilustra las cuatro interrupciones y las tareas que ejecutan. La interrupción mostrada en la Fig. 5(a) presenta el diagrama de flujo para llevar a cabo la tarea de publicar la lectura del sensor de flujo en Node-Red. Esta tarea incluye conectarse a la red WiFi, registrar la información proporcionada por el caudalímetro, convertir el valor a un formato de texto (string), finalmente publicar esta información y enviarla a Node-Red para su visualización. La Fig. 5(b) muestra el diagrama de flujo para recibir información de Node-RED. En esta interrupción, se gestiona el control del servomotor, lo que a su vez el control de la posición de la válvula. La Fig. 5(c) corresponde al control local del servomotor. Primero, se lee el valor de la señal analógica proporcionada por el potenciómetro. Luego, este valor se escala en el rango de 0 a 180 grados y se envía como una acción de control al servomotor. La Fig. 5(d) ilustra el diagrama de flujo de la interrupción responsable de mostrar la lectura del caudalímetro en la pantalla OLED. Primero, se activa y limpia la pantalla OLED. Luego, se recibe la información del caudalímetro que se muestra en litros por minuto (L/min). La pantalla se actualiza cada segundo, siguiendo la interrupción controlada por el temporizador 0.

V. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRAFICA DESDE Node-Red

Node-Red proporciona un editor de flujo basado en navegador que simplifica la conexión de flujos a través de una amplia variedad de nodos disponibles en la paleta. La Figura 6 ilustra los flujos implementados en Node-Red, cuyo objetivo es intercambiar información con el microcontrolador ESP32 a través del Bróker. El flujo incluye nodos de instrumentos o “dashboard”, así como nodos de red que funcionan como entradas y salidas MQTT, que es el protocolo utilizado para la comunicación. Los nodos MQTT permiten suscribir y publicar información al Bróker, facilitando la distribución de datos a los dispositivos que están suscritos a los tópicos correspondientes. En la Figura 6 se puede observar, en primer lugar, un nodo de entrada conectado a un nodo de instrumento “gauge”. A través de la suscripción a este tópico, se recibe información del caudalímetro conectado al ESP32, la cual se muestra en la interfaz gráfica. La Fig. 6 también muestra el nodo de control del servomotor (nodo slider) y este se conecta al nodo de salida MQTT. Este nodo envía la información del slider al tópico de publicación al que está suscrito el ESP32. Cuando el ESP32 recibe los datos de este tópico, acciona el servomotor. Así, los instrumentos (dashboard) que se despliegan en la interfaz gráfica y se puede monitorear el flujo y controlar el servomotor en tiempo real.

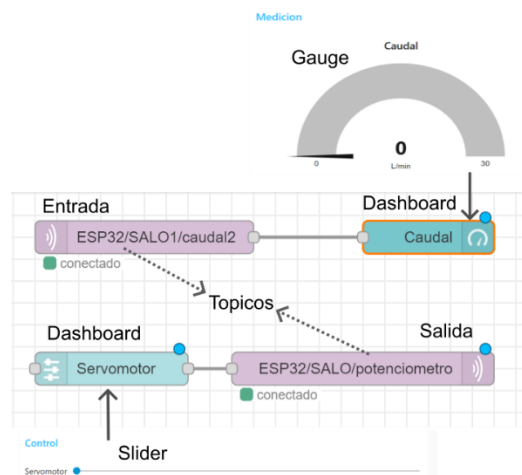
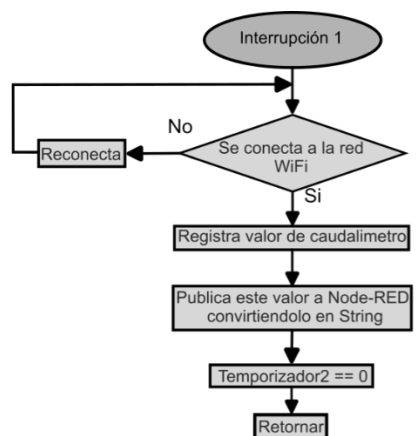
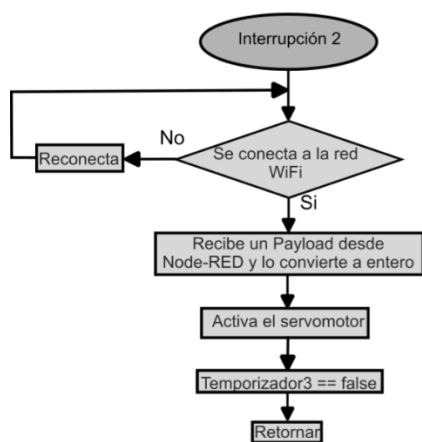


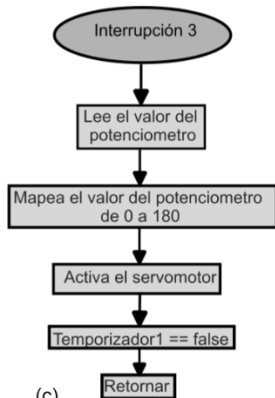
Fig. 6. Nodos de Node-RED.



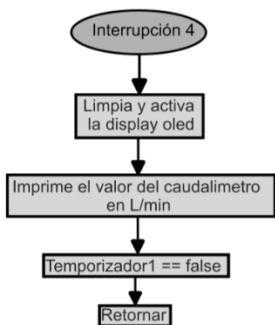
(a)



(b)



(c)

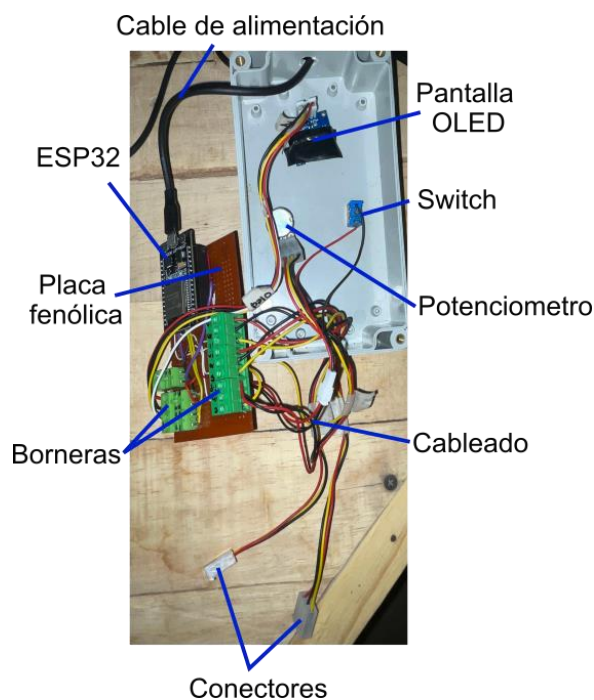


(d)

Fig. 5. Diagramas de flujo condicionales. a) Interrupción 1, b) Interrupción 2, c) Interrupción 3, d) Interrupción 4.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta el prototipo implementado y unas pruebas realizadas en el laboratorio operando en modo local y modo remoto


Fig. 7. Interior de prototipo.

A. PROTOTIPO

En la Fig. 7 Se observan los componentes internos del prototipo, incluyendo la placa “ESP32”, que es la pieza central del proyecto. También está presente una pantalla OLED que muestra datos en tiempo real, un potenciómetro para ajustar la posición del servomotor y un interruptor para controlar el modo de operación. Todos estos elementos están soldados a una placa terminal fenólica.

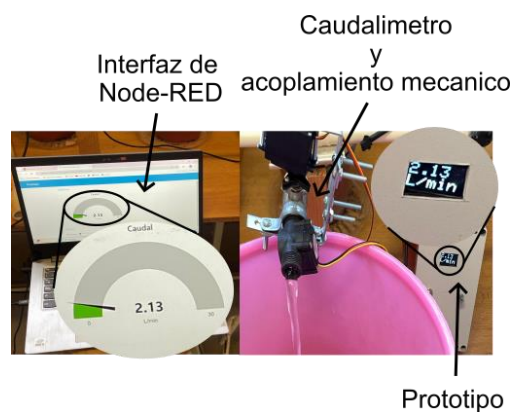


Fig. 8. Prototipo funcionando

B. FUNCIONAMIENTO

En la Figura 8 se puede ver el prototipo operando tanto en modo local como en modo remoto. A la izquierda, se muestra la interfaz gráfica creada en node-RED, la cual se actualiza en función de los cambios en el flujo de agua. A la derecha, se presenta el prototipo instalado en una red de tuberías por donde circula el agua. En esta configuración, se encuentra un caudalímetro, el acoplamiento mecánico de la válvula y el servomotor. Además, se puede ver el prototipo con la pantalla OLED que muestra el caudal.

Al ser la primera versión del prototipo, se está evaluando su robustez y resistencia, ya que se utilizará en diversas prácticas en el laboratorio. Este prototipo facilitará la verificación de los resultados en materias como sistemas de riego y mecánica de fluidos, además de permitir la realización de diferentes experimentos para observar cómo contribuye al manejo del agua en el laboratorio. Además de su uso en el laboratorio, este prototipo puede implementarse en sistemas de riego agrícola, permitiendo el control del caudal desde cualquier parte del mundo. También es aplicable en sistemas de riego de jardines e incluso para gestionar tuberías en hogares, como el llenado de tinacos. Su objetivo principal es monitorear y proporcionar información sobre el caudal que circula a través de las tuberías.

El prototipo es un proyecto funcional en desarrollo, siendo esta una versión inicial que aún puede mejorarse para medir más variables y almacenar la información recopilada. Además, al aplicarse en sistemas de riego en áreas rurales sin conexión eléctrica, podría equiparse con paneles solares para operar con energía solar. Así mismo también se pueden hacer varias mejoras respecto a la interfaz gráfica que sea de una forma más amigable para el productor. Al realizar las mejoras necesarias para objetivos más específicos, este sistema también podría utilizarse en granjas, por ejemplo, para proporcionar agua a los animales o para otras tareas relacionadas con la distribución de agua.

C. VIABILIDAD ECONOMICA

En la Tabla I se puede observar los objetos que se usaron, así como lo que se ha invertido en la implementación del prototipo, con un costo total de \$ 646.00 M.N.

Tabla I. Costos de los materiales utilizados en la implementación del prototipo.

Objetos	Número de objetos	Precio	Precio total
ESP32	1	\$80.00	\$80.00

Caudalímetro (YS-F201)	1	\$72.00	\$72.00
Servomotor (Mg 995)	1	\$45.00	\$45.00
Pantalla Oled 0.96 in	1	\$120.00	\$120.00
Acoplamiento mecánico	1	\$45.00	\$45.00
Válvula de bola	1	\$35.00	\$35.00
Potenciometro	1	\$5.00	\$5.00
Switch	1	\$7.00	\$7.00
Tiras de pines hembra	2	\$5.00	\$5.00
Placa fenólica	1	\$15.00	\$15.00
Bomera de dos entradas	1	\$6.00	\$6.00
Bomera de tres entradas	3	\$7.00	\$21.00
Bomera de 4 entradas	1	\$10.00	\$10.00
Conector de 2 pines	1	\$15.00	\$15.00
Conector de 3 pines	3	\$15.00	\$45.00
Conector de 4 pines	1	\$20.00	\$20.00
Cable de alimentación	1	\$50.00	\$20.00
Gabinete para exteriores	1	\$80.00	\$80.00
Total			\$646.00 M.N

REFERENCIAS

- [1] F. Capraro, S. Tosetti y F. Vita Serman, "Laboratorio Virtual y Remoto para Simular, Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Ind. RIAI, vol. 7, n.º 1, pp. 73–84, enero de 2010. Accedido el 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/s1697-7912\(10\)70010-8](https://doi.org/10.1016/s1697-7912(10)70010-8)
- [2] George Ney Cedeño Patiño y David Fernando Zambrano Montenegro, "Revisión del estado del arte de sistemas IoT para optimizar el riego", Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, Vol. 15, No.7, Mes: Julio, 2022, Pág. 96-106.
- [3] J. M. Talavera et al., "Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields", Comput. Electron. Agriculture, vol. 142, pp. 283–297, noviembre de 2017. Accedido el 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>.
- [4] S. Geetha y S. Gouthami, "Internet of things enabled real time water quality monitoring system", Smart Water, vol. 2, n.º 1, diciembre de 2016. Accedido el 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>
- [5] Flor G., Juan B., & Germán Arturo L. "Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano." Tecnura 17, no. 2 (2013):33-47. Redalyc, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257059811004>
- [6] M. A. Pérez González, D. A. Verde Romero, H. R. Carvajal Pérez, E. Hernández Barón, E. Villalvazo Laureano y J. Salome Baylon, "Diseño

BIOGRAFÍAS



SALOMÓN FLORES GARCÍA Es estudiante de Ingeniería Agrónoma en la Universidad de Guanajuato y egresado del Cecyte en el municipio de Salamanca, Guanajuato. A lo largo de su trayectoria estudiantil, ha participado en diversos proyectos que han enriquecido su formación académica. Además, ha recibido un premio de excelencia académica durante su tiempo en la universidad. En la actualidad, se encuentra trabajando en varios proyectos y cursando sus últimas materias para completar sus estudios.



AARON ANDRÉS MACIEL ARMENTA es estudiante de Ingeniería Agrónoma en la Universidad de Guanajuato, y egresado del CBTis 171. Nacido el 12 de mayo de 2003 en el rancho Rincón de Martínez, en el municipio de Abasolo, Guanajuato, es originario de México. Ha estado involucrado en varios proyectos universitarios y ha adquirido experiencia trabajando en el campo como agricultor.



ISRAEL ENRIQUE HERRERA-DÍAZ. Ingeniero Civil por el Instituto Politécnico Nacional (IPN-ESIA); con maestría en ciencias con especialidad en hidráulica en 2004 por la misma institución obteniendo mención honorífica por el trabajo de tesis y doctor en ingeniería con especialidad en hidráulica por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-DEPI) en 2009. Ha laborado en instituciones educativas y de gobierno, así como empresas particulares dedicadas a proyectos y construcción. En los últimos años he publicado diversos artículos internacionales y nacionales en revistas JCR, participaciones en Congresos Nacionales e Internacionales, ha realizado diversos proyectos de investigación en diferentes instituciones públicas y privadas sobre los temas de transporte de sedimentos, sismología, simulación numérica de fenómenos del oleaje, hidrología e hidrodinámica de flujos a superficie libre, instrumentación, control y automatización de sistemas de tuberías para diferentes industrias y sistemas de riego, etc.



NOÉ SALDAÑA ROBLES Realizó estudios de licenciatura como ingeniero en alimentos en la Universidad de Guanajuato, México y obtuvo su título de doctorado en la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente se desempeña como profesor titular de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Agrícola en la División de Ciencias de la Vida de la UG. Es miembro del SNII nivel 2 y sus áreas de interés incluyen la aplicación de redes neuronales y estadística inferencial para generación de modelos predictivos, reconocimiento de patrones y sistemas de clasificación automatizada.



GUILLERMO TAPIA TINOCO. Realizó estudios de licenciatura como ingeniero electricista y maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Realizó el doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato (UG). Actualmente se desempeña como profesor de tiempo parcial con definitividad en la División de Ciencias de la Vida de la UG. Es miembro del SNII nivel 1 y sus áreas de interés incluyen la aplicación de algoritmos inteligentes en redes eléctricas, redes inteligentes y comunicación IoT.



JONATHAN CEPEDA NEGRETE Obtuvo su doctorado en Ingeniería Eléctrica (2016), su maestría en Ingeniería Eléctrica (2012) y su licenciatura en Ingeniería de Comunicaciones y Electrónica (2011) en la Universidad de Guanajuato, México. Sus intereses de investigación actuales incluyen aplicaciones de visión por computadora, principalmente procesamiento de imágenes en color, reconocimiento de patrones y gráficos por computadora. Es miembro del SNII nivel 1 y cuenta con la distinción PRODEP.



Perspectiva de los Sistemas Solares Fotovoltaicos para Riego Agrícola en el Estado de Guanajuato

ELMER G. ROBLES LECONA, VÍCTOR J. GUTIÉRREZ MARTÍNEZ, ENRIQUE A. ZAMORA CÁRDENAS.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

eg.robleslecona@ugto.mx

vj.gutierrez@ugto.mx

e.zamora@ugto.mx

RESUMEN Dado que el uso del agua para el riego agrícola en el estado de Guanajuato enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad y la eficiencia, a medida que la demanda aumenta y los recursos hídricos se vuelven más limitados, resulta crucial la integración de la energía solar fotovoltaica, ya que ofrece una alternativa energética sustentable y económica para operar sistemas de bombeo agrícola. En este contexto, en este trabajo se presenta una investigación documental acerca de la situación actual del riego agrícola en el estado de Guanajuato; se describe de manera breve la influencia de las políticas en la gestión del agua y el potencial de la energía solar fotovoltaica para transformar el sector agrícola. Se realiza una comparativa simple entre las tarifas subsidiadas para riego agrícola respecto al costo de una instalación solar fotovoltaica para riego agrícola. Finalmente se presentan las ventajas, desventajas e inconvenientes de este tipo de sistemas con la finalidad de tener un panorama general de su avance.

PALABRAS CLAVE— Sistema solar fotovoltaico, bombeo agrícola, recursos hidráulicos.

I. INTRODUCCIÓN

En el estado de Guanajuato la agricultura depende en gran medida del uso de pozos para riego debido a la escasez de recursos hídricos superficiales. Las estadísticas de los pozos agrícolas en el estado muestran una intensa actividad en este sector, con más de 15,000 pozos registrados. Aproximadamente el 84% del agua extraída de estos pozos se destina a la agricultura, lo que demuestra su importancia para la producción agrícola en la región [1],[2]. Sin embargo, la gestión del agua enfrenta desafíos significativos, como la sobreexplotación de los acuíferos, ya que la extracción de agua subterránea supera la recarga natural, lo que ha llevado a déficits hídricos anuales. Esta situación ha obligado a las autoridades estatales y municipales a implementar restricciones y regulaciones para el uso de pozos, con el objetivo de preservar los recursos hídricos a largo plazo y garantizar la sostenibilidad de la agricultura en el estado.

La gran mayoría de pozos utilizados para riego agrícola utilizan energía eléctrica proveniente de las redes generales de distribución, cuyos concesionarios cuentan con dos tarifas subsidiadas por parte del Gobierno: La primera tarifa se denomina Riego Agrícola en Baja Tensión (RABT), que se aplica exclusivamente a los servicios en baja tensión que destinen la energía para el bombeo de agua utilizada en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas y al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo

de bombeo [3]; básicamente establece una tarifa similar a las tarifas denominadas Doméstica en Baja Tensión 1 y 2 (DB1 y DB2) [4]. La segunda tarifa se denomina Riego Agrícola en Media Tensión (RAMT), y que es similar a la tarifa RABT con la diferencia que se aplica a los servicios en media tensión [5]. Lo anterior motiva a los productores agrícolas a desarrollar la infraestructura necesaria para realizar el bombeo agrícola utilizando energía eléctrica proveniente de las redes generales de distribución.

Por otra parte, con la disminución de costos de los componentes de los sistemas solares fotovoltaicos (SFV) [6], el sector agrícola poco a poco centra su atención hacia esta tecnología para realizar el bombeo para riego agrícola, particularmente en predios donde no se cuenta con infraestructura de suministro de energía eléctrica ya sea en baja o media tensión. Sin embargo, se presentan nuevos retos para lograr una incidencia mayor de este tipo de tecnología, tales como la necesidad de capacitar a los agricultores en el uso y mantenimiento de estos sistemas, así como garantizar la disponibilidad de componentes y servicios de reparación en áreas rurales. Además, es fundamental desarrollar soluciones de almacenamiento de energía económicamente viables que aseguren un suministro constante de agua para riego, incluso cuando hay baja o nula irradiación solar. Otro reto importante es la optimización del uso del terreno, ya que la instalación de módulos SFV puede requerir áreas que de otro modo podrían destinarse a la producción agrícola; por



Fig. 1. Organismos de Cuenca en México.

tanto, es crucial encontrar formas de integrar estos sistemas en el entorno agrícola sin comprometer significativamente el área disponible para el cultivo. También es importante adaptar las políticas gubernamentales para ofrecer incentivos que faciliten la inversión inicial en estos sistemas y abordar los desafíos mencionados de manera integral.

Como consecuencia de lo descrito anteriormente, en el presente artículo se presenta una investigación documental acerca la situación actual del riego agrícola proveniente de pozos subterráneos en el estado de Guanajuato, se describe de manera breve el esquema de gestión de los recursos hídricos y su normativa asociada. Para resaltar la importancia de los sistemas de riego en el estado de Guanajuato, se destaca el potencial de la energía SFV para transformar dicho sector logrando una mayor eficiencia y sostenibilidad, considerando tanto sus ventajas como sus limitaciones. Lo anterior representa la principal contribución del presente trabajo, ya que en los diferentes niveles de gobierno se cuenta con poca o nula información acerca del desarrollo de esta tecnología en el sector agrícola, aún y cuando su impulso se encuentra establecido en las políticas públicas.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta el sistema de gestión y uso de los recursos hídricos, así como su normativa asociada. En la Sección III se describen los sistemas SFV aplicados al bombeo para riego agrícola. La Sección IV presenta una breve comparativa de costos, se menciona la problemática adicional que enfrentan estos sistemas, así como el papel que juegan las políticas públicas en el sector. Finalmente, en la Sección V se encuentran las conclusiones emanadas del presente trabajo.

II. SISTEMA DE GESTIÓN, USO Y NORMATIVA DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Para los participantes en el sector de los sistemas SFV aplicados para bombeo agrícola resulta fundamental conocer la estructura de gestión, el uso y la normativa que rige la explotación y aprovechamiento de los recursos hídricos. Esto les proporcionara tanto el conocimiento del mercado como

de la normativa asociada y los entes involucrados. Lo anterior es importante ya que para el desarrollo de cualquier proyecto se tendrán que realizar las gestiones necesarias para demostrar que la instalación cumple con dicha normativa.

A. SISTEMA DE GESTIÓN

La gestión de los recursos hídricos en México se organiza en una estructura jerárquica que incluye diversas entidades y organismos como se menciona a continuación:

1. **Comisión Nacional del Agua (CONAGUA):** Es la entidad máxima en la administración y gestión del agua a nivel nacional. Es responsable de establecer las políticas hídricas del país y coordinar los esfuerzos a través de los diferentes niveles.
2. **Organismos de Cuenca:** Son entidades regionales de la CONAGUA que operan en distintas cuencas hidrográficas del país. Se encargan de implementar las políticas y directrices de la CONAGUA a nivel regional y de coordinar la gestión del agua en su área de influencia.
3. **Consejos de Cuenca:** Son órganos de participación y consulta dentro de cada cuenca, conformados por representantes de usuarios, gobiernos locales, y organizaciones civiles. Su función principal es asesorar y apoyar en la toma de decisiones sobre la gestión del agua en su cuenca.
4. **Distritos de Riego y Distritos de Temporal Tecnificado:** Son unidades administrativas que gestionan el uso del agua para la agricultura en áreas específicas, operando bajo la supervisión de los Organismos de Cuenca.
5. **Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS):** Operan a nivel local para la administración, protección y monitoreo de los acuíferos, trabajando en coordinación con los Organismos de Cuenca.

Existen 13 organismos de cuenca que agrupan las 37 regiones hidrológicas del país, tal como se muestra en la Fig. 1 [7]. El Estado de Guanajuato se encuentra en la jurisdicción del Organismo de Cuenca del Río Lerma-Chapala que abarca las cuencas del río Lerma y del lago de Chapala. El estado abarca también tres Distritos de Riego principales: el Distrito 011 conocido como "Alto Río Lerma", el Distrito 085 llamado "La Begoña" y el Distrito 087 llamado "Rosario-Mezquite." Los municipios que abarca cada uno de estos distritos de riego pueden consultarse en [8]. Esta organización y distribución pretende una administración más eficaz del agua en una región donde los recursos hídricos son vitales para la agricultura.

B. USOS DEL AGUA

En México, al año 2020, el 39% del volumen de agua destinado a los usos consuntivos fue extraído de fuentes subterráneas y el resto de superficiales. Como se observa en la Fig. 2, durante el periodo de 2005-2020 las extracciones

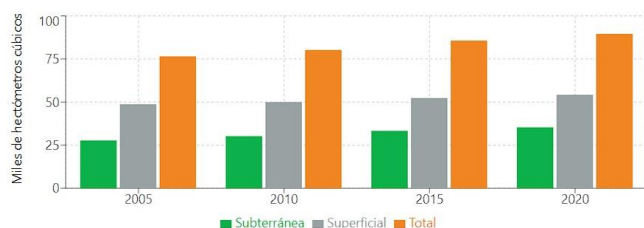


Fig. 2. Volumen de agua utilizada a nivel nacional por tipo de fuente.

TABLA I. CONCESIONES REGISTRADAS EN EL ESTADO DE GUANAJUATO.

Tipo de concesión	Número de concesiones	Volumen concesionado (hm ³ /año)	Observaciones
Subterráneas	6,412	1,960	Alta dependencia de aguas subterráneas; varios acuíferos en sobreexplotación.
Superficiales	1,734	510	Dependen fuertemente de la disponibilidad anual, con variabilidad según el clima.

TABLA II. VOLUMEN DE AGUA CONSUMIDA PARA USO AGRÍCOLA EN GUANAJUATO (2019-2023).

Año	Volumen de agua consumida (hm ³)
2019	3,850.5
2020	3,910.7
2021	3,965.2
2022	4,010.3
2023	4,050.6

superficiales han disminuido del 63.7% al 60.6%; mientras que las extracciones subterráneas se han incrementado del 36.3% al 39.4%. Del porcentaje total extraído de fuentes subterráneas, el estado de Guanajuato forma parte de un grupo de seis estados que alcanzan el 45%. Cabe señalar que se entiende por uso consuntivo al uso en los que el agua es transportada al lugar de consumo y la totalidad o parte de ella no regresa al cuerpo de agua original.

El uso agrícola es el que más predomina a nivel nacional, representando el 67.52% del volumen total nacional y durante el periodo mencionado su uso para este sector se incrementó 11%. En la Fig. 3 se observa un crecimiento nacional del uso del agua para riego agrícola de 54.41 a 60.46 Mhm³ (miles de hectómetros cúbicos). Del porcentaje del volumen total nacional, el 50.51% se concentra en los estados de Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Michoacán, Tamaulipas y Guanajuato [9]. En particular, el número de concesiones registradas en el estado de Guanajuato se presenta en la Tabla I, donde se observa un mayor número de concesiones subterráneas que superficiales [10], [11]. A su vez, la Tabla II presenta el volumen de agua consumida para uso agrícola en el periodo 2019-2023 [12], [13]. Al comparar el volumen concesionado mostrado en la Tabla I y el volumen de agua

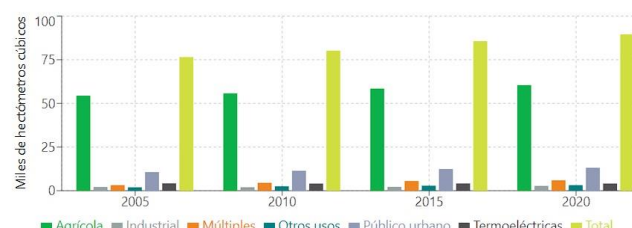


Fig. 3. Comportamiento del volumen de los usos del agua en el periodo 2005-2020.

consumida mostrado en la Tabla II se puede observar una clara sobreexplotación de los mantos acuíferos que ponen en riesgo la disponibilidad de este recurso para años futuros. De ahí la relevancia de reforzar las políticas públicas para realizar una gestión y vigilancia más eficaces. Por otra parte, derivado de esta información se puede visualizar el potencial de desarrollo que pueden alcanzar los sistemas SFV para bombeo agrícola.

C. NORMATIVA PARA EL USO Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA.

Como se ha mencionado, la gestión sostenible de los recursos hídricos es esencial para la conservación ambiental en México y particularmente para el desarrollo agrícola. Por tal motivo la legislación mexicana ha establecido un marco normativo integral que pretende garantizar la sostenibilidad y eficiencia del sector. En particular, dicho marco normativo debe ser considerado y respetado por los desarrolladores de proyectos de bombeo SFV, independientemente de los requerimientos del cliente, ya que de no ser así se podrían aplicar sanciones como las que se mencionarán más adelante en esta Sección.

La Ley de Aguas Nacionales es la piedra angular que establece los lineamientos relacionados con la exploración y explotación de las aguas nacionales [14]. Establece además los mecanismos para que tanto el sector público como el privado realicen las solicitudes de uso y aprovechamiento. Se definen también los términos de asignación y concesión, entendiéndose por asignación al Título que otorga el Ejecutivo Federal, a través de la CONAGUA o el Organismo de Cuenca que corresponda, para realizar la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales a los municipios y a los estados; mientras que la concesión es básicamente el mismo Título, pero otorgado a las personas físicas o morales de carácter público y privado. De acuerdo con el Artículo 20 de la mencionada Ley se establece que: “Las concesiones y asignaciones se otorgarán después de considerar a las partes involucradas, y el costo económico y ambiental de las obras proyectadas.” La duración de los Títulos comprende un rango entre cinco y treinta años, y podrán solicitarse prórrogas hasta por el mismo intervalo de tiempo y características similares.

Es importante mencionar que la Ley señala que el otorgamiento de una concesión o asignación tomará en



cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años por parte de la CONAGUA y que se da a conocer en el Sistema Nacional de Información de Agua [8]. En ese sentido, se hace hincapié que una vez otorgada una asignación o concesión no será posible disponer de mayores volúmenes de agua, y para incrementar o modificar de manera permanente la extracción de agua en volumen, caudal o uso específico, invariablemente se deberá tramitar la expedición del título de concesión o asignación respectivo.

Por otra parte, también se señalan los casos donde la CONAGUA sancionará administrativamente a los responsables resaltando los siguientes: a) Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales sin el título respectivo. b) Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales en volúmenes mayores a los autorizados en los títulos respectivos. Para ambos casos se establecen multas que van de 1,950 a 26.000 UMAs (Unidades de Medida y Actualización), que a la fecha de realización de la presente investigación documental equivale a un rango de \$89,095 a \$1,187,940 pesos.

Sin embargo, al realizar la presente investigación se encontró que diferentes organismos públicos carecen de información o bien no cuentan con datos actualizados, principalmente en lo que se refiere al número de concesiones, cantidad de agua concesionada y consumo actual. Por todo esto, resulta imperativo que la normativa aplicada sea depurada y los organismos encargados de su aplicación realicen las labores de investigación de campo y contrasten la información recabada para generar y/o actualizar sus bases de datos y realizar las acciones de gestión correspondientes. Es importante mencionar que aún y con esta limitante, los datos que se presentan en este trabajo son el resultado de la consulta de varias fuentes y que guardan una adecuada aproximación entre ellos.

III. SISTEMAS SFV EN LA AGRICULTURA

El uso de sistemas SFV en sistemas de bombeo para riego agrícola ha cobrado relevancia debido a su potencial para reducir costos energéticos y promover la sostenibilidad [15]-[17]. Dado que el estado de Guanajuato cuenta con una intensa actividad agrícola y se posiciona favorablemente en cuanto a irradiación solar en comparación con otros estados del país, resulta importante analizar el desarrollo de este tipo de sistemas. Cabe señalar que la irradiación solar promedio en el estado se encuentra entre 5.0 y 6.0 kWh/m² por día, lo que lo coloca en un rango competitivo a nivel nacional para el desarrollo de proyectos de energía solar [18].

Básicamente los sistemas SFV se clasifican en sistemas interconectados a la red y aislados. De manera general, cuando son aplicados al bombeo agrícola presentan retos y desafíos que son determinantes para su desarrollo. Uno de los problemas más importantes es la elevada inversión inicial requerida para la instalación de estos sistemas, ya que los

módulos solares, controladores y bombas representan un costo considerable y que puede ser una barrera para los pequeños y medianos agricultores que carecen de acceso a financiamientos o subsidios. Esta barrera financiera es más pronunciada en comunidades rurales donde los recursos económicos son escasos. Además de los costos iniciales, la variabilidad en la disponibilidad de energía solar es otra preocupación importante. La eficiencia de los sistemas de bombeo solar depende directamente de la cantidad de luz solar disponible, lo cual puede ser un problema en días con poca irradiación solar. Esta variabilidad puede afectar la capacidad de los agricultores para garantizar un suministro constante y suficiente de agua para sus cultivos, especialmente en aquellos que requieren riego continuo y uniforme, poniendo en riesgo la productividad agrícola.

El mantenimiento y la durabilidad de los sistemas de bombeo solar también son aspectos críticos por considerar. Aunque estos sistemas requieren menos mantenimiento que las bombas tradicionales que funcionan con combustibles fósiles, aún es necesario realizar inspecciones y mantenimiento periódicos para asegurar su funcionamiento óptimo. La durabilidad de los componentes, como los módulos solares y las bombas, puede verse comprometida por las condiciones ambientales extremas, incluyendo altas temperaturas. Esto puede resultar en la necesidad de reparaciones o reemplazos más frecuentes, lo que añade costos adicionales y complicaciones para los agricultores.

Otro desafío significativo es la falta de conocimiento y capacitación técnica entre los agricultores sobre cómo operar y mantener los sistemas de bombeo solar. La adopción exitosa de esta tecnología requiere un nivel de habilidad y comprensión técnica que muchos agricultores pueden no poseer. La falta de programas de capacitación y asistencia técnica adecuada puede limitar la efectividad y sostenibilidad de los sistemas de bombeo solar. Los agricultores necesitan estar equipados no solo con la tecnología, sino también con el conocimiento para utilizarla de manera eficiente y solucionar problemas cuando sea necesario. Además, la integración de estos sistemas en prácticas agrícolas tradicionales requiere cambios en los hábitos y la mentalidad de los agricultores, lo que puede ser un proceso lento y desafiante.

Con la finalidad de tener una referencia rápida y sencilla que ayude con el conocimiento de estos sistemas y dé una aproximación del aspecto económico, a continuación se describen brevemente los dos tipos de sistemas SFV mencionados y se realiza una comparativa desde el punto de vista económico de las tarifas subsidiadas para riego agrícola contra los costos de estos sistemas, factor que resulta determinante para la toma de decisiones acerca de la instalación de estos sistemas.



A. SISTEMAS INTERCONECTADOS A LA RED

Los sistemas SFV interconectados a la red permiten a los agricultores que sus operaciones no se vean interrumpidas en días nublados o durante la noche, ya que la red proporciona un respaldo logrando energía constante. Sin embargo y a pesar de los incentivos gubernamentales, la instalación inicial de un sistema interconectado puede ser costosa afectando significativamente su rentabilidad y los tiempos de retorno de inversión. En ese sentido, en la mayoría de las referencias consultadas, e.g., [19], se menciona que es posible además vender el excedente de la energía generada a la red, lo que puede resultar en una reducción significativa de los costos energéticos. Sin embargo, dado el paradigma de operación del mercado eléctrico en México, esto no es posible, ya que los precios establecidos para la compra de los excedentes de la energía generada están lejos de ser competitivos, ya que se basan en el valor promedio del precio marginal local, de tal forma que no representan un ingreso significativo para sistemas menores a 0.5 MW [20].

B. SISTEMAS AISLADOS

Los sistemas SFV aislados son especialmente útiles en áreas rurales del estado donde la conexión a la red es limitada o inexistente, de tal forma que los agricultores pueden operar de manera independiente. Además, al no depender de la red, los agricultores no están sujetos a las fluctuaciones de precios de la electricidad ni a posibles cortes de suministro. No obstante, este tipo de sistemas enfrentan retos operativos, económicos y normativos.

Dentro de los problemas operativos que enfrentan este tipo de sistemas se encuentran la capacidad de generación de energía, que puede estar limitada por las condiciones climáticas y la eficiencia de los módulos SFV, lo que podría no ser suficiente para satisfacer las demandas energéticas durante todo el año. En situaciones de alta demanda energética, como durante temporadas de riego intensivo, la capacidad de los sistemas aislados podría ser insuficiente sin un adecuado dimensionamiento y planificación. Dentro de los problemas económicos se puede mencionar el elevado costo del almacenamiento de energía a través de baterías, incrementando significativamente los costos iniciales y de mantenimiento. Sin embargo, se han desarrollado estudios que muestran la viabilidad de este tipo de instalaciones, e.g., [21].

IV. COSTOS, PROBLEMÁTICA ADICIONAL Y POLÍTICAS PÚBLICAS RELACIONADAS CON LOS SISTEMAS SFV

A. BREVE COMPARATIVA DE COSTOS

Se ha mostrado en [22] y [23] que los sistemas SFV interconectados tienen un Costo Nivelado de Energía

(LCOE, por sus siglas en inglés) más bajo comparado con el de los sistemas aislados; sin embargo, ambos sistemas tienen menores LCOE que los que utilizan generadores con combustibles fósiles. Por otra parte, las tarifas subsidiadas denominadas RABT y RAMT representan una barrera importante para el desarrollo de los sistemas SFV interconectados, ya que cuando se realiza un análisis detallado del LCOE de estos sistemas se muestra que su rentabilidad depende de múltiples factores, incluidos los costos de instalación, mantenimiento y las fluctuaciones en la generación de energía debido a las condiciones climáticas.

Cómo se puede observar en la [Tabla III](#) [24], la tarifa subsidiada RABT es muy similar a las tarifas DB1 y DB2. Por otra parte, se muestra también como la tarifa RAMT presenta costos más bajos comparada con las tarifas GDMTO y GDMTH. Particularmente, respecto al cargo por capacidad, la tarifa RAMT es un 42.53% y 48.93% más barata que los cargos correspondientes para las tarifas GDMTO y GDMTH, respectivamente. Por otra parte, se estima que el costo inicial de los sistemas SFV oscila entre \$300,000 y \$500,000 pesos mexicanos por hectárea [25]. Como resultado, cuando se tiene acceso a la red eléctrica resulta evidente que los productores agrícolas prefieran un sistema de bombeo con suministro proveniente de la red eléctrica en lugar de analizar la opción de los sistemas SFV, ya que el costo de la energía representaría el equivalente al costo de la energía consumida por una casa habitación promedio.

B. PROBLEMÁTICA ADICIONAL DE LOS SISTEMAS SFV EN EL SECTOR AGRÍCOLA.

Otro de los aspectos críticos al implementar sistemas SFV en la agricultura es el uso del suelo. Los sistemas tradicionales ocupan áreas significativas, lo que puede reducir la superficie disponible para cultivos. Esto es particularmente relevante en Guanajuato, donde la tierra agrícola es altamente valorada. Además, para una apropiada implementación se requiere una planificación cuidadosa para evitar que las sombras proyectadas por los módulos reduzcan la productividad agrícola. Alternativas como el uso de tierras no cultivables o estructuras flotantes sobre cuerpos de agua han sido propuestas como soluciones viables para minimizar el impacto en la tierra [26]. A pesar de estas soluciones, el costo de oportunidad asociado con el uso de tierras agrícolas fértiles para la instalación de SFV sigue siendo un desafío significativo que debe ser abordado adecuadamente para maximizar los beneficios de ambos sectores.

Por otra parte, la gestión de los recursos hídricos en el estado de Guanajuato representa un desafío cada vez mayor, particularmente en lo que respecta al control y monitoreo de los pozos utilizados para riego agrícola en áreas rurales de difícil acceso. Las instituciones gubernamentales enfrentan serias dificultades para obtener datos precisos sobre estos pozos, y que se deben a una combinación de factores complejos.

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024



TABLA III. TARIFAS FINALES DE SUMINISTRO BÁSICO PARA LA REGIÓN BAJÍO 2024.

División

Bajío

Índice

*Teclee la división y el mes deseado para su consulta

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	Transmisión	Distribución	CENACE	Suministro	SCuMEM	Generación	Capacidad	TOTAL
DB1	Doméstico en Baja Tensión hasta 150 kWh-mes	NA	Fijo	\$/mes	36.26							36.26
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769	1.1889	0.0065		0.0062	0.849	0.550	2.778
DB2	Doméstico en Baja Tensión mayor a 150 kWh-mes	NA	Fijo	\$/mes	36.26							36.26
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769	1.0189	0.0065		0.0062	0.846	0.547	2.602
PDBT	Pequeña Demanda en Baja Tensión hasta 25 kW-mes	NA	Fijo	\$/mes	36.26							36.26
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769	0.9690	0.0065		0.0062	1.770	1.141	4.070
GDBT	Gran Demanda en Baja Tensión mayor a 25 kW-mes	NA	Fijo	\$/mes	362.60							362.6
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	1.788		1.978
			Capacidad	\$/kW		383.90					328.41	712.31
RABT	Riego Agrícola en Baja Tensión	NA	Fijo	\$/mes	36.26							36.26
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769	0.9690	0.0065		0.0062	0.829	0.634	2.622
RAMT	Riego Agrícola en Media Tensión	NA	Fijo	\$/mes	362.60							362.60
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	0.785		0.975
			Capacidad	\$/kW		101.75					166.55	268.30
GDMTO	Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria	NA	Fijo	\$/mes	362.60							362.6
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	1.452		1.642
			Capacidad	\$/kW		101.75					364.72	466.47
GDMTH	Gran Demanda en Media Tensión Horaria	B	Fijo	\$/mes	362.60							362.6
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	0.9303		1.1199
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	1.8154		2.0050
			Variable (Energía)	\$/kWh	0.1769		0.0065		0.0062	2.0976		2.2872
			Capacidad	\$/kW		101.75					423.67	525.42

Otro de los principales problemas es la explotación ilegal de los mantos acuíferos. En Guanajuato como en muchas entidades del país, se ha detectado que algunos agricultores recurren a la perforación de pozos clandestinos para asegurar el suministro de agua, especialmente en regiones donde la disponibilidad del agua es insuficiente [27]. Este uso no regulado de los recursos hídricos ha provocado una sobreexplotación significativa de los acuíferos, contribuyendo a una disminución alarmante de los niveles de agua subterránea en varias zonas del estado. Además, la inseguridad en algunas regiones impide el acceso del personal de las instituciones gubernamentales para inspeccionar y regular estos pozos, ya que el estado ha experimentado un aumento en la violencia relacionada con el crimen organizado, lo que dificulta las operaciones de monitoreo y control de los recursos hídricos en áreas donde los pozos ilegales son más comunes. Esta falta de control no solo agrava la sobreexplotación de los mantos acuíferos, sino que también pone en riesgo la sostenibilidad de la agricultura en el estado. Por parte del sector de los implementadores de sistemas SFV, se deben atender los lineamientos y regulaciones mencionadas anteriormente, ya que de no hacerlo se puede interpretar como complicidad y verse involucrados en problemas legales al respecto.

C. POLÍTICAS PÚBLICAS PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS SFV

En México se ha promovido la implementación de instalaciones fotovoltaicas para bombeo de agua. Por ejemplo, en 2001 y en el periodo 2008-2011 el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) de la Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) impulsó la instalación de 2 mil bombas fotovoltaicas y 480 instalaciones de bombeo solar para uso agrícola en el País [28]. Como resultado, se estimó la reducción de gases de efecto invernadero en 17.7 mil toneladas, reduciendo el consumo a la red eléctrica en 30 MWh y una sustitución de combustibles fósiles de aproximadamente 8.3 millones de litros de combustible diésel.

Recientemente, en el Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024 [29] se sientan las bases para el impulso de las energías renovables en el “Objetivo Prioritario 3: Incrementar las prácticas de producción sostenible en el sector agropecuario y acuícola-pesquero frente a los riesgos agroclimáticos,” y en particular en la “Estrategia Prioritaria 3.2: Promover acciones de adaptación y mitigación al cambio climático para el manejo integral de riesgos; Acción Puntual 3.2.5: Incentivar el uso y transición a energías renovables en las actividades agropecuarias, acuícolas y pesqueras.” Derivado de estas políticas públicas, la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) ha impulsado el bombeo solar a través de la gestión de



financiamientos compartidos. Por ejemplo, en Quintana Roo se han instalado más de 2,487 módulos SFV para bombeo agrícola beneficiando al menos a siete comunidades [30]. Por su parte, el Gobierno del Estado de Guanajuato a través de la Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural (SDAyR) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) emiten constantemente convocatorias para acceder a recursos que se apliquen a mejorar la productividad del sector agrícola, de entre los que se mencionan la implementación de “energías alternativas” [31]. Sin embargo y como se mencionó anteriormente, se requiere mayor conocimiento para aprovechar este tipo de programas en el desarrollo de sistemas SFV aplicados al bombeo agrícola.

Finalmente, y basado en la experiencia de los autores al realizar la presente investigación, existe una falta de información por parte del Gobierno Mexicano y de las Entidades Federativas acerca del fomento, desarrollo e instalación de este tipo de sistemas. Cuando se habla del desarrollo del sector agrícola, la mayoría de los resultados reportados se centran en la captación de agua, el incremento de la productividad de las cosechas, y los subsidios gestionados, incluyendo el subsidio a la tarifa eléctrica, dejando de lado los resultados obtenidos por la implementación de fuentes de energía renovables.

V. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha mostrado como en el estado de Guanajuato la agricultura depende en gran medida del uso de pozos para riego debido a la escasez de recursos hídricos superficiales. Sin embargo, esta práctica ha generado desafíos significativos como la sobreexplotación de los acuíferos, lo que ha llevado a déficits hídricos anuales. La sobreexplotación de los acuíferos se ve agravada por la perforación ilegal de pozos en áreas donde la infraestructura hídrica es insuficiente, lo que contribuye a la disminución de los niveles de agua subterránea. Además, la inseguridad en algunas regiones rurales de Guanajuato ha dificultado la supervisión y regulación de estos pozos, lo que pone en riesgo la sostenibilidad de la agricultura en el estado.

La dependencia mencionada representa una gran oportunidad para el desarrollo de sistemas SFV para bombeo agrícola en el estado. Aunado a ello, la alta irradiación solar en la región posiciona al estado como uno de los primeros a nivel nacional para el desarrollo de proyectos de energía solar en general. La necesidad de reducir costos energéticos y la dependencia de fuentes de energía no renovables, especialmente en áreas rurales donde la infraestructura eléctrica es limitada, representan otros factores para el desarrollo de estos sistemas en la región. Sin embargo, uno de los mayores desafíos para la adopción de esta tecnología es la elevada inversión inicial, factor que puede ser un obstáculo significativo para pequeños y medianos

agricultores, quienes a menudo carecen de acceso a financiamiento o subsidios adecuados.

A pesar de las barreras económicas, la tecnología SFV ofrece una solución viable para mejorar la sostenibilidad en el sector agrícola al reducir la sobreexplotación de los mantos acuíferos mediante sistemas de riego más eficientes. Para maximizar su efectividad, es fundamental capacitar a los agricultores en el uso y mantenimiento de estos sistemas y asegurar la disponibilidad de componentes y servicios de reparación en áreas rurales.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas agrícolas de los distritos de riego.” Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [2] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas agrícolas de las unidades de riego.” Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-unidades-de-riego>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, “Esquema tarifario vigente.” Disponible en: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Ne-gocio.aspx>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [4] Comisión Federal de Electricidad, “Tarifa RABT.” Disponible en: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Ta-rifas/RiegoAgricolaBT.aspx>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [5] Comisión Federal de Electricidad, “Tarifa RAMT.” Disponible en: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Ta-rifas/RiegoAgricolaMT.aspx>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [6] DNV, “Energy transition outlook 2023,” Disponible en: <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [7] Comisión Nacional del Agua, “Atlas del agua en México,” Edición 2018. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AA-M2018.pdf>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [8] Comisión Nacional del Agua, “Sistema Nacional de Información del Agua.” Disponible en: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [9] Comisión Nacional del Agua, “Usos del agua.” Disponible en: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/UsosAgua/#/totales>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [10] Comisión Nacional del Agua, “Sistema de información de acuíferos y cuencas.” Disponible en: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/index.html>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [11] Comisión Nacional del Agua, “Aguas subterráneas.” Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-subterranea>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [12] Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, “Sistema de indicadores ambientales y de sustentabilidad,” Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/micro/siaseg/agua.php>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [13] Fondo para la comunicación y la educación ambiental A. C., “Estadísticas del agua en México,” Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021-conagua/>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [14] Cámara de Diputados: LXV Legislatura, “Leyes federales vigentes: Ley de aguas nacionales.” Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [15] A. Cota, et al., “Ten-year reliability assessment of photovoltaic water pumping systems in Mexico,” in *Proc. Solar 2004*, Portland, OR, USA, 2004, pp. 1–6.
- [16] J. Walston Leroy, et al., “Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals,” *J. Front. in Sustain. Food Systems*, vol. 6, pp. 1–13, Sept. 2022.



- [17] R. Carrausse and X. A. de Sartre, "Does agrivoltaism reconcile energy and agriculture? Lessons from a French case study," *J. Energy, Sustain and Soc.*, vol. 13, no. 8, pp. 1-14, Apr. 2023.
- [18] NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), Data Access Viewer (DAV) v2.3.6, Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [19] A. Sarr, Y. M. Soro, A. K. Tossa, and L. Diop, "Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review" *Processes*, vol. 11, no. 3:948, pp. 1-27, Mar. 2023.
- [20] Diario Oficial de la Federación, RES/142/2017. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5474790&fecha=07/03/2017#gsc.tab=0.
- [21] D. E. Babatunde et al., "Feasibility analysis of an off-grid photovoltaic-battery energy system for a farm facility," *Int. J. Elect. and Comp. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 2874-2883, Jun. 2020.
- [22] S. R. Mantri, R. S. Kasibhatla, and V. K. B. Chennapragada, "Grid-connected vs. off-grid solar water pumping systems for agriculture in India: a comparative study" *J. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Apr. 2020Mar. 2003. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1745957>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [23] A. Mérida García et al., "Comparing the environmental and economic impacts of on- or off-grid solar photovoltaics with traditional energy sources for rural irrigation systems," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 895-904, Sept. 2019.
- [24] Comisión Reguladora de Energía, "Memorias de cálculo de tarifas de suministro básico." Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/memorias-de-calculo-de-tarifas-de-suministro-basico>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [25] J. J. Bolaños, R. Perea, M. Rivera, "Propuesta de bombeo solar para un sistema de riego agrícola semi automatizado mediante un tanque elevado en el municipio de Tecamác, Estado de México," Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2019.
- [26] Organización de las Naciones Unidas: Programa para el Medio Ambiente, "Siete formas de restaurar las tierras, detener la desertificación y combatir la sequía." Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/siete-formas-de-restaurar-las-tierras-detener-la-desertificacion-y>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [27] Comisión Nacional del Agua, "Clausura CONAGUA pozos irregulares en León, Guanajuato." Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/prensa/228578>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [28] Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Fideicomiso de Fondos Compartidos. Disponible: <https://www.gob.mx/firco>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [29] Gobierno de México, "Programa sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024." Disponible en:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/708557/PROGRAMA_SECTORIAL_2020_2024baja.pdf.

- [30] J. Zarco, "Con una capacidad instalada de 1.3 MW, sistemas fotovoltaicos extraen agua de riego en Quinta Roo," *pv-magazine-mexico.com*. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/04/13/con-una-capacidad-instalada-de-1-3-mw-sistemas-fotovoltaicos-extraen-agua-potable-en-quinta-roo/>

- [31] Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural, "Convocatorias." Disponible en: <https://sdayr.guanajuato.gob.mx/>. Fecha de acceso: 12/08/2024.

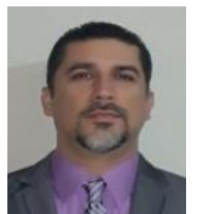
BIOGRAFÍAS



ELMER G. ROBLES LECONA Actualmente se encuentra cursando el último semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato. Sus áreas de interés son la eficiencia energética, calidad de la energía y energías renovables.



VÍCTOR 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.



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.

Diseño del rotor de un aerogenerador ASWT para entornos urbanos

DANIEL JUAN JOSÉ ORTIZ VELÁZQUEZ^{1*}, ERIK ROSADO TAMARIZ¹, RAFAEL CAMPOS AMEZCUA¹.

¹Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México.

*Autor contacto. m23ce147@cenidet.tecnm.mx

RESUMEN: La creciente demanda de energía renovable y la necesidad de edificios energéticamente autónomos han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías. En este contexto, se presenta el Aerogenerador en Espiral de Arquímedes (ASWT). A diferencia de diseños previos, el ASWT propuesto incorpora aspas en espiral mejoradas mediante sus parámetros de diseño. Se realizaron pruebas experimentales del rotor libre en condiciones de bajas velocidades del viento, comparando su desempeño con respecto a un diseño de referencia reportado en la literatura. Los resultados mostraron que el ASWT propuesto inicia su rotación a una velocidad del viento 31.5% menor y supera en un 21.8% las velocidades de rotación del diseño de referencia. Estas mejoras evidencian una notable eficiencia mejorada, permitiendo así la generación de mayor energía en condiciones de viento desfavorables, lo que sugiere un gran potencial de implementación en aplicaciones en entornos con características de velocidades del viento variadas.

PALABRAS CLAVE — Aerogenerador, Espiral de Arquímedes, Parámetros de diseño, Pruebas experimentales.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha crecido la demanda de energía renovable y el desarrollo de diseños de edificios energéticamente autónomos. Sin embargo, la incorporación y el desarrollo de aerogeneradores en entornos urbanos se han visto limitados por los desafíos asociados con un entorno en el que la fuente de energía, el viento, puede ser muy inestable debido a la morfología y configuración urbana.

Los aerogeneradores se clasifican según la orientación de su eje de rotación en dos tipos: aerogeneradores de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés) y de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés). Los aerogeneradores de eje horizontal comúnmente conocidos como tipo Danés (tres aspas) [1], han demostrado ser poco eficientes para aplicaciones de entornos urbanos [2]. Con el objetivo de aprovechar al máximo la energía cinética del viento en áreas urbanas, se ha propuesto un nuevo tipo de aerogenerador de eje horizontal: el Aerogenerador en Espiral de Arquímedes (ASWT, por sus siglas en inglés). La Fig. 1 muestra una comparación de las geometrías y topologías entre los aerogeneradores HAWT, VAWT y ASWT. Según la literatura, los aerogeneradores ASWT tienen la capacidad de operar a bajas velocidades del viento y ofrecen un mejor rendimiento frente a flujos turbulentos, gracias a su diseño innovador [3].

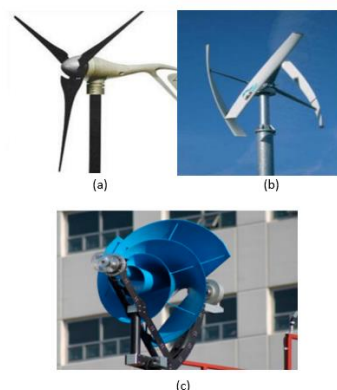


Fig. 1. Comparación de diferentes tipos de aerogeneradores (a) HAWT, (b) VAWT, (c) ASWT [2][4].

Se han llevado a cabo diversas investigaciones para evaluar cómo la variación de los parámetros de diseño de los aerogeneradores ASWT afecta su desempeño. Los principales parámetros analizados en la literatura incluyen entre otros, los ángulos de aspas, la relación de aspecto y el espesor de las aspas.

Song et. al. [3] realizaron investigaciones numéricas y experimentales de diferentes ángulos de aspas en la geometría del aerogenerador ASWT, como se puede observar en la Fig. 2. Concluyeron que la configuración con ángulos variables (30-45-60°) ofrece un mejor desempeño, ya que el coeficiente de potencia ($C_p=0.235$) es superior en comparación con la configuración de ángulos de aspa fijos. De similar manera Kamal et al. [5] realizaron un estudio experimental y numérico incluyendo la variación de los ángulos de las aspas y el efecto del espesor. El espesor se

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024

modificó en un rango de 1 a 3.5 mm, con incrementos de 0.5 mm. Los ángulos de las aspas se ajustaron de la siguiente manera: para la primera aspa, se probaron ángulos de 20°, 25°, 30° y 35°, mientras que, para la segunda, con ángulos de 40°, 45°, 50° y 55°, y para la tercera, ángulos de 55°, 60° y 65°. Concluyeron que la configuración que ofreció el mejor desempeño para el aerogenerador tipo ASWT fue de 25°, 50° y 60° para la primera, segunda y tercera aspa, respectivamente, con un espesor de 2 mm.

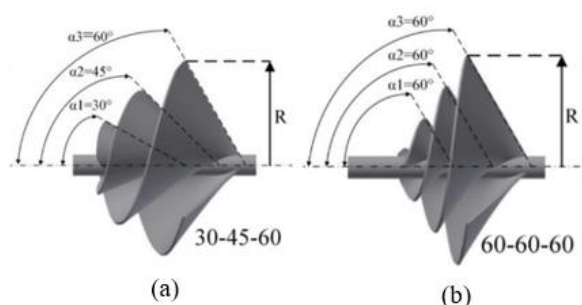


Fig. 2. Configuración de ángulos en el aerogenerador ASWT (a) Ángulos variables, (b) Ángulos fijos [5].

Hamid *et al.* [6] realizaron simulaciones numéricas para analizar dos tipos de perfiles en el espiral (logarítmico y Arquímedes), evaluando como los cambios en los ángulos de apertura del aerogenerador afectan el rendimiento, como se muestra en la Fig. 3. Para cada perfil de espiral, el ángulo de apertura se varió de 40° a 90°, con incrementos de 10°. El perfil de espiral de Arquímedes demostró un mejor desempeño en comparación con el perfil logarítmico. El máximo (C_p) del perfil de Arquímedes fue de 0.2683 con 60° de apertura de espiral.

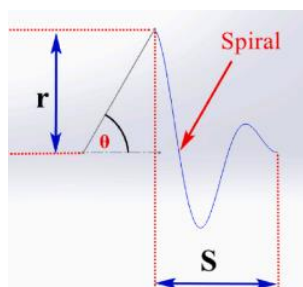


Fig. 3. Descripción de ángulo de apertura (θ) y espiral [6].

Suntivarakorn *et al.* [7] diseñaron una turbina en espiral inspirada en la proporción áurea para el diseño de la espiral del rotor. Analizaron el impacto del número de aspas (2-6) en el torque de la turbina de 10 cm, como se observa en la Fig. 4. Las pruebas de laboratorio les permitieron concluir que el número óptimo de aspas es de tres, con una eficiencia del 45.5%.

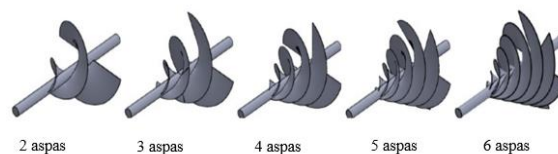


Fig. 4. Comparación de los distintos números de aspas en el diseño de una turbina en espiral [7].

Labib *et al.* [8] evalúan mediante simulaciones numéricas el desempeño aerodinámico de los aerogeneradores tipo ASWT, centrando su análisis en la modificación de la relación de aspecto, es decir, la relación entre el diámetro y la longitud (D/L), como se muestra en la Fig. 5. Examinaron cinco modelos diferentes con relaciones de aspecto de 1.0, 1.25 y 1.5, con elongación adelante y atrás. Los resultados demostraron que, con una relación de aspecto de 1.0, se obtiene el mejor coeficiente de potencia, alcanzando un valor final de $C_p=0.249$ a bajas relaciones de velocidad del viento.

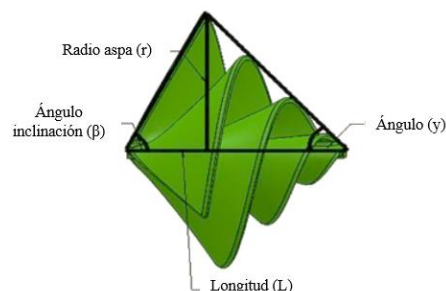


Fig. 5. Parámetros geométricos del aerogenerador ASWT para la relación de aspecto [8].

El presente trabajo está estructurado en las siguientes secciones: en la sección II se describe el proceso de desarrollo y selección de parámetros de diseño para la propuesta de diseño del aerogenerador ASWT, así como el proceso de evaluación y comparación del diseño propuesto con un modelo de referencia en una prueba experimental, en la sección III se muestran los resultados obtenidos en dicha prueba, y finalmente, la sección IV se presentan las conclusiones derivadas de este estudio.

II. DESARROLLO

Con el objetivo de diseñar un aerogenerador ASWT que sea capaz de operar en un amplio intervalo de velocidades del viento, incluyendo bajas velocidades y con una adecuada recuperación ante los flujos turbulentos, se optó por combinar varios parámetros de diseño. Esta combinación se seleccionó para lograr el rendimiento deseado en las condiciones de operación propuestas.

A. SELECCIÓN DE PARAMETROS DE DISEÑO

A continuación, se analizan los parámetros de diseño evaluados para la propuesta de la nueva geometría del aerogenerador ASWT:

- Número de aspas.

Se optó por un diseño del aerogenerador ASWT con tres aspas, ya que en la literatura indica que esta configuración ofrece el mejor desempeño en términos de torque y potencia en comparación con las configuraciones de dos, cuatro, cinco y seis aspas, como se muestra en la [Tabla I](#).

TABLA I. COMPARACIÓN DE TORQUE OBTENIDO PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES RESPECTO AL NÚMERO DE ASPAS BASADA EN LA GEOMETRÍA DE REFERENCIA [7].

Velocidad fluido (m/s)	Torque ($N \cdot m \times 100$)					
	2-aspas		3-aspas		4-aspas	
	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2
0.5	41.87	38.73	44.87	39.77	33.49	30.88
1	53.38	50.76	56.33	49.72	43.96	42.39
2	79.55	77.45	81.64	79.02	71.17	68.03

TABLA II. COMPARACIÓN DE TORQUE OBTENIDO PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES RESPECTO AL NÚMERO DE ASPAS BASADA EN LA GEOMETRÍA REFERENCIA [7]. (CONTINUACIÓN)

Velocidad fluido (m/s)	Torque ($N \cdot m \times 100$)			
	5-aspas		6-aspas	
	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2
0.5	31.40	27.24	31.40	27.24
1	37.68	34.54	37.68	34.54
2	59.66	57.57	59.66	57.57

Adicionalmente, en la [Fig. 6](#) se presenta una comparación de la eficiencia entre un aerogenerador tipo ASWT de tres aspas y una turbina tipo propela. Se observa que el aerogenerador tipo ASWT muestra un mejor desempeño, especialmente a bajas velocidades.

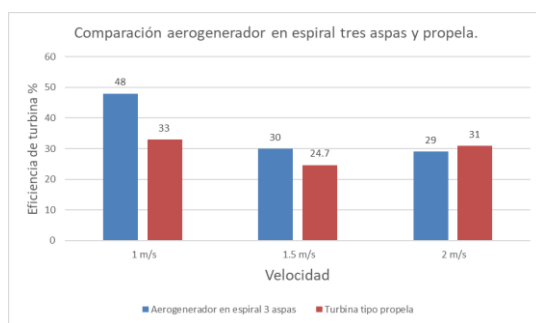


Fig. 6. Comparación de porcentaje de eficiencia entre aerogenerador en espiral con tres aspas y una turbina tipo propela basada en la referencia [7].

- Tipo de espiral.

Se optó por incorporar un espiral tipo Arquímedes al diseño propuesto del aerogenerador ASWT, ya que ha

demostrado tener un mejor desempeño en términos del Coeficiente de Potencia Máximo ($C_p \max$) y un mayor intervalo de operación para la relación de velocidad de punta del aspa (TSR, por sus siglas en inglés) en comparación con el espiral logarítmico, como se muestra en la [Fig. 7 \(b\)](#).

A partir del comportamiento mostrado en la [Fig. 7 \(a\)](#), se puede observar que un perfil logarítmico presenta un menor C_p máximo, y un descenso en el C_p a bajas relaciones de TSR, lo que indica un rango de operación menor. Es decir, a pesar de que la velocidad de viento aumente, la capacidad de giro y captación de energía del rotor no incrementa.

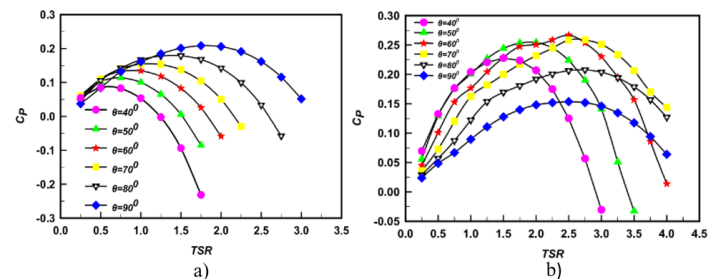


Fig. 7. Comparación de C_p máximo con distintos ángulos de apertura (a) espiral logarítmico, (b) espiral de Arquímedes [6].

- Relación de aspecto.

Se decidió utilizar una relación de aspecto (D/L) igual a uno, con elongación delantera debido a que ofrece el mayor rango de operación de TSR y presenta el C_p más alto en un rango de operación bajo, lo que la hace ideal para las bajas velocidades de viento identificadas en la caracterización previa. Esta elección se ilustra en la [Fig. 8](#), que compara esta configuración con otras opciones de relación de aspecto. Además, una relación de aspecto menor podría ocasionar fluctuaciones y vibraciones excesivas debido a la elongación, lo que reduciría tanto la eficiencia como la vida útil del aerogenerador.

Coefficiente de potencia VS Relación de Velocidad de Punta (TSR)

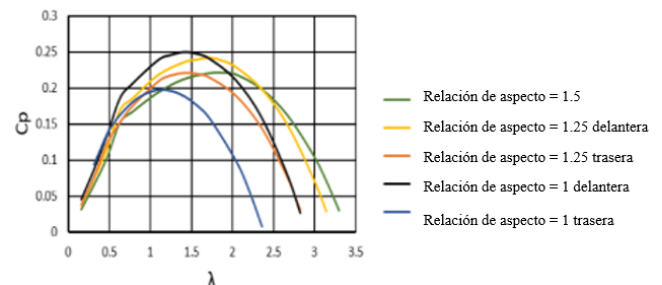


Fig. 8. Comparación de C_p vs TSR para las cinco relaciones de aspecto [8].

- Ángulo de apertura.

La elección de un ángulo de apertura de 60° se basa en su rendimiento superior en comparación con otros ángulos evaluados, que iban desde 30° hasta 90° con incrementos de

10°. Este ángulo ofrece un amplio rango de operación para el TSR y presenta un C_p máximo más alto entre todos los ángulos analizados, como se observa en la Fig. 9.

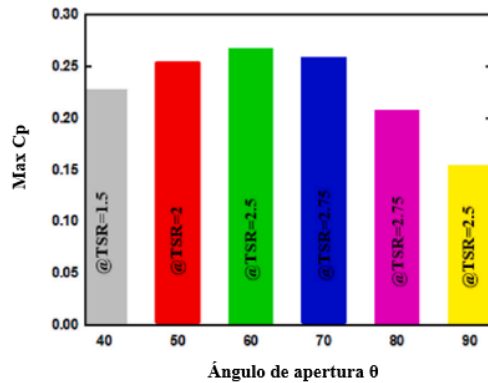


Fig. 9. Comparación de C_p máximo con distintos ángulos de apertura [6].

- Ángulo de aspas.

A pesar de que la configuración de ángulos variables (30-45-60°) en un ASWT ofrece un C_p máximo superior en comparación con la configuración de ángulos fijos, esta última presenta ventajas significativas en entornos urbanos. Se ha optado por la configuración del ángulo de aspas fijo 60-60-60°, ya que se adapta mejor a las exigencias y necesidades de los entornos urbanos en cuanto al recurso eólico. La comparación entre ambas configuraciones reveló, que los ángulos variables tienden a generar vórtices en la punta del asa de manera más irregular, mientras que los ángulos fijos ofrecen una mayor estabilidad en la recuperación de la estela de los vórtices y son más resistentes a vientos variables o turbulentos.

La selección de diversos parámetros de diseño tiene el propósito de potenciar el rendimiento del aerogenerador ASWT. El objetivo es aprovechar las ventajas de cada parámetro para lograr un equilibrio óptimo de rendimiento general. En la Tabla II se presenta un resumen de los parámetros de diseño seleccionados.

TABLA II. PARÁMETROS DE DISEÑO SELECCIONADOS PARA EL AEROGENERADOR PROPUESTO.

Parámetro de diseño	Selección
Número de aspas	Tres aspas
Tipo de espiral	Espiral de Arquímedes
Relación de aspecto	Relación de aspecto de uno
Ángulo de apertura	60° para el ángulo de apertura
Ángulo de aspas	Ángulos fijos de 60°

B. DISEÑO DEL AEROGENERADOR ASWT

Los parámetros seleccionados en la etapa anterior fueron utilizados como base para el diseño geométrico CAD 3D del aerogenerador ASWT propuesto, empleando un software CAD especializado. Esta herramienta permitió una visualización más precisa del modelo, permitiendo observar los cambios implementados en comparación con las propuestas documentadas en la literatura para un aerogenerador ASWT, como se muestra en la Fig. 10.

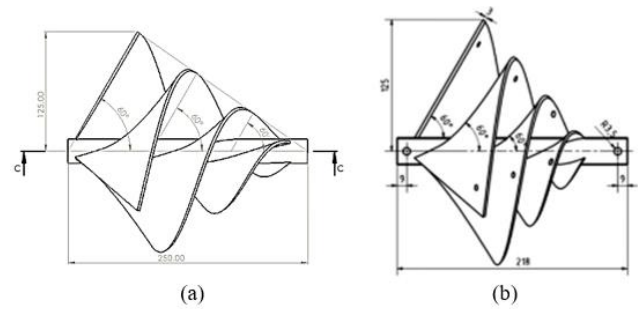


Fig. 10. Comparación de diseño del (a) aerogenerador propuesto y (b) aerogenerador de Kamal *et al.* [4].

En la Fig. 11 se destaca que en el diseño del aerogenerador ASWT propuesto en este trabajo con una configuración de ángulos fijos de 60-60-60°, junto con una elongación hacia adelante y una relación de aspecto de uno, permite una distribución más efectiva de las tres aspas a lo largo del rotor. Esta configuración evita que las aspas estén demasiado próximas entre sí, esperando que mejore el flujo del fluido a lo largo del rotor. Además, la Fig. 12 muestra los detalles del diseño, incluyendo los ángulos de 60°, un radio del rotor de 125 mm y una longitud de 250 mm.

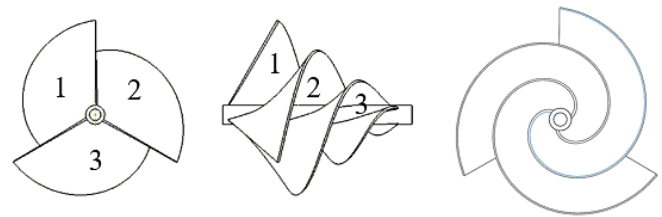


Fig. 11. Propuesta de diseño del aerogenerador ASWT con tres aspas, ángulos fijos, relación de aspecto de uno y espiral de Arquímedes.

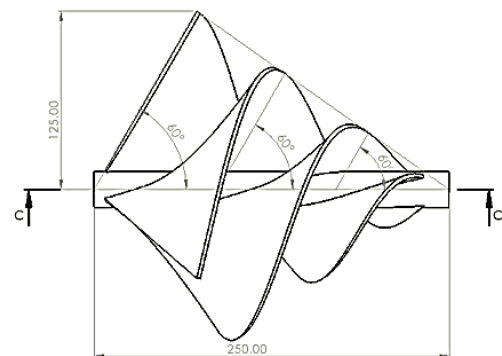


Fig. 12. Medidas del aerogenerador ASWT propuesto.

C. MANUFACTURA DEL AEROGENERADOR ASWT

Para la manufactura del rotor del aerogenerador ASWT propuesto se utilizó la técnica de manufactura aditiva mediante impresión 3D, empleando PLA (ácido Poliláctico) como material para la fabricación. Este material se seleccionó por su facilidad de procesamiento y por ofrecer propiedades mecánicas como la rigidez y resistencia adecuada para el análisis experimental del diseño. Este proceso de fabricación permitió llevar a cabo la creación precisa de las características descritas del diseño propuesto, logrando detalles exactos y una rápida producción del modelo (Fig. 13). Este modelo fue posteriormente utilizado en las pruebas experimentales.



Fig. 13. Modelo del rotor del aerogenerador propuesto en impresión 3D.

D. EXPERIMENTACIÓN

Las pruebas experimentales se realizaron en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet), en el Campus Xochitepec (ver Fig. 14). El objetivo de estas pruebas fue evaluar la velocidad de giro del rotor libre en comparación con un modelo descrito en la literatura, que utiliza una configuración de ángulos variables Fig. 15 (a) y el diseño propuesto Fig. 15 (b).



Fig. 14. Pruebas experimentales en el Cenidet Campus Xochitepec.

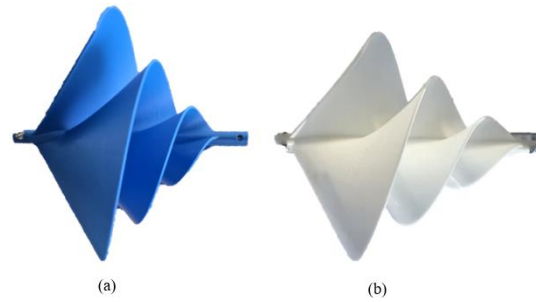


Fig. 15. Modelos físicos del rotor del aerogenerador ASWT (a) ángulos variables, (b) diseño propuesto.

Las pruebas se realizaron a una altura de 1.75 metros, a una temperatura promedio de 30 °C y una humedad relativa del 52.7%. Los datos fueron obtenidos mediante un anemómetro digital HT6905, que registró la velocidad del viento durante las pruebas.

La velocidad de giro del rotor se midió utilizando un tacómetro digital por contacto DT-6236C.

III. RESULTADOS

Durante la prueba, se observó el giro de ambos diseños a la misma altura, como se puede observar en la Fig. 16. Sin embargo, se identificaron diferencias significativas entre ambos modelos, específicamente al iniciar la rotación del rotor. El diseño de referencia requería una mayor velocidad y fuerza del viento para poder comenzar a operar, mientras que el diseño del aerogenerador propuesto iniciaba su giro con mayor facilidad y mantenía su rotación durante más tiempo. Las velocidades de rotación alcanzadas por cada rotor se detallan en la Tabla III, donde se evidencia que el diseño propuesto requiere una velocidad del viento un 31.5% menor para poder romper su inercia y comenzar a girar en comparación con el diseño de referencia. Además, las velocidades de giro máximas y mínimas del diseño propuesto fueron un 21.8% y un 45.4% mayores, respectivamente, en relación con el diseño de referencia.



Fig. 16. Pruebas experimentales de ambos diseños de rotor del aerogenerador ASWT.



TABLA III. RESULTADOS DE PRUEBA EXPERIMENTAL DE AMBOS AEROGENERADORES ASWT.

	Diseño propuesto	Diseño de referencia	Porcentaje de diferencia
Velocidad del viento (m/s)	1.57	2.28	-31.5%
Velocidad de giro máxima (rpm)	224.6	184.4	21.8%
Velocidad de giro mínima (rpm)	71.5	49.1	45.4%

IV. CONCLUSIONES

El trabajo presente es un primer acercamiento al diseño de un aerogenerador ASWT basada en la modificación de sus parámetros de diseño.

Al modificar la geometría, se evidenciaron diferencias en el rendimiento bajo la misma velocidad del viento. Las pruebas experimentales demostraron que las variaciones en la forma y el ángulo de las aspas en espiral influyen de manera significativa en el funcionamiento del aerogenerador.

El modelo propuesto ha demostrado una mayor facilidad para iniciar su operación a bajas velocidades del viento, requiriendo una velocidad un 31.5% menor para poder iniciar su operación, y alcanzando una velocidad de giro máxima un 21.8% superior en comparación con el modelo de referencia de ángulos variables. Esto abre la posibilidad de realizar un estudio más detallado sobre las mejoras en el rendimiento del aerogenerador ASWT propuesto en relación con los modelos previamente reportados en la literatura. Se observa que, con ajustes en sus parámetros geométricos, el diseño del aerogenerador puede adaptarse a entornos más específicos, considerando parámetros como las velocidades del viento y la intensidad de turbulencia del sitio. La investigación sugiere que, con ajustes continuos y mejoras en el diseño, este tipo de aerogeneradores tiene el potencial de incrementar la eficiencia en la generación de energía eólica de baja potencia, especialmente en áreas donde las condiciones del viento y el espacio no son ideales para los diseños tradicionales.

REFERENCIAS

- [1] M. Khudri Johari, M. Azim A. Jalil, y M. Faizal Mohd Shariff, "Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT)", *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, núm. 4.13, pp. 74–80, oct. 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.13.21333.
- [2] M. Ozeh, A. Mishra, y X. Wang, "Mini wind turbine for small scale power generation and storage (Archimedes wind turbine model) ",

International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2018, pp. 1–7, nov. 2018.

- [3] K. Song, H. Huan, y Y. Kang, "Aerodynamic Performance and Wake Characteristics Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Rotors with Different Blade Angle", *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 1, p. 385, dic. 2022, doi: 10.3390/en16010385.
- [4] A. Arzuaga et al., "Low-Cost Maximum Power Point Tracking Strategy and Protection Circuit Applied to an Ayanz Wind Turbine with Screw Blades", *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 17, p. 6204, ago. 2023, doi: 10.3390/en16176204.
- [5] A. M. Kamal, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, "Blade design effect on Archimedes Spiral Wind Turbine performance: Experimental and numerical evaluations", *Energy*, vol. 250, p. 123892, jul. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123892.
- [6] H. Hamid y R. M. Abd El Maksoud, "A comparative examination of the aerodynamic performance of various seashell-shaped wind turbines", *Heliyon*, vol. 9, núm. 6, p. e17036, jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17036.
- [7] R. Suntivarakorn, S. Wanchat, y W. Monatrakul, "An Experimental Study of Electricity Generation Using a Horizontal Spiral Turbine", *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 532–536, nov. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.215.
- [8] A. Labib, A. AbdelGawad, y M. Nasseif, "Effect of Aspect Ratio on Aerodynamic Performance of Archimedes Spiral Wind Turbine", *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 32, núm. Mechanical Engineering, pp. 66–72, nov. 2020, doi: 10.21608/eijest.2020.45256.1017.

BIOGRAFÍAS



InnovaTecNM.

DANIEL JUAN JOSÉ ORTIZ VELÁZQUEZ Estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico e Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica de Emiliano Zapata del Estado de Morelos. Interés por la ingeniería mecánica y el desarrollo de nuevas tecnologías que promuevan el desarrollo sostenible. Líder de proyecto en el



ERIK ROSADO TAMARIZ Ingeniero Mecánico y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Veracruz. En 2020, completó un Doctorado en Ciencias de Ingeniería en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Se desempeñó como investigador en las Gerencias de Turbomaquinaria e Ingeniería Civil en el INEEL de enero de 2008 a enero de 2023. Además, desde 2017 es profesor de cátedra en el Departamento de Mecatrónica de la Escuela de Ingeniería y Ciencias en el Tecnológico de Monterrey. Actualmente, es profesor investigador en el Tecnológico Nacional de México, Campus CENIDET. Ha publicado siete artículos en revistas indizadas y más de 20 artículos en congresos nacionales e internacionales. Ha sido revisor en revistas como el *Journal Energy Reports*, *Cuadernos Temáticos del Conahcyt*, *Planeas* y *Pronaces-ecc*, así como dictaminador de la obra "Transición energética, justa y sustentable. Contexto y estrategias para México (Primera Sección) del Conahcyt. Sus líneas de investigación incluyen sistemas para la generación y almacenamiento de energía, desarrollo y diseño de vehículos autónomos, y técnicas de modelado, simulación y optimización. Es miembro del SNII, Nivel I.



RAFAEL CAMPOS AMEZCUA. En el año 2000, se graduó como Ingeniero Mecánico en el Instituto Tecnológico de Morelia y obtuvo una Maestría en Ciencias con especialidad en Mecánica de Fluidos en la Université Pierre et Marie Curie en 2005. En 2009, completó un Doctorado en Ingeniería Mecánica en la École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers en París. Desde 2000, trabajó en la Gerencia de Turbomaquinaria del INEEL, centrándose en la evaluación y extensión de

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024



D. Ortiz *et al.*: Diseño del rotor de un aerogenerador ASWT para entornos urbanos

vida útil de turbomaquinaria. A partir de 2009, se unió a la Gerencia de Energías No Convencionales del INEEL para diseñar aerogeneradores. Fue Investigador en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM entre 2012 y 2017, y actualmente es Profesor en el Tecnológico Nacional de México, Campus Cenidet, trabajando en Diseño Mecánico y Energías Sustentables. Ha trabajado en proyectos de investigación sobre aerodinámica y

aeroelasticidad de aerogeneradores, y en la simulación de mezclas difásicas para bombas y turbinas hidráulicas. Fue editor invitado en la revista *Energías sobre energías eólicas*. Ha publicado 22 artículos en revistas JCR, 3 capítulos de libro, y 30 artículos en congresos. Además, posee una patente y es miembro del SNII, nivel II.



El STATCOM: Estado del Arte, Topologías, Técnicas de Modulación, Control, Aplicaciones y Tendencias Futuras

DIEGO GUTIÉRREZ TORRES¹, JUAN M. RAMIREZ¹, JOSÉ LOZANO GARCIA²

¹CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara

²Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca

diego.gutierrez@cinvestav.mx

joramirez@cinvestav.mx

jm.lozano@ugto.mx

RESUMEN Este trabajo presenta una revisión del estado del arte del compensador estático sincrónico (STATCOM), destacando su evolución tecnológica, técnicas de modulación, estrategia de control, aplicaciones y las tendencias futuras. El STATCOM es un dispositivo clave para la estabilidad y calidad de los sistemas eléctricos, mejorando la compensación de energía reactiva y la estabilidad de tensión. Su evolución comenzó en las décadas de los 90's con la aparición de la tecnología convertidor fuente de tensión (VSC), y ha avanzado hacia arquitecturas modulares multinivel (MMCC) e híbridas, que optimizan la integración de energías alternas y mejoras en el control de potencia.

PALABRAS CLAVE— Static synchronous compensator (STATCOM), Flexible AC transmission systems (FACTS), convertidores multinivel.

I. INTRODUCCIÓN

Las principales áreas que constituyen un sistema eléctrico de potencia en corriente alterna son generación, transmisión, subtransmisión, distribución y cargas. La generación tradicional se basa en el uso de máquinas síncronas rotatorias, mientras que la generación alternativa utiliza dispositivos electrónicos como interfaz con fuentes de energía renovable. Las redes de transmisión, subtransmisión y distribución son esencialmente sistemas de parámetros distribuidos, en su mayoría de carácter reactivo, diseñados para operar a diferentes niveles de tensión (alta, media y baja). Las cargas, que pueden ser síncronas, asíncronas o pasivas, generalmente consumen potencia activa y reactiva [1-3]. En sistemas de potencia existen dos fenómenos, subcompensación y sobrecompensación, provocados por desequilibrios en la compensación de potencia reactiva en líneas de transmisión. En ese sentido, y como solución a dichos fenómenos, surgen los dispositivos para compensación de reactivos [4]. El propósito de la compensación reactiva es modificar las características eléctricas, naturales, de la línea de transmisión para mejorar la compatibilidad con la demanda de carga dominante [4-6]. Las primeras iniciativas para la compensación reactiva surgieron de las limitaciones fundamentales de la transmisión tradicional de energía en corriente alterna (distancia, estabilidad y controlabilidad del flujo). Estas limitaciones podían mitigarse de forma rentable mediante una compensación controlada [5]. Las primeras

propuestas surgen a finales de los años 70, con los primeros dispositivos, basados en la electrónica de potencia, y controles para la compensación reactiva [7-9]. En el marco de la iniciativa Flexible AC Transmission System (FACTS) del Electric Power Research Institute (EPRI), se realizaron avances tecnológicos específicos para tratar de encontrar soluciones a estos problemas y limitaciones [10]. El objetivo final de esta iniciativa era proporcionar un control en tiempo real de los sistemas de transmisión. Se han adoptado dos enfoques técnicos en la creación de dispositivos FACTS. En el primer grupo se emplean impedancias reactivas o transformadores con cambio de tap y utilizan interruptores tiristores como dispositivos de accionamiento, mientras que en el segundo se emplean convertidores estáticos auto conmutados como fuentes de tensión controladas [4].

El STATCOM es un dispositivo FACTS de compensación de potencia reactiva (Q) con conexión en derivación, y surge como una evolución superior al static var compensator (SVC, basado en tiristores con conmutación de línea) [6]. Las principales características de los STATCOM son un tiempo de respuesta rápido, volumen reducido, operación a diferentes niveles de tensión, versatilidad operativa y propiedades dinámicas excepcionales en diversas circunstancias de operación [4-6][11]. Otros nombres que hacen reverencia a este dispositivo son: static var generator (SVG), advanced static VAR compensator (ASVC), STATic

CONDenser (STATCON), VSC-based SVC y static synchronous compensator (SSC or S2C) [12].

Las aplicaciones del STATCOM van desde aumentar la capacidad de transmisión, amortiguación de las oscilaciones del sistema eléctrico, análisis de fallas, filtros activos (THD), estabilidad transitoria, entre otros [4-6][13-15].

El presente trabajo se encuentra dividido en siete secciones: (ii) principio de operación, (iii) topologías y estructuras, (iv) técnicas de modulación y estrategias de control, (v) aplicaciones, (vi) últimas tendencias y potenciales perspectivas de investigación, (vii) conclusiones.

II. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El STATCOM consiste de un VSC con dispositivos almacenadores de energía, en la mayoría de casos condensadores; una interfaz magnética (transformador o inductancia), para acoplar el dispositivo con el sistema eléctrico de potencia (SEP) y sus controles [11-12][14-16]. Técnicamente, el STATCOM inyecta una corriente reactiva o en cuadratura (en adelante o en atraso) con la tensión de línea; esto emula la conexión de una reactancia inductiva o capacitiva en el punto de conexión con el SEP, permitiendo el control de la potencia reactiva.

Idealmente, las tensiones en el punto de acoplamiento (PCC), del STATCOM y del SEP, deben permanecer en fase y solamente la variación en las magnitudes registrará el flujo de potencia reactiva. En ese sentido, la corriente inyectada está determinada por las tensiones, en terminales del VSC y del SEP, y la inductancia de acoplamiento. De esta manera, cuando la magnitud de la tensión en terminales del VSC es mayor a la tensión del SEP ($V_{VSC} > V_{PCC}$), el dispositivo opera en modo capacitivo. Por otra parte, cuando la tensión en terminales del VSC es menor a la tensión del SEP ($V_{VSC} < V_{PCC}$), el dispositivo opera en modo inductivo. Finalmente, cuando ambas magnitudes de tensión son iguales ($V_{VSC} = V_{PCC}$), no existe intercambio de potencia reactiva (véase Fig. 1) [12].

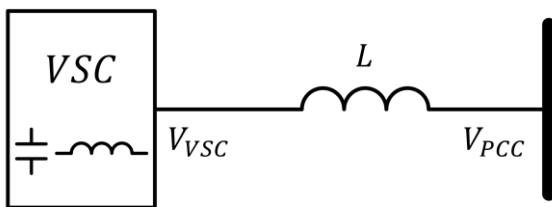


Fig. 1. Diagrama de un STATCOM ideal (VSC, inductancia y SEP).

Como se mencionó anteriormente, en un STATCOM ideal no existe intercambio de potencia activa, sin embargo, más adelante se mostrará que es necesaria una cantidad mínima para mantener los niveles de energía de los elementos almacenadores en un nivel deseado. Lo que muestra una analogía con los condensadores síncronos rotatorios, que

requieren de pequeñas cantidades de potencia activa para compensar las pérdidas de la máquina síncrona.

A. Compensación en derivación

Considerando un modelo de transmisión de dos máquinas (dos buses) representado en la Fig. 2, en el que un compensador ideal (fuente controlable de tensión) se conecta en derivación en el punto medio de la línea de transmisión. Asumiendo una amplitud de tensión igual, $|V|$, en los 3 nodos ($|V_s| = |V_m| = |V_r| = |V|$), lo que se traduce en solamente intercambio de potencia reactiva en el punto medio (compensador síncrono). Al obtener las ecuaciones que rigen el flujo de potencia en el sistema descrito, P y Q , se obtienen Ec. (1) y Ec. (2). A diferencia de las ecuaciones para un sistema de dos buses (sin el condensador síncrono), sus ecuaciones de flujos están dadas por Ec. (3) y Ec. (4).

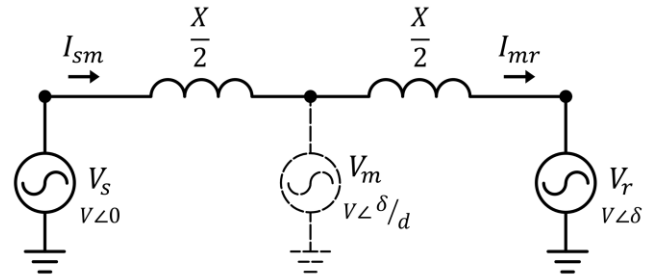


Fig. 2. Modelo de dos buses con un compensador de reactivos ideal.

$$P_{sm} = P_{mr} = \text{Re}\{V_s I_{sm}^*\} = 2 \frac{V^2}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

$$Q_{sm} = Q_{mr} = \text{Im}\{V_s I_{sm}^*\} = 2 \frac{V^2}{X} \left(1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right) \quad (2)$$

$$P_{sr} = \text{Re}\{V_s I^*\} = \frac{V^2}{X} \sin(\delta) \quad (3)$$

$$Q_{sr} = \text{Im}\{V_s I^*\} = \frac{V^2}{X} (1 - \cos(\delta)) \quad (4)$$

De dichas ecuaciones se puede deducir que la compensación en derivación (del punto medio) puede aumentar significativamente la potencia transmisible (duplicando su valor máximo) a expensas de un rápido aumento de la demanda de potencia reactiva en el compensador del punto medio y generadores [4-6].

III. TOPOLOGÍAS Y ESTRUCTURAS

Las topologías STATCOM, basadas en dispositivos semiconductores de conmutación forzada, se clasifican según su estructura, multipulso o multinivel [7]. Las topologías multipulso se conmutan en sincronización con la frecuencia de línea. Es decir, estos dispositivos operan sincronizados con la frecuencia de la red eléctrica para sus procesos de conmutación. Por otro lado, los convertidores multinivel y de

2 niveles (2L-VSC) se conmutan por técnicas de modulación por ancho de pulsos (PWM) o técnicas similares [6].

B. Topologías multipulso

La topología multipulso combina múltiples convertidores elementales VSC, de seis pulsos (n -números), que están configurados para activarse en ángulos de desplazamiento particulares. Para después sumar cada una de las formas de onda de salida (de tensión AC) de cada unidad electromagnéticamente (mediante transformadores de desplazamiento de fase, con el desplazamiento de fase adecuado), creando una forma de onda senoidal multipulso ($6n$ pulsos, forma de onda en escalera) [12].

La Fig. 3 muestra un convertidor multipulso de 12 niveles, con una conexión de transformador diferente para cada VSC, es decir, uno está conectado en Δ -Y mientras que el otro está conectado en Y-Y al SEP. El secundario del transformador conectado en Δ tiene tres veces más vueltas de bobinado y proporciona un desplazamiento de 30° respecto al conectado en Y. Por lo tanto, los armónicos de orden inferior se eliminan fácilmente. Ejemplos de esta topología son los convertidores de 12, 24 y 48 pulsos [5-6].

Sin embargo, un aumento del número de pulsos eleva la cantidad de componentes del convertidor, lo que eleva el costo. Por otro lado, un alto número de pulsos mejora las formas de onda, de tensión y corriente en particular, y el rendimiento operativo en general. Así mismo, las principales limitantes de esta topología van desde complejidad en el diseño, costo elevado del transformador de desfase, gran volumen final del dispositivo, complejidad en la sincronización de pulsos, versatilidad limitada y dificultades en eliminación de armónicos de alto orden, ambas a consecuencia de la operación a frecuencia fundamental [17].

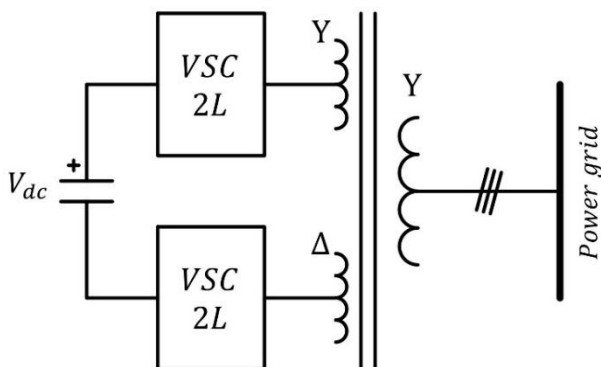


Fig. 3. Esquema de un STATCOM basado en topología multipulso, 12 pulsos.

C. Topologías multinivel NPC y FLC

La topología multinivel tiene su origen con las publicaciones de Nabae y colegas, en las que se mejora un convertidor de dos niveles utilizando el punto neutro de la tensión (lado DC) para constituir el tercer nivel. Dicho avance se presentó con el nombre de inversor neutral point clamped (NPC). Las contribuciones más importantes, de las topologías multinivel en general y de la topología NPC en particular, están relacionadas con la disminución del estrés en los dispositivos de conmutación, menor dv/dt en la fuente de tensión, mayores potencias de salida, disminución de las interferencias electromagnéticas (EMI) y la mejora en las formas de onda de salida (tipo escalera) [6].

La Fig. 4 muestra la topología NPC de 3 niveles,

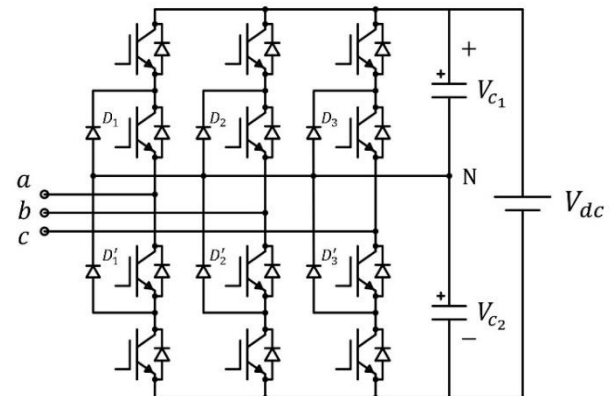


Fig. 4. Esquema de un STATCOM basado en topología NPC, 3 niveles.

El inversor NPC de cinco niveles es una extensión directa del inversor NPC tradicional (de tres niveles). De la misma manera, otra de las evoluciones de la topología NPC es el ANPC, que cambia los elementos pasivos (diodos) del NPC tradicional por elementos activos (interruptores de conmutación forzada), mejorando las capacidades del convertidor [18].

Introducido a principios de los años 90 como una alternativa al NPC para su uso en la conversión de energía de media tensión. La topología Flying Capacitor (FLC) cambia los diodos enclavados/flotados del NPC por capacitores, permitiendo conectar en serie varios módulos de tres niveles, y al mismo tiempo proporcionar algoritmos de control más sencillos y formas de onda de tensión de salida más precisas (véase Fig. 5) [6].

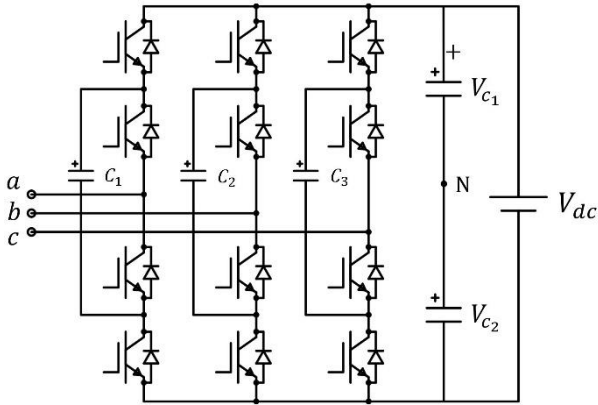


Fig. 5. Esquema de un STATCOM basado en topología FLC, 3 niveles.

Sin embargo, la principal limitación de las topologías NPC y FLC radica en la escalabilidad, ya que aumentando el número de niveles aumenta la complejidad en el control (general y de balance de tensión en los capacitores) y modulación, en gran medida por la conexión física entre los capacitores. En ese sentido, ambas topologías son recomendadas para aplicaciones de media tensión, en gran medida por su relación costo-eficacia [18].

D. Topologías multinivel en cascada

Para la próxima topología, se adopta la nomenclatura propuesta por Akagi [18], donde nombra a los convertidores multinivel en cascada como familia de convertidores modulares multinivel en cascada (MMCC). Donde los términos “modular” hacen referencia a la estructura, “multinivel” a la tensión y “cascada” a la conexión [18]. La topología MMCC consta de varios módulos de puente H (full bridge, bridge cell, BC) o medios puentes (half bridge, chopper cell, CC) conectados en serie para generar una tensión de salida multinivel. Las características más importantes de esta topología son una mayor frecuencia de conmutación y un aumento de la potencia, que es gestionada por el dispositivo total y repartida equitativamente entre cada módulo, en comparación a otras alternativas (multipulso, FLC y NPC) [6]. Además, el STATCOM basado en topología MMCC es capaz de eliminar los armónicos y compensar la potencia reactiva en mayor medida que las otras topologías (multipulso, NPC y FLC). También, en la familia MMCC, se denomina “cluster” a una cadena de celdas (BC/FB o CC/HB) múltiples para distinguirla de los términos “arm” y “leg” utilizados para los convertidores tradicionales de dos niveles [18]. Nota: No confundir los términos MMCC con MMC; en la literatura se utiliza el término MMC para referirse a un miembro en específico de la familia MMCC (nomenclatura propuesta por Akagi [18]).

La familia MMCC tiene seis miembros: el SSBC, DSBC, TSBC, SDBC, DDBC y DSCC; las dos primeras letras hacen referencia a la conexión trifásica de los convertidores (Single, Double, Triple, Star o Delta); mientras que las

últimas dos letras determinan el tipo de celda (BC o CC) que utiliza. Sin embargo, solamente el SSBC y el SDBC se utilizan para compensación reactiva.

La Fig. 6 muestra el diagrama de un STATCOM basado en topología MMCC-SSBC, de tres módulos en cascada, dando como resultado una tensión sintetizada de siete niveles. Cada celda de puente H (BC) puede generar tres niveles de tensión ($+V_c$, 0 , $-V_c$) a partir de la tensión del condensador de CD (V_c) y generar la salida de tensión de CA mediante diferentes combinaciones de cuatro interruptores. La inductancia de fuga (L_s) proporciona una vía para el intercambio de potencia reactiva, permitiendo al STATCOM inyectar o absorber potencia reactiva [14].

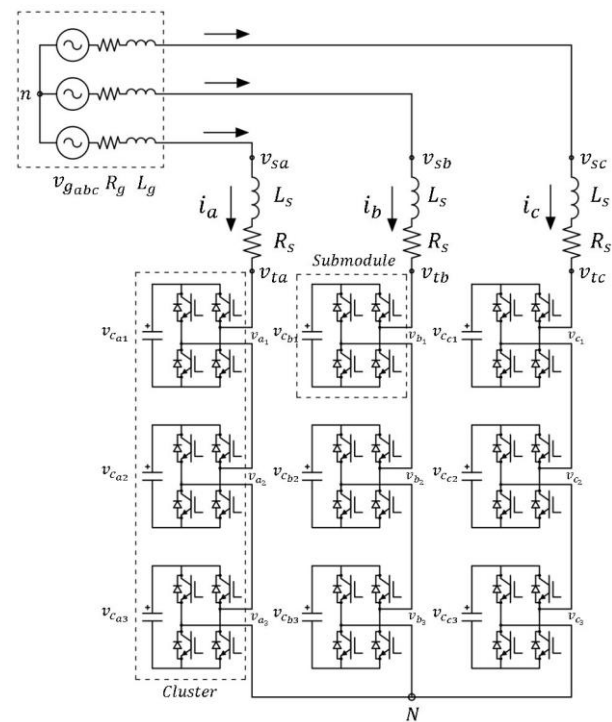


Fig. 6. Diagrama de un STATCOM basado en topología SSBC-MMCC.

IV. TÉCNICAS DE MODULACIÓN Y CONTROL

La eficiencia de un VSC, el alma del STATCOM, depende de la técnica de modulación adecuada, que es el parámetro más importante para disminuir las pérdidas de conmutación.

E. Técnicas de modulación

En la topología multipulso, la amplitud de la tensión de salida del VSC depende del índice de modulación (m_i), de la señal de control, que permite obtener la tensión de salida a $m_i V_{cDC}$, donde V_{cDC} es la tensión en el capacitor. La señal de control genera el ángulo de conmutación α que posteriormente genera la tensión en terminales del STATCOM [19].

En lo que respecta a las topologías multinivel (NPC, FLC y MMCC), las técnicas de modulación utilizadas, en su mayoría, están basadas en modulación por ancho de pulso (PWM) o extensiones de la misma. En ese sentido, se pueden categorizar en función de la frecuencia de operación, frecuencia fundamental o alta frecuencia (véase Fig. 7) [20-24].

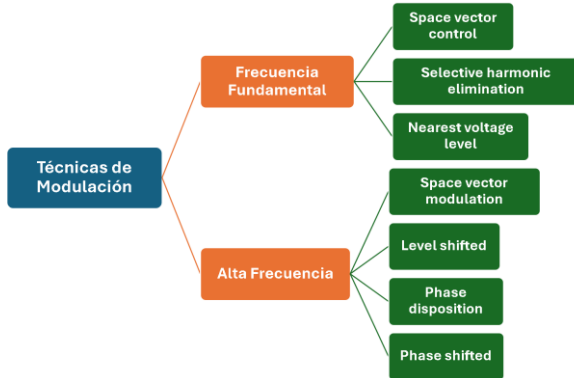


Fig. 7. Clasificación de las técnicas de modulación más populares.

Dentro de las técnicas presentadas, la técnica phase shift PWM (PS-PWM) presenta las mejores prestaciones en topologías multinivel, en parte por la mejora en distribución de la energía entre los condensadores.

F. Estrategias de control

Las estrategias de control están basadas en esquemas de tensión y de corriente; sin embargo, las estrategias basadas en corriente son preferidas por el control y gestión de la misma, permitiendo limitar la corriente [11].

Las técnicas de control se pueden categorizar en función de la topología. En general, todas las topologías de STATCOMS utilizan el mismo esquema de control general, mientras que particulares topologías utilizan esquemas de control extras para la distribución de la energía (balanceo en capacitores) en el convertidor, y de esta manera mejorar la síntesis de las formas de onda y calidad de la misma [14][24]. También, las técnicas de control pueden estar basadas en seguimiento y formación de red. En esta sección, se abordarán técnicas de seguimiento de red, mientras que en secciones posteriores se mencionará la técnica basada en formación de red.

La técnica de control del STATCOM está basada en las ecuaciones dinámicas del SEP en el marco de referencia abc (véase Ec. (5)), inductancia de acoplamiento, VSC y el sistema de seguimiento de red (PLL) [11][14]; utilizando el sistema PLL y alineando el fasor espacial con el eje directo, se obtiene la Ec. (6); después, a través de las ecuaciones instantáneas en el marco de referencia rotatorio $dq0$ (véase Ec. (7) y Ec. (8)), de la potencia activa y reactiva se realiza

el control de las corrientes, la corriente directa y en cuadratura quedan directamente ligadas a la potencia activa y reactiva, respectivamente (véase Ec. (9) y Ec. (10)).

$$v_{sabc} - v_{VSCabc} - L \frac{d}{dt}(i_{abc}) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} L \frac{d}{dt} & -\omega L \\ \omega L & L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{VSCd} \\ v_{sq} - v_{VSCq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$p = v_{sd} i_d + v_{sq} i_q \quad (7)$$

$$q = v_{sd} i_q - v_{sq} i_d \quad (8)$$

$$p = v_{sd} i_d \quad (9)$$

$$q = v_{sd} i_q \quad (10)$$

A partir de las ecuaciones dinámicas del sistema VSC-SEP se emplean algoritmos de control proporcional-integral (PI), modos deslizantes, predictivos, de lógica difusa, etc. [12-13], mientras que para el control de la tensión en el capacitor/es del dispositivo se emplean a menudo algoritmos PI o solamente proporcionales [14].

En STATCOM's basados en topologías multinivel, la técnica de modulación PS-PWM minimiza en gran medida el desbalance de tensión en los capacitores; sin embargo, se requieren técnicas de control adicionales para el balanceo de la tensión en los capacitores [14-16].

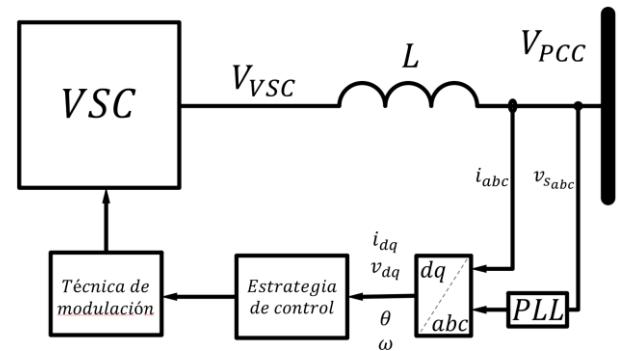


Fig. 8. Esquema de control general utilizado en STATCOM's.

G. Balanceo de capacitores

En general, las estrategias de control del STATCOM se pueden dividir en dos etapas, la primera encargada de mantener una tensión determinada en el capacitor o capacitores. Mientras que la segunda etapa busca gestionar el flujo de potencia reactiva (del dispositivo al SEP) y la potencia activa (del SEP al dispositivo). Ambas etapas se encuentran ligadas la una con la otra. Por ejemplo, el balanceo de la tensión en el/los condensador/es depende del flujo de potencia activa del SEP al dispositivo; esto genera esquemas de control en cascada. En topologías de dos



niveles, en la primera etapa de control se busca establecer el valor de tensión en el condensador en un determinado nivel; dicha acción de control es utilizada, en la segunda etapa, para determinar la cantidad de potencia activa necesaria para mantener el nivel de tensión determinado [11]. En lo que respecta a convertidores multinivel, a menudo, se utiliza el promedio de todas las tensiones en los capacitores en un primer balanceo (balanceo general), y posteriormente, algunas estrategias agregan controles adicionales (PI o P) para mantener una tensión similar en cada una de las fases (balanceo de clúster o grupo) y cada uno de los capacitores individuales (balanceo individual) [14-16]. El control de balanceo individual genera una señal atrasada $\frac{\pi}{2}$, de manera que coincida en fase con la corriente reactiva, y de esta manera controlar el flujo de potencia activa (control de tensión individual) en cada uno de los convertidores fundamentales.

V. APLICACIONES DEL STATCOM

En este trabajo, las aplicaciones del STATCOM se mencionarán en función del número de publicaciones recientes publicadas. En ese sentido, las aplicaciones del dispositivo con mayor campo de aplicación son las relacionadas con fallas en el SEP. Estas van desde estabilidad transitoria, reducción del desbalance de tensión, reducción de las fluctuaciones de tensión, reducción de la corriente de falla, entre otras. Después, otro de los campos con mayor aplicación son el relacionado con distorsión armónica, como supresión del tercer armónico en corriente, atenuación de sobre modulación, reducción del armónico cero, entre otras. Otras de las aplicaciones del dispositivo son el control del flujo de potencia, reducción de pérdidas, control del factor de potencia, amortiguamiento de oscilaciones en el SEP, entre otras [11-13][25-26].

El propósito de la aplicación del dispositivo impacta directamente en la técnica de control, ya que esta determina las variables o parámetros de retroalimentación y los objetivos de la estrategia de control.

VI. TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURAS

Las tendencias actuales y futuras del STATCOM están ligadas a las nuevas tecnologías de generación y nuevos fenómenos a mitigar. En ese sentido, una de las aplicaciones más prometedoras del STATCOM es la integración con nuevos medios de generación, como la energía eólica y solar [13][27-28]; también, esas mismas energías alternas presentan nuevos retos por los fenómenos que estas provocan, como la conocida pérdida de inercia, y donde el STATCOM, en combinación con elementos de almacenamiento de energía a mayor escala (como baterías o supercapacitores), y mediante la adecuada estrategia de control, permite emular la respuesta inercial de las máquinas

síncronas tradicionales [29-30]. Para ese propósito se utilizan estrategias de control basadas en formación de red, que de cierta manera emulan el comportamiento de una máquina síncrona [31]. Esto se logra utilizando las ecuaciones dinámicas (eléctricas y mecánicas) de la máquina que, mediante los objetivos planteados, controlan el dispositivo [32-33].

Por otra parte, en lo que respecta a las mitigaciones de armónicos de tensión, desbalances de tensión, corrección del factor de potencia, oscilación de potencia, inestabilidad producida en condiciones de falla; estas se basan en el mecanismo de gestión de energía entre el STATCOM y el sistema; dependiendo del tipo de mitigación, en ocasiones es necesario el almacenamiento de energía [13].

Finalmente, las topologías multinivel son las que dominan el mercado actual, en parte por sus niveles de potencia, de algunos MVA, velocidad de respuesta y flexibilidad [34-41].

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una breve introducción al dispositivo STATCOM, su surgimiento y evolución; también se han presentado las diferentes topologías sobre las que se basa, así como las técnicas de control y modulación que dichas topologías utilizan. Finalmente, se ha dado una revisión a las aplicaciones del dispositivo y tendencias que son mencionadas en la literatura.

El SVC es el dispositivo FACTS más utilizado en SEP; en ese sentido, el STATCOM, al ser un dispositivo con prestaciones y tiempo de respuesta muy superiores, se perfila como el dispositivo FACTS que domine los SEP del futuro. También, la versatilidad del dispositivo le permite utilizarse para diferentes propósitos.

En cuanto a las tecnologías de control y modulación, es uno de los campos con mayor número de publicaciones, sobre todo en topologías multinivel, en parte porque las técnicas multinivel se perfilan como las topologías del presente-futuro, por su escalabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por su apoyo para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] H. Saadat, "Power System Analysis," edición no 3, PSA Pub., 2010.
- [2] J. Grainger y W. Stevenson, "Power System Analysis," edición no 1, McGraw-Hill Education, 1994.



- [3] T. K. Nagsarkar y M. S. Sukhija, "Power System Analysis," edición no 2, Oxford University Press, New Delhi, 2014.
- [4] N. G. Hingorani y L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," edición no 1, IEEE Press, New York and Standard Publishers Distributors, Delhi, 2000.
- [5] Y.-H. Song y A. T. Johns, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)," edición no 1, IET, 1999.
- [6] F. Shahnia, S. Rajakaruna y A. Ghosh, "Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems," edición no 1, Springer, 2014.
- [7] R. A. Otto, T. H. Putman y L. Gyugyi, "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1935-1945, Sept. 1978.
- [8] L. Gyugyi y E. R. Taylor, "Characteristics of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1795-1804, Sept. 1980, doi: 10.1109/TPAS.1980.319769.
- [9] L. Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, no. 5, pp. 521-532, Sept. 1979, doi: 10.1109/TIA.1979.4503701.
- [10] Hauth, R. L., y Moran, R. J., "Basics of Applying Static Var Systems on HVAC Power Networks," EPRI Seminar on Transmission Static Var Systems, Duluth, MN, October 24, 1978
- [11] A. Yazdani y R. Iravani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications," IEEE Press, Wiley, 2010.
- [12] B. Singh, R. Saha, A. Chandra y K. Al-Haddad, "Static synchronous compensators (STATCOM): a review", IET Power Electronics, 2009, 2, (4), p. 297-324, DOI: 10.1049/iet-pel.2008.0034.
- [13] S. Sharma et al., "A Comprehensive Review on STATCOM: Paradigm of Modeling, Control, Stability, Optimal Location, Integration, Application, and Installation," in IEEE Access, vol. 12, pp. 2701-2729, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
- [14] H. Akagi, S. Inoue y T. Yoshii, "Control and Performance of a Transformerless Cascade PWM STATCOM With Star Configuration," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 4, pp. 1041-1049, July-Aug. 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.900487.
- [15] C.-t. Lee et al., "Average Power Balancing Control of a STATCOM Based on the Cascaded H-Bridge PWM Converter With Star Configuration," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 6, pp. 3893-3901, Nov.-Dec. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2312618.
- [16] Y. Neyshabouri, S. K. Chaudhary, R. Teodorescu, R. Sajadi y H. Iman-Eini, "Improving the Reactive Current Compensation Capability of Cascaded H-Bridge Based STATCOM Under Unbalanced Grid Voltage," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 2, pp. 1466-1476, June 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2916571.
- [17] R. Datta, H. Weng, K. Chen, A. M. Ritter y R. Raju, "Multipulse Converter - Topology and Control for Utility Power Conversion," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, France, 2006, pp. 1950-1955, doi: 10.1109/IECON.2006.347480.
- [18] H. Akagi, "Multilevel Converters: Fundamental Circuits and Systems," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2048-2065, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2682105.
- [19] R. Datta, H. Weng, K. Chen, A. M. Ritter y R. Raju, "Multipulse Converter - Topology and Control for Utility Power Conversion," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, France, 2006, pp. 1950-1955, doi: 10.1109/IECON.2006.347480.
- [20] S. Kouro, J. Rebolledo y J. Rodriguez, "Reduced Switching-Frequency-Modulation Algorithm for High-Power Multilevel Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2894-2901, Oct. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.905968.
- [21] A. Poorfakhraei, M. Narimani y A. Emadi, "A Review of Modulation and Control Techniques for Multilevel Inverters in Traction Applications," in IEEE Access, vol. 9, pp. 24187-24204, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056612.
- [22] M. Moranchel, F. Huerta, I. Sanz, E. Bueno y F.J. Rodríguez, "A Comparison of Modulation Techniques for Modular Multilevel Converters," Energies 2016, 9, 1091. <https://doi.org/10.3390/en9121091>.
- [23] J. I. Leon, S. Vazquez y L. G. Franquelo, "Multilevel Converters: Control and Modulation Techniques for Their Operation and Industrial Applications," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2066-2081, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583.
- [24] I. Sanz, E. J. Bueno, F. J. Rodríguez, M. Moranchel y A. Mayor, "Modulation and balancing methods for a NPC converter connected to the grid in a medium voltage application: A STATCOM system," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 1043-1048, doi: 10.1109/IECON.2013.6699277.
- [25] B. R. Andersen, S. L. Nilsson, "Flexible AC Transmission Systems," CIGRE Green Books, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, 2020.
- [26] Y. Ma, A. Huang, and X. Zhou, "A review of STATCOM on the electric power system," in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. (ICMA), Beijing, China, Aug. 2015, pp. 162-167.
- [27] A. J. Sonawane and A. C. Umarikar, "Voltage and Reactive Power Regulation With Synchronverter-Based Control of PV-STATCOM," in IEEE Access, vol. 11, pp. 52129-52140, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3276787.
- [28] M. K. K. Prince et al., "Coordinated Control of Grid-Connected PMSG Based Wind Energy System With STATCOM and Supercapacitor Energy Storage," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 3, pp. 5108-5118, May-June 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3371407.
- [29] T. Engelbrecht, A. Isaacs, S. Kynev, J. Matevosyan, B. Niemann, A. J. Owens, B. Singh, and A. Grondona, "STATCOM technology evolution for tomorrow's grid: E-STATCOM, STATCOM with supercapacitorbased active power capability," IEEE Power Energy Mag., vol. 21, no. 2, pp. 30-39, Mar. 2023.
- [30] L. Huang, H. Xin, H. Yuan, G. Wang, and P. Ju, "Damping effect of virtual synchronous machines provided by a dynamical virtual impedance," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 1, pp. 570-573, 2021.
- [31] A. J. Sonawane and A. C. Umarikar, "Three-phase single-stage photovoltaic system with synchronverter control: Power system simulation studies," IEEE Access, vol. 10, pp. 23408-23424, 2022.
- [32] M. Ashabani, F. D. Freijedo, S. Golestan, and J. M. Guerrero, "Inducverters: PLL-less converters with auto-synchronization and emulated inertia capability," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, pp. 1660-1674, 2016.
- [33] M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor and B. P. Hayes, "Modeling and Control of Grid Forming Converters: A Systematic Review," in IEEE Access, vol. 12, pp. 107818-107843, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3437236.
- [34] ABB, "A new statcom modular multilevel converter technology," ABB review, Ingenuity at work, 2022. Available at <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A6778&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (accessed: 26-08-2024).
- [35] General Electric, "FACTS/FLEX - Forming Future Grids," General Electric website. Available at <https://www.gevernova.com/grid-solutions/power/catalog/factsflex/index.html> (accessed: 26-08-2024).
- [36] Mitsubishi Electric, "FACTS - Core Technology," Mitsubishi Electric website. Available at https://www.mitsubishielectric.com/eig/energysystems/products/transition/pssfactsc/index_03.html (accessed: 26-08-2024).
- [37] SIEMENS, "SVC PLUS® (STATCOM)," SIEMENS website. Available at <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/svcplus.html> (accessed: 26-08-2024).
- [38] NR Electric, "PCS-9583 Static Synchronous Compensator," NR Electric website. Available at <https://www.nrec.com/en/index.php/product/productInfo/300.html> (accessed: 26-08-2024).
- [39] TBEA SUNOASIS CO., LTD., "STATCOM," TBEA website. Available at <https://spanish.sunoasis.com.cn/Product-Statcom/> (accessed: 26-08-2024).
- [40] Sieyuan, "STATCOM de alta voltaje," Sieyuan website. Available at <https://en.sieyuan.com/152/127/> (accessed: 26-08-2024).
- [41] Hitachi Energy, "Static compensator (STATCOM)," Hitachi Energy website. Available at <https://www.hitachienergy.com/latam/es/products-and-solutions/facts/statcom> (accessed: 26-08-2024).



BIOGRAFÍAS



DIEGO GUTIÉRREZ TORRES Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2019, y el título de Maestro en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2022. Actualmente cursa el programa de doctorado en ciencias del CINVESTAV unidad Guadalajara. Su área de interés incluye convertidores de energía y maquinas eléctricas.



JUAN M. RAMIREZ Recibió el título de doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, en 1992. Se incorporó al Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, Guadalajara, México, en 1999, donde es actualmente profesor de tiempo completo. Sus intereses de investigación incluyen Smart-grids, microrredes y aplicaciones de electrónica de potencia.



JOSE M. LOZANO GARCIA 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.

Análisis de Rentabilidad de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos de Generación Distribuida

HERBE BARRIOS RODRÍGUEZ¹, JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO², LUIS FELIPE MARTÍNEZ SOTO²

¹Universidad Abierta y a Distancia de México, UNADM

²Centro de Ingeniería y Desarrollo industrial, CIDESI

erherbe@nube.unadmexico.mx

jmanzo@cidesi.edu.mx

lmartinez@cidesi.edu.mx

RESUMEN La rentabilidad de los sistemas de energía es clave para su implementación, donde la disponibilidad de los recursos energéticos es una de las principales atenuantes de su factibilidad, por lo que en el presente estudio se analiza la viabilidad de combinar las fortalezas de energía eólica y solar. Siendo de vital relevancia la determinación de los indicadores de rentabilidad para el aprovechamiento de la energía renovable, para lo cual se tomó de referencia el análisis costo beneficio de un sistema fotovoltaico de 240 kW y el recurso eólico solar de la zona de Apodaca, N.L., donde se evaluó la rentabilidad con el recurso eólico solar de otras 3 zonas del país, a lo cual se encontró que es rentable combinar ambas fuentes de energía, siempre y cuando se superen los promedios anuales de 5 horas solares pico (HSP) y 4.5 m/s.

PALABRAS CLAVE — Autosuficiencia, sistemas híbridos, sustentabilidad.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito del diseño de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos ha cobrado relevancia el análisis del comportamiento de este tipo de recursos a efecto de observar el máximo potencial aprovechable y las condiciones que lo pueden afectar, en este sentido la rentabilidad es clave para su implementación siendo la energía solar la más aceptada en nuestro país, con más contratos de interconexión a la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con un total al 2024 de 480,926 contratos de generación distribuida [1].

La hibridación de las fuentes de energía renovable es una estrategia que ofrece una mejor disponibilidad y confiabilidad de la energía renovable, donde la India es de los países pioneros en este aspecto teniendo un marco regulatorio y político estratégico desde 2017 en este rubro [2], aspecto donde se aprovecha el potencial del viento cuando no hay luz solar y viceversa, se aprovecha el potencial del sol dada la amplia variabilidad del viento o cuando no hay potencia disponible de este.

Este trabajo considera el análisis de la rentabilidad de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos considerando como ubicación de referencia la ciudad de Apodaca, N.L., del tipo generación distribuida, es decir, con capacidad menor a 0.5 MW. También se considera su comparativa con otras zonas de México, con mayor potencial eólico.

De acuerdo con lo anterior, se analizó la relación que guarda el costo beneficio, siendo este como factor clave para el aprovechamiento de energías renovables con la disponibilidad del recurso eólico y solar, a efecto de determinar los puntos de inflexión que son elementales para determinar en qué proporción resulta idónea la

implementación de estos sistemas de forma combinada o híbrida.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada consiste en el análisis iterativo del tiempo de retorno de la inversión, considerando 10 años como el periodo de retorno de la inversión óptimo para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

1. Se procedió a evaluar el recurso solar, obteniéndose las horas solares pico (HSP) promedio, mediante el área bajo la curva de la irradiancia a $1,000 \text{ W/m}^2$, con respecto al tiempo, así como del recurso eólico en la zona. Para esto se empleó el histograma de distribución de frecuencias de velocidad de viento y la curva de probabilidad de Rayleigh, consultando mediciones de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de interés, del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) como se muestra en la Fig. 1 [3].





Fig. 1. Ubicación de estación meteorología del SMN obtenida de Google Earth.

2. Dimensionamiento de arreglo fotovoltaico el cual se realizó con las ecuaciones (1) y (2):

$$Pb = \frac{Ec}{Hsp} \quad (1)$$

Pb = Potencia bruta

Ec = Demanda diaria de energía promedio

HSP = Horas sol pico promedio diarias

$$Pf = \frac{Pb}{fp} \quad (2)$$

Pf = Potencia efectiva

fp = Factor de perdidas

3. De acuerdo con el sistema fotovoltaico (SFV) dimensionado se calculó la energía a producir durante su vida útil, así como el Índice Costo Beneficio (ICB) y su periodo de retorno de la inversión en años, con el método del Valor Presente Neto.

$$ICB = \frac{VPNB}{VPNC} \quad (3)$$

$$VPNC = \sum_{t=0}^n \frac{Costos}{(1+i)^t} \quad (4)$$

$$VPNB = \sum_{t=0}^n \frac{Beneficios}{(1+i)^t} \quad (5)$$

Donde:

$VPNC$ = Valor Presente Neto de Costos

$VPNB$ = Valor Presente Neto de Beneficios

i = Índice inflacionario

t = Periodo en años

4. De los aerogeneradores comerciales de baja potencia disponibles se seleccionó aquel donde la velocidad promedio de la zona se acerque al punto máximo de potencia del aerogenerador. Posteriormente, se calcula la energía a producir y su ICB y se hace una comparativa entre los diferentes aerogeneradores disponibles, seleccionando el que mayor ICB presente.
5. Se sumaron los costos y beneficios económicos del aerogenerador con los del SFV y si el ICB es mayor a 1 y el periodo de retorno es menor a 10 años, de manera iterativa se le adicionan los costos y beneficios de un aerogenerador más, hasta que el costo beneficio sea menor a 1. Esto da como resultado el número de aerogeneradores factibles a

implementar. Si con un aerogenerador este indicador llega a ser menor a 1, entonces no es factible un sistema híbrido en la zona, y únicamente sería viable la operación del SFV de forma individual.

6. Se sumaron las potencias de los aerogeneradores que permitieron lograr un retorno de la inversión en un periodo menor o igual a 10 años.
7. Se estableció el porcentaje de potencia de energía eólica óptima a instalar en proporción a la potencia solar a implementar para la zona de Apodaca, N. L.
8. Con el sistema híbrido dimensionado, se proyectó su rentabilidad considerando un recurso eólico solar de 3 zonas del país, con condiciones de viento más favorables. La primera de ellas tiene una velocidad promedio de viento de hasta 5.72 m/s, a 10 m de altura, específicamente en la ciudad de Unión Hidalgo, Oaxaca (latitud 16.470000° y longitud -94.873423°). Otra zona considerada es la cercanía del Aeropuerto Intercontinental de Querétaro, ubicado en el municipio de Colón, Qro (latitud 20.61725° y longitud -100.1855°), con un recurso eólico disponible de hasta con 4 m/s en promedio. También, se consideró la zona de Valle Hermoso Tamaulipas (latitud 25.743456° y longitud -7.92345°), con una velocidad de viento promedio de hasta 4.7 m/s. Por último, se incluyó la zona de Apodaca, N.L. (latitud 25.78195° y longitud -100.18839°), con 2.6 m/s en promedio. Una vez tabulado el comportamiento del ICB a diferentes velocidades de viento, se procedió a trazar una curva correlativa de tendencia con apoyo del software Excel, donde se observó el comportamiento de la rentabilidad del sistema para la extrapolación de resultados.

III. EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR Y EÓLICO

En la Fig. 2 se aprecia el recurso solar disponible en la zona de Apodaca N.L., donde es posible observar que este va creciendo de primavera a verano y disminuye el resto del año. Se utilizaron datos de mediciones de la velocidad del viento y de la irradiancia cada 10 minutos del periodo 2013 al 2023, a partir de las bases de datos del SMN.

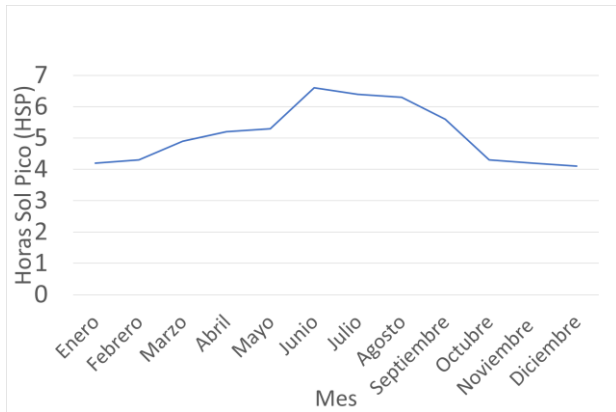


Fig. 2 Horas Solares Pico promedio al mes en Apodaca, N.L. [3].

En la Fig. 3 se puede observar el perfil de la irradiancia y en la Fig. 4 se muestra la velocidad de viento promedio. En ambos casos con respecto a la hora del día.

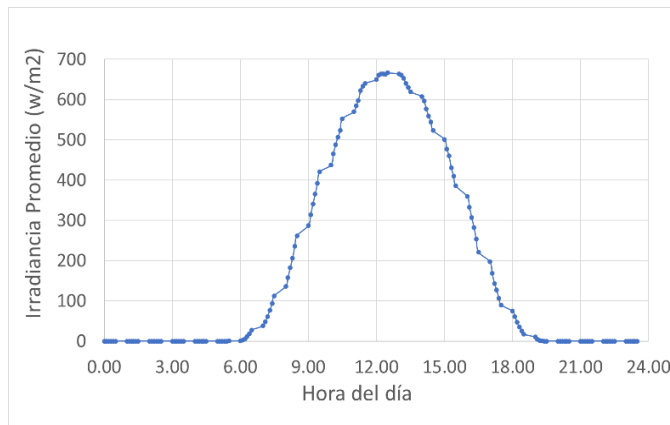


Fig. 3. Irradiancia promedio diaria en Apodaca, N.L. [3].

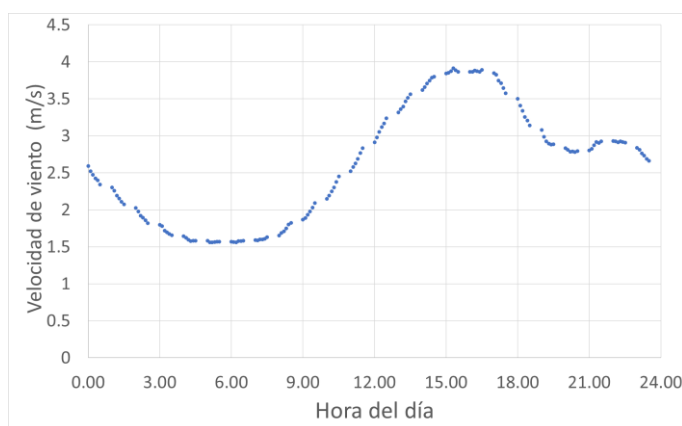


Fig. 4 Velocidad de viento promedio diaria en Apodaca, N.L. [3].

De acuerdo con cálculo realizado, la velocidad promedio en Apodaca N.L., es de 2.6 m/s, dato a partir del cual se realizó una comparativa con las curvas de potencia de aerogeneradores de baja potencia disponibles comercialmente [6, 7]. Para esto, con las mediciones de

velocidad de viento se evaluó la curva de potencia de los aerogeneradores, para compararlas y observar cuál de ellos presenta una mejor curva de potencia, en función de la velocidad del viento. Se estimaron sus beneficios considerando un costo promedio de la energía, por kWh, de 2.25 pesos mexicanos (MXN), considerando una tarifa de suministro de electricidad de Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) [4] y para proyectar la rentabilidad se consideró el costo promedio anual de la energía eléctrica actual y su tendencia en incremento, considerando que los últimos 25 años y a nivel nacional, la tarifa promedio se ha incrementado en un 320%. Esto implica un incremento anual porcentual del 6% al 9% [5]. De esta forma, el costo del kWh de la energía proyectado a 25 años se puede determinar en función de la Ec. (6):

$$Y = 0.32 X + 2.25 \quad (6)$$

donde X es el año de 1 al 25, que es el lapso de vida útil del SFV y Y es el costo de la energía eléctrica anual en pesos mexicanos por kWh. De esta forma, queda proyectado el costo de la energía de aquí a 25 años, como se muestra en la [Tabla I](#).

TABLA I. PROYECCIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA A UN PLAZO DE 25 AÑOS.

Costo promedio anual de la energía (MXN/kWh)*	Año de vida del sistema
2.25	0
2.57	1
2.90	2
3.22	3
3.55	4
3.88	5
4.20	6
4.53	7
4.86	8
5.18	9
5.51	10
5.83	11
6.16	12
6.49	13
6.81	14
7.14	15
7.47	16
7.79	17
8.12	18
8.44	19
8.77	20
9.10	21
9.42	22
9.75	23
10.08	24
10.40	25

* (MXN/kWh) = Pesos mexicanos por kilowatt-hora.

En la [Tabla II](#) se puede apreciar la potencia en función de la velocidad de viento de los diferentes aerogeneradores disponibles de forma comercial [6, 7], donde el aerogenerador de 10 kW presenta una mayor generación de potencia a bajas velocidades de viento. Es importante observar que esta potencia es muy similar a la entregada por el aerogenerador de 20 kW a bajas velocidades. Sin embargo, el costo del aerogenerador de 20 kW es muy superior al de 10 kW, lo cual implica una misma producción de energía, pero a un precio más elevado, lo cual repercute directamente en el ICB. Aunado a esto, la potencia nominal del aerogenerador de 20 kW se alcanza alrededor de los 13 m/s, a diferencia del de 10 kW, el cual alcanza su potencia nominal a los 9 m/s velocidad, valor aproximado a la velocidad promedio de la zona. Por este motivo, se seleccionó este aerogenerador para el presente análisis.

TABLA II. POTENCIA DE DIFERENTES AEROGENERADORES EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO DE ACUERDO CON SU FICHA TÉCNICA [6, 7].

Velocidad de viento	Potencia disponible (Watts)				
	Enair			Jacobs Wind Electric	
m/s	5 kW	10 kW	20 kW	7.5 kW	20 kW
1	0	0	0	0	0
2	10	80	80	50	30
3	40	500	500	250	350
4	100	1350	1350	1000	650
5	450	2800	2800	1800	2500
6	659	4700	4700	2200	4600
7	1400	7000	7000	3800	7000
8	2200	9600	9600	4000	9000
9	2800	10140	12300	5000	11700
10	3400	10140	16500	6000	13900
11	4000	10140	17800	7000	16000
12	4150	10140	18500	7900	19000
13	4300	10140	17500	8000	20000
14	4375	10140	17500	8000	20000
15	4450	10140	17500	8000	20000
16	4475	10140	17500	8000	20000
17	4500	10140	17500	8000	20000

IV. DESARROLLO

Una vez teniendo de valor el costo de energía anual y tomando como referencia el costo del aerogenerador de 10 kW [8], se tabuló el ICB del sistema híbrido a medida que se le fueron incrementando el número de aerogeneradores, comenzando en 0 kW eólicos cuando el sistema fotovoltaico se considera sin aerogeneradores. Se pudo observar que se disminuye el ICB a medida que se incrementa la potencia

eólica. Sin embargo, es factible implementar hasta 3 aerogeneradores de 10 kW, sin afectar significativamente el ICB, como se aprecia en la [Fig. 5](#), considerando una velocidad de viento de 2.6 m/s y 5.1 HSP.

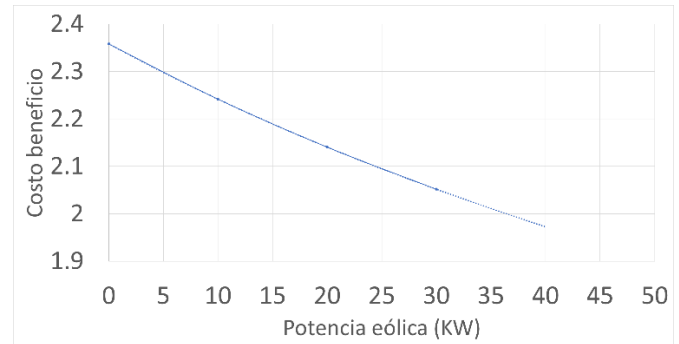


Fig. 5 Evolución del ICB del sistema híbrido en función de la potencia eólica.

Es importante considerar que con 30 kW eólicos y 240 kW fotovoltaicos la inversión sigue siendo rentable, recuperándose en un periodo de 10 años. Igualmente, el potencial de producción de energía renovable eólica, es de hasta en 10,700 kWh anuales por cada aerogenerador, a 2.6 m/s de velocidad de viento promedio.

Posteriormente, se analizó el tiempo de retorno de la inversión de los aerogeneradores por separado, calculando los años de retorno de la inversión a diferentes velocidades de viento, en los sitios de referencia mencionados anteriormente. Con apoyo del software Excel, se encontró su curva de tendencia en cuanto a su comportamiento, a efecto de observar la expresión que la describe y su correlación con los valores calculados, observando que la energía eólica por sí sola, a bajas velocidades de viento, no es rentable. Se puede observar un umbral de cuando menos 4 m/s de velocidad de viento promedio, requerida para que la inversión se recupere a los 12 años, como se aprecia en la [Fig. 6](#). Para efecto de comparativa, la mayor velocidad de viento promedio en los sitios propuestos, fue de 5.7 m/s, en la ciudad de Unión Hidalgo, Oaxaca. A este valor de velocidad de viento promedio, el tiempo de retorno es de 8 años, como se aprecia también en la [Fig. 6](#). Más adelante se observa lo que sucede con el periodo de retorno en un sistema híbrido a esta velocidad.

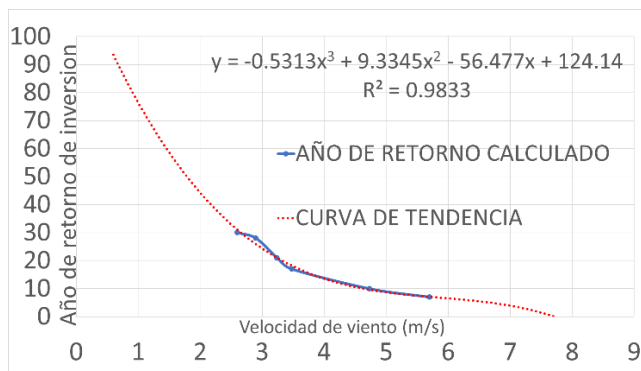


Fig. 6. Análisis del IBC del aerogenerador a diferentes velocidades de viento promedio.

En la [Tabla III](#) se muestran los valores tabulados de las velocidades de viento promedio de referencia y las HSP encontradas en las ciudades de análisis. Se consideraron sitios con velocidad de viento promedio mayor a 3 m/s de velocidad [9].

TABLA III. VELOCIDADES DE VIENTO PROMEDIO y HSP OBTENIDAS DEL GLOBAL WIND ATLAS Y ESMAP [9,10].

Ubicación	Velocidad de viento Promedio (m/s) A 10 metros de altura	HSP
Apodaca N.L.	2.6	5.1
Colón, Qro.	4	5
Valle Hermoso, Tamaulipas	4.7	4.6
Unión Hidalgo, Oaxaca	5.7	5

Cabe destacar en la gran mayoría del territorio mexicano se superan las 5 HSP en promedio [9]. De esta forma, se consideró ese valor de HSP como constante para el presente análisis, considerando una variación de la velocidad de viento significativa, como se aprecia en la [Tabla III](#).

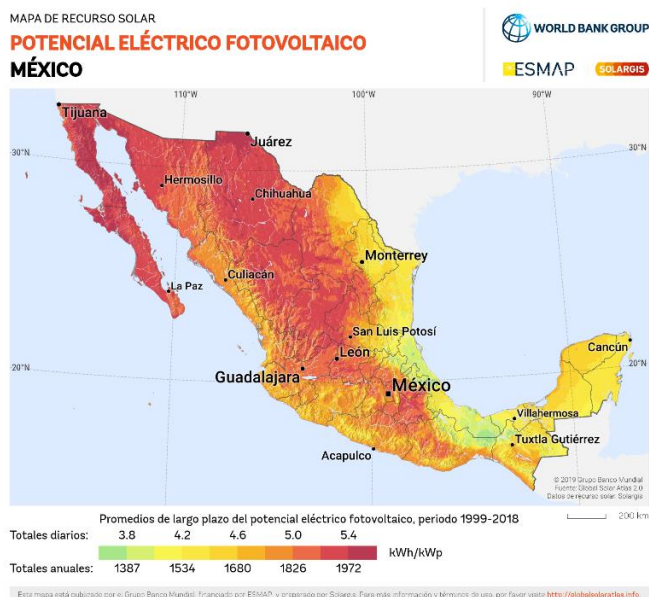


Fig. 7. Mapa de recurso solar de México obtenido de ESMAP [9].

Como se puede observar en la [Fig. 7](#), en México el recurso solar es prácticamente constante a nivel nacional. En cuanto al recurso eólico, este presenta mayores fluctuaciones en diferentes zonas del país y es más escaso que el recurso solar, sobre todo a bajas alturas. Además, en la gran mayoría del país apenas se superan los 2 m/s de velocidad de viento promedio, lo cual, como se ha mencionado anteriormente, hace de la energía eólica no rentable a esas velocidades. Para una mejor apreciación se muestra un mapa de las velocidades de viento promedio en el país en la [Fig. 8](#) [10]. Se puede apreciar en escala de colores la velocidad de viento promedio, donde la mayor velocidad se presenta en las costas de Oaxaca, teniendo además que la velocidad promedio predominante en el país no supera los 3 m/s, esto considerándolo una altura de 10 metros, representativa para el montaje de aerogeneradores de baja potencia, analizados en el presente trabajo.

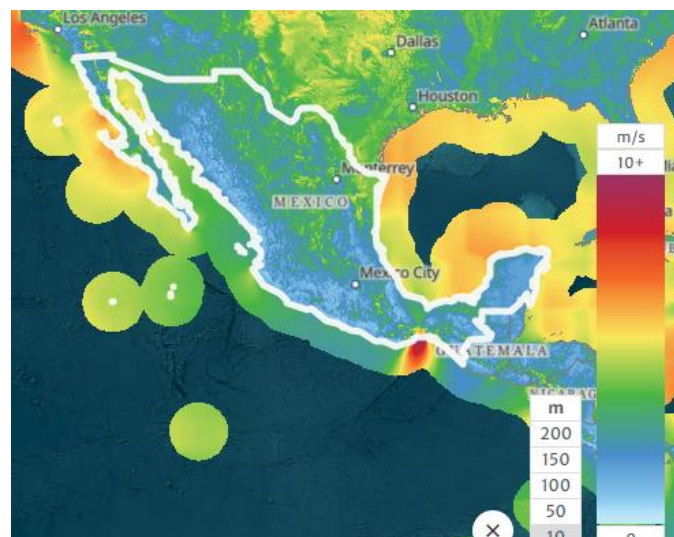


Fig. 8. Mapa de recurso eólico en México obtenido de Global Wind Atlas [10].

Por otra parte, se observó que la energía eólica genera beneficios adicionales suministrando energía especialmente de las 7 de la tarde a las 12 de la noche, horario donde no hay energía solar disponible, en la zona de Apodaca N.L., disminuyendo la demanda de energía eléctrica a la red de suministro en hasta un 15%. Con una velocidad promedio de viento de 2.6 m/s, el ICB de la energía fotovoltaica con energía eólica se disminuye un 15% durante su vida útil, al compararlo con un sistema híbrido que no utilice la energía eólica. Sin embargo, se incrementa un 15% la captación de energía renovable durante el día, como se aprecia en la [Fig. 9](#). Se muestra también una curva de tendencia correlativa con apoyo del software de Excel, a efecto de mostrar su comportamiento. La expresión de la curva de tendencia describe su correlación con los valores calculados.

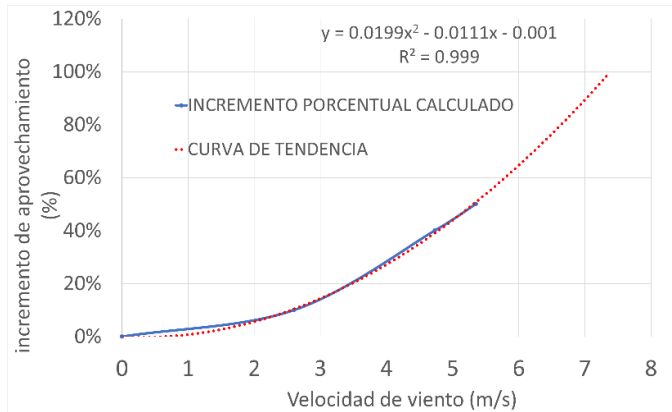


Fig. 9. Incremento del aprovechamiento de energía renovable en un sistema híbrido eólico-fotovoltaico, con respecto a un SFV sin energía eólica.

Es importante observar cómo se comporta el sistema híbrido con las diferentes velocidades de viento consideradas, de manera que se calculó el ICB del sistema híbrido considerando una velocidad de viento en 0 m/s cuando el sistema fotovoltaico trabaja sin aerogeneradores. Se pudo observar que la velocidad de viento promedio mínima para tener un ICB adecuado para un sistema híbrido es de 4.5 m/s, ya que a esta velocidad se supera el ICB del sistema fotovoltaico sin aerogeneradores, de acuerdo con la Fig. 10. En esta misma Figura se puede apreciar que conforme se incrementa la velocidad del viento promedio, se incrementa también de forma considerable el ICB. Se trazó una curva de tendencia con apoyo de software Excel, a efecto de observar la expresión que describe esta curva y su correlación con los valores calculados.

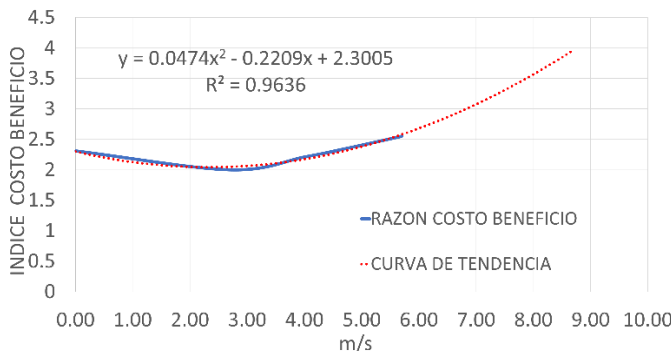


Fig. 10. ICB del sistema híbrido a diferentes velocidades de viento promedio.

Continuando con el análisis para una mejor apreciación del comportamiento, se obtiene un tiempo de retorno de la inversión de 11 años, para el aerogenerador por sí solo, a una velocidad de viento promedio 4.5 m/s, de acuerdo con la Fig. 6. Si se compara con el tiempo de retorno de inversión del sistema híbrido, a esa misma velocidad, se reduce el tiempo de retorno de la inversión a 8 años, como se aprecia en la Fig. 11. Se consideró una velocidad de viento promedio de 0 m/s, para evaluar el año de retorno del SFV sin aerogeneradores.

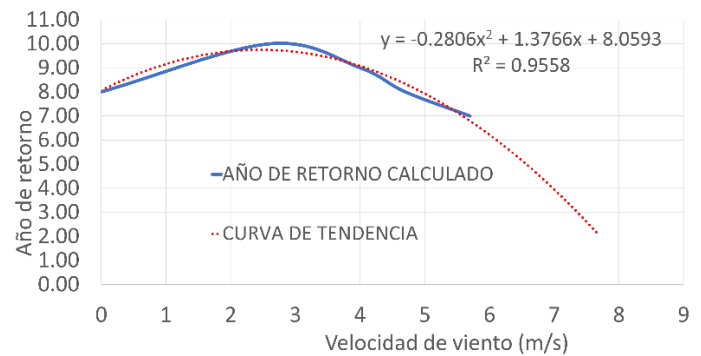


Fig. 11. Evolución del tiempo de retorno de inversión del sistema híbrido a diferentes velocidades de viento.

Lo anterior permite observar el beneficio de combinar ambas fuentes de energía, reduciéndose el tiempo de retorno de la inversión, a medida que se incrementa la velocidad de viento promedio, sin afectar prácticamente el ICB del sistema fotovoltaico individual, como se vio en la Fig. 10, ya que se mantiene su periodo de retorno de la inversión y este únicamente se incrementa en 2 años, cuando las velocidades de viento son inferiores a 4.5 m/s. Sin embargo, se mejora su ICB cuando se supera esta velocidad en combinación con la energía eólica, aspecto que deja entrever que la rentabilidad de la energía fotovoltaica apenas se ve afectada en combinación con la energía eólica, sobre todo en bajas velocidades de viento. Igualmente, se puede observar que a los aerogeneradores por separado, sin SFV, les toma más tiempo en recuperar la inversión.

Para velocidades de viento promedio superiores a 4.5 m/s en un sistema híbrido se comienza a notar la disminución del periodo de retorno de inversión y un incremento del ICB en comparación a solo usar SFV o aerogeneradores. Igualmente se puede observar una mejora significativa de estos indicadores, considerando la mayor velocidad de viento analizada de 5.7 m/s, con una disminución del 12% del periodo de retorno de la inversión, a diferencia de solo usar energía fotovoltaica, como se puede apreciar en la Fig. 11. Para el caso comparativo con la energía eólica es importante observar que los aerogeneradores por si solos a esa velocidad promedio tienen un periodo de retorno de 9 años, como se puede observar en la Fig. 6 y en combinación con el SFV disminuye a 7 años, como se puede observar en la Fig. 11. Esto representa una mejora del 22% de este indicador. Se observa un comparativo global del recurso eólico y solar considerando los ICB calculados para cada zona, para lo cual la variación de las HSP alcanzan un máximo de 8%, mientras que la variación de la velocidad del viento alcanza hasta un 50%, por lo que se puede inferir que el ICB se ve mayormente influenciado por la velocidad del viento, como se aprecia en la Fig. 12, donde se observa un incremento del ICB a medida que la velocidad de viento se incrementa y las HSP tienen poca variación.

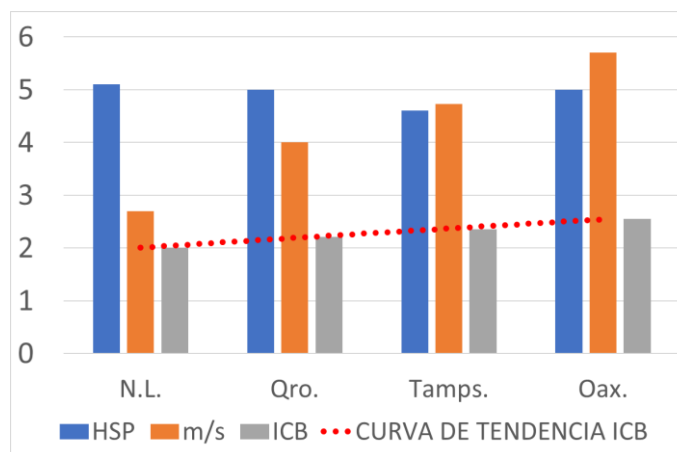


Fig.12 Comparativo global del ICB en función del recurso solar y eólico

Si comparamos los resultados con un proyecto similar realizado en Perú [11], con un recurso de 5.2 m/s de velocidad promedio y una irradiancia solar de 0.82 kW/m², lograron un periodo de retorno de la inversión de 6 años con un ICB de 1.6, a esa velocidad promedio. El sistema híbrido analizado en este estudio tiene un periodo de retorno de 7 años con un ICB de 2.4. Considerando que en México tenemos una irradiancia superior, lo que hace posible lograr mejores valores de ICB.

V. CONCLUSIONES

La energía eólica complementa a la energía solar durante el día y la noche de manera importante aún en velocidades bajas de viento, por lo cual es viable combinar energía eólica y solar en generación distribuida, como sistemas híbridos, considerando que en México tenemos un abundante recurso solar y que la energía eólica por sí sola no es rentable a bajas velocidades de viento. Sin embargo, si se combina la energía eólica con la energía solar, apenas afecta el ICB de la energía fotovoltaica y se disminuyen la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios, incrementándose el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables.

En este caso en la zona de Apodaca N.L., el sistema híbrido con aerogeneradores y SFV permitió disminuir el ICB un 15% y el periodo de retorno de inversión pasó de 8 a 10 años en comparación a usar solamente SFV, aunque se incrementó un 15% la captación de energía renovable en horarios donde la energía solar no está disponible.

Para el caso de la ubicación en Colón, Querétaro prácticamente no se presentan diferencias en el ICB y año de retorno de inversión, igualmente se observa un incremento de hasta 25% en la producción de energía renovable al plantear un sistema híbrido con aerogeneradores y SFV, en comparación a solamente usar SFV. Se mejora también el periodo de retorno de inversión de los aerogeneradores de 12 a 9 años combinados con los SFV.

De la misma forma, para Valle Hermoso, Tamaulipas, al analizar el uso de un sistema híbrido eólico-solar, se tiene una sensible mejora del ICB y el tiempo de retorno de la inversión, con un incremento en la captación de energía renovable de hasta 30%, a diferencia de usar solamente SFV. De la misma forma, se mejora el periodo de retorno de inversión de los aerogeneradores pasando de 10 a 8 años en combinación con el SFV.

Finalmente, en la ciudad de Unión Hidalgo, Oaxaca se observó un incremento del 10% en el ICB y una disminución de 1 año en el periodo de retorno de la inversión, así como un incremento del 40% en la captación de energía renovable, al proponer un sistema híbrido eólico-solar, a diferencia de usar SFV y aerogeneradores por separado.

REFERENCIAS

- [1] CRE, "Estadísticas de contratos de interconexión", comisión reguladora de la Energía https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/934907/Estadistica_GD_2024_Primer_Semestre.pdf (Accesado Enero,2024).
- [2] Iberdrola, "Energía eléctrica por hibridación cuando la unión de las renovables hace la fuerza", Iberdrola, <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-hibrida> (Accesado Octubre,2024).
- [3] Servicio Meteorológico Nacional, "Estaciones meteorológicas Automáticas", SMN. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> (Accesado Diciembre, 3, 2023)
- [4] CFE "Tarifas aplicables al sector industrial", CFE <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Industria.aspx>. (Accesado Diciembre ,2,2023).
- [5] J.L.Escobar y J.S.Jimenez, "Crisis Económica, Crisis energética y libre Mercado" *Revista Digital Universitaria UNAM*, Vol 10, no.5, pp 3-8, Dic. 2023.
- [6] L Bauer y S. Matysik, "Curvas de potencia de aerogeneradores", Wind-Turbine-Models.com. <https://es.wind-turbine-models.com/powercurves> (Accesado Diciembre, 15, 2023).
- [7] Enair "curvas de potencia de aerogenerador 10 kW y 20 kW", Enair. <https://www.enair.es/es/>, (Enero,4,2024).
- [8] P.E.Morthorst y S.Awerbuch, "The Economics of Wind Energy" *The European Wind Energy Association*, pp 26-30, Dic. 2023.
- [9] Solar gis, "Mapa de irradiancias en México" Solar Gis. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>. (Accesado Diciembre, 3, 2023)
- [10] Global Wind atlas, "Mapa de velocidades de viento en México", Wind Atlas. <https://globalwindatlas.info/es>. (Accesado Enero, 3, 2024)
- [11] L. Hesbert, "Capítulo IV Resultados obtenidos", en "Diseño de sistema híbrido para lograr abastecer de energía eléctrica a las instalaciones de la granja experimental agropecuaria de Yauris", edición no.1 Yauris, Perú : Universidad Nacional del centro de Perú, 2021, páginas 44-98

BIOGRAFÍAS



HERBÉ BARRIOS RODRÍGUEZ Pasante de la carrera de ingeniería en energías renovables de la Universidad Nacional a distancia de México UNADM y egresado de la carrera de diseño industrial de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí desarrollando proyectos de energía renovable



aplicados al diseño industrial orientados a la sustentabilidad y rentabilidad.



JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO Es Ingeniero Mecánico por la Universidad de Colima en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, tiene Doctorado del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Sus líneas de investigación y desarrollo son: Análisis y diseño de sistemas mecánicos, análisis de la mecánica de la fractura y análisis estructural de aspas de generadores eólicos.



LUIS FELIPE MARTINEZ SOTO Es Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro y Maestro en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Actualmente cursa estudios de Doctorado en Ingeniería en el Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro, desarrollando técnicas de pronóstico de energía solar de corto plazo para generación distribuida. Por otra parte, se desempeña como Gerente de Metrología Eléctrica y Termofísica en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial



Disminución de absorción de luz solar de la mezcla de polímeros P3HT:PCBM depositados en PET/ITO

CARLOS MONTERO TAVERA¹, ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ¹, WILMA BETZABÉ ROJAS SALINAS¹, MARIELY LOEZA POOT²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional unidad Mérida, Yucatán, México.

c.monterot@ugto.mx

noe.hernandez@ugto.mx

wilma.rojas@ugto.mx

mariely_lop@hotmail.com

RESUMEN En este trabajo se muestran los efectos de la radiación solar en la degradación óptica de la capa absorbente de luz formada por la mezcla de polímeros P3HT:PCBM depositados en un sustrato transparente (para permitir el paso de la radiación solar hasta la capa absorbente), orgánico y flexible (PET/ITO) formando el sistema PET/ITO/P3HT:PCBM el cual puede formar parte de una celda solar. La capa absorbente se depositó a temperatura ambiente sobre PET/ITO usando la técnica de spin-coating. Las celdas fueron expuestas a la radiación solar durante un periodo de tiempo de 4 meses obteniendo sus espectros de absorción, observando un decrecimiento importante en la intensidad de la absorción lo que puede impactar de manera directa en la eficiencia de la celda solar, en la cual este sistema puede formar parte.

PALABRAS CLAVE — Degradación, absorbancia, polímeros.

I. INTRODUCCIÓN

El interés en el uso de energías renovables y en la disminución de la contaminación ambiental, ha llevado a los investigadores a buscar diversas formas de generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables o abundantes como el sol [1], [2]. El sol emite energía electromagnética en todas las longitudes de onda conocidas, incluyendo la luz ultravioleta (UV), luz visible y luz infrarroja (IR). Solo la luz visible (380-750 nm), es utilizado por las celdas solares para convertir esa luz solar visible en corriente eléctrica. A este fenómeno se le conoce como efecto fotovoltaico.

De manera general, existen dos clasificaciones de celdas solares que se están investigando actualmente: celdas orgánicas, basadas en componentes flexibles o polímeros, que son cadenas largas compuestas por repeticiones de la misma molécula llamada monómero [3], y celdas inorgánicas como las de silicio y otros materiales [4], [5]. Dentro de las celdas orgánicas se pueden encontrar las celdas orgánicas rígidas y las celdas orgánicas flexibles. Las celdas solares orgánicas flexibles (CSOF) tienen la ventaja de que se pueden fabricar con métodos sencillos, de bajo costo y con materiales ligeros [6], aunque este tipo de celdas muestran eficiencias muy bajas, ya se distribuyen comercialmente por las marcas Armor, Heliateg, OPVIUS, Saule Technologies, entre otras, y se aplican en baterías electrónicas portátiles, sensores de baja potencia para el control de procesos industriales, ambientales y médicos, iluminación y aplicaciones militares como sistemas de vigilancia, sensores

y equipos de comunicaciones [7]. Actualmente, las CSOF más investigadas son las basadas en la capa absorbente de luz solar constituida por los polímeros P3HT (poli(3-hexiltiofeno-2,5-diil)) y PCBM ([6,6] fenil-C61-ácido butírico metil ester), que son polímeros conjugados conductores debido a la posición adyacente de sus enlaces simples y dobles [8], [9].

La capa absorbente (P3HT:PCBM) es la parte de la celda solar en donde se lleva a cabo la absorción de la energía solar y su posterior conversión a corriente eléctrica. Este sistema al estar expuesto a la luz solar se ve alcanzada no solo por la luz visible, sino también por la luz UV cuyo rango de longitud de onda va de 280-400 nm [10], pero de la cual solo absorbe la radiación de 315 a 400 nm. El efecto de la luz UV (y otros mecanismos de degradación [11]) es la causante de la degradación de la capa absorbente, disminuyendo significativamente la capacidad de absorción de la luz solar, e incluso modificando la estructura molecular de los polímeros.

En esta investigación analizaremos la degradación con el tiempo de la capa absorbente debido al efecto de la luz solar UV, para lo cual se expusieron las muestras a la luz solar directa durante un periodo de tiempo de 4 meses a temperatura ambiente. Lo anterior con el objetivo de comprender este fenómeno ya que, si hay degradación de la capa absorbente, se genera disminución de la absorción solar resultando también en la disminución de la eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica, por lo que este

sistema no podría formar parte de una celda solar para producir energía.

Con esta investigación contribuimos con el análisis y la obtención de los espectros de absorción de las celdas, para que puedan tomarse como referencia por los investigadores que se enfoquen en este tipo de materiales.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Los materiales utilizados en esta investigación fueron ITO/PET comercial (óxido de estaño-indio/polietilentereftalato), P3HT (poli(3-hexiltiofeno-2,5-diil), Sigma-Aldrich, 99.995%), PCBM ([6,6]fenil-C61-ácido butírico metil ester, Sigma-Aldrich, 99%), clorobenceno (CB, Sigma-Aldrich 98.9%), etanol (EQUIBA), y agua destilada (EQUIBA).

B. SÍNTESIS DE LOS MATERIALES

El sustrato ITO/PET fue limpiado en un baño ultrasónico con agua destilada, jabón y etanol, durante 8 minutos en cada etapa de limpieza. La mezcla de polímeros P3HT:PCBM fue sintetizada mezclando 10 mg de P3HT, 10 mg de PCBM y 1 ml de CB. Posteriormente, fue mezclada por agitación magnética y calentada en un baño maría a 53 °C durante 18 horas. La mezcla final fue depositada a temperatura ambiente sobre ITO/PET por el método de spin-coating [12].

C. CARACTERIZACIÓN

El sistema ITO/PET/P3HT:PCBM fue expuesto a la luz solar directa a temperatura ambiente. Para obtener los espectros de transmitancia y absorbancia en un rango de longitudes de onda de 300 a 900 nm, se utilizó un espectrómetro Ultravioleta-visible de la marca Ocean Optics modelo US 4000-XR1-ES.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se muestra el sustrato PET/ITO colocado sobre una imagen, con la intención de mostrar el grado de transparencia de este material antes de ser recubierto por la mezcla de polímeros P3HT:PCBM, y como se mencionó anteriormente, la luz solar debe alcanzar a la capa formada por esta mezcla, por lo que se utiliza PET/ITO transparente a la luz solar. En la Fig. 2, se muestran los espectros de absorbancia y transmitancia del sustrato ITO/PET antes de ser cubiertos por la capa absorbente formada por la mezcla de polímeros P3HT:PCBM, donde se puede observar que en longitudes de onda menores a 318 nm absorbe el 100% de la luz solar (curva roja), es decir a estos valores de longitud de onda la luz solar no puede viajar a través de ITO/PET, dando como resultado 0% de transmitancia de luz (curva negra). A

partir de los 318 nm la absorbancia comienza a disminuir hasta los 400 nm, donde este rango de longitudes de onda (318 nm a 400 nm) corresponde a luz UV. Se puede observar que por encima de los 400 nm la absorbancia tiende a estabilizarse hasta los 800 nm correspondiendo a las longitudes de onda de la luz visible (400 nm a 750 nm) y también a una parte de la luz IR (>750 nm), dando como resultado una absorbancia cercana al 20%, o un valor cercano al 80 de transmitancia de luz, es decir, el ITO/PET permite que el 80% de la luz solar llegue a la capa absorbente. Es importante notar que el ITO/PET transmite parte de la luz UV, transmite toda la luz visible, y también transmite parte de la luz IR, y que todas estas longitudes de onda alcanzan a la capa absorbente.



Fig. 1. Sustrato PET/ITO. Se puede observar la imagen debajo del sustrato.

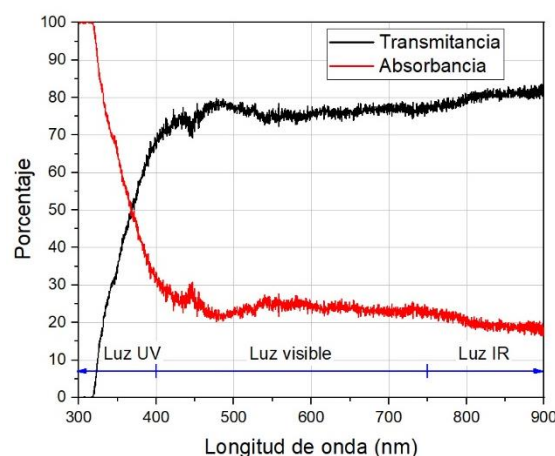


Fig. 2. Transmitancia y absorbancia del PET/ITO. Luz visible y parte de la luz UV e IR se transmiten a través del PET/ITO.

ITO/PET recubierto por la mezcla de polímeros P3HT:PCBM es mostrado en la Fig. 3. Como se puede observar, esta mezcla tiene un color café castaño como resultado de los polímeros que la componen [12], [13]. La mezcla de polímeros es depositada sobre el sustrato PET/ITO formando el sistema PET/ITO/P3HT:PCBM. Este sistema se expuso a la luz solar hasta 150 días con el objetivo de analizar su degradación, debido a que esto impacta directamente en la

absorción de luz solar, como se puede observar en las curvas de la Fig. 4. La curva en color negro corresponde al espectro de absorbancia del sistema expuesto a la luz solar inmediatamente después de haber sido formado. Esta curva (0 días), al igual que las otras curvas, muestra absorción máxima a longitudes de onda menores a 418 nm, lo que significa que absorbe luz UV. También se puede observar que, en cero días de exposición a la luz solar, en la longitud de onda de 400 nm comienza a aumentar el valor de la absorbancia hasta los 540 nm en donde se observa un rápido decrecimiento hasta los 700 nm. A partir de esta longitud de onda sigue existiendo decrecimiento de la absorbancia, pero de manera más lenta. Para las curvas con 30 y 60 días de exposición a la luz solar, por debajo de los 400 nm tienen el mismo comportamiento, pero a partir de este valor muestran distinto valor de decrecimiento en la absorbancia hasta los 724 nm en donde se observa otra vez un comportamiento similar con un valor de absorbancia estable cercana al 20%. En las curvas de 90, 120 y 150 días, se observa un comportamiento distinto en el decrecimiento de la absorbancia notando que, para 90 y 120 días el decrecimiento en la absorbancia se estabiliza a partir de los 700 nm, pero en la curva de 150 días de exposición la estabilidad en el decrecimiento se alcanza desde los 600 nm. Esta curva de absorbancia muestra un ligero aumento en la absorción de luz solar con respecto a la curva de absorbancia de 120 días. El aumento en la absorción se debe a que de manera interna la mezcla de polímeros se está reorganizando para seguir absorbiendo luz, pero al mismo tiempo continúa degradándose con el tiempo [10]. En la Fig. 5 se muestra el sistema PET/ITO/P3HT:PCBM con 150 días de exposición a la luz solar. Se puede observar que el color café castaño inicial (Fig. 3) se ha perdido por completo indicando la degradación total de la mezcla de polímeros P3HT:PCBM debido a la luz UV, resultando solo un color amarillo transparente característico de la degradación de los polímeros.



Fig. 3. P3HT:PCBM depositado sobre PET/ITO con cero días de exposición a la luz solar.

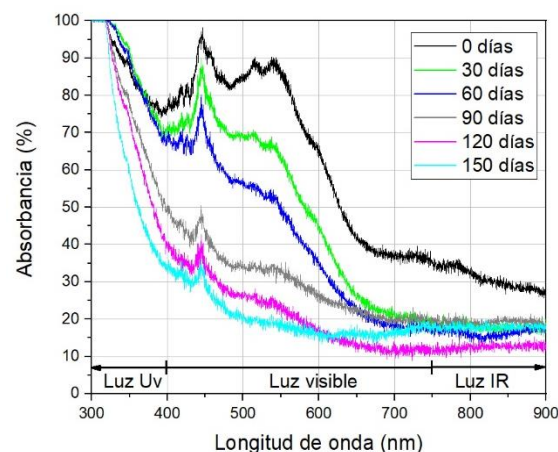


Fig. 4. Decrecimiento en la absorbancia al estar más días a la exposición solar.



Fig. 5. P3HT:PCBM depositado sobre PET/ITO con 150 días de exposición a la luz solar.

De manera general, en la Fig. 4 se nota una tendencia al decrecimiento de la absorbancia a mayor tiempo de exposición a la luz solar llegando a absorbancias aproximadas de hasta 10% (120 días), perdiendo casi toda su capacidad de absorción.

La capacidad de absorber luz en la mezcla de polímeros P3HT:PCBM se debe, entre otros mecanismos de degradación, a la absorbancia de la luz UV [11]. La luz UV al ser absorbida por la mezcla de polímeros ocasiona que se inicien reacciones de oxidación (capacidad de perder electrones) que provocan su degradación o capacidad de absorber luz y también cambios en la estructura molecular como se explica a continuación: cuando la luz UV (hasta unos 300 nm) interactúa con los polímeros (ver Fig. 6), debido a su alta energía es capaz de romper enlaces dentro de la estructura de estos, generando moléculas o radicales libres (R) que reaccionan con facilidad con otras moléculas y cambiando la estructura original del polímero a otro tipo de estructura. Una vez que se genera el radical libre, este reacciona con la presencia del oxígeno (O₂) del medio ambiente y se producen los grupos moleculares peróxido

(RO₂) e hidroperóxido (ROOH) como se ve en la ecuación 1 y 2.

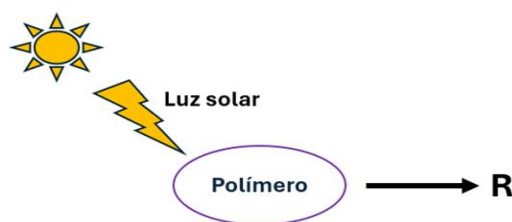
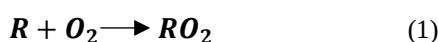


Fig. 6. El polímero se ve expuesto a la luz solar produciéndose los radicales libres.



La molécula del grupo peróxido a su vez reacciona nuevamente con el polímero generando las moléculas del grupo hidroperóxido y más radicales libres (R*) que también reaccionan con el oxígeno. El grupo peróxido e hidroperóxido al ser moléculas inestables se descomponen en otros grupos como los aldehídos, cetonas, entre otras, que tienen la característica de ser moléculas inactiva, es decir que ya no reaccionan con otras. Finalmente, el polímero se ramifica en otras cadenas. Este es un proceso cíclico (Fig. 7) que se repite hasta que el material es degradado completamente y por lo tanto la absorbancia de la luz solar desaparece. Al proceso explicado anteriormente se le conoce como fotooxidación [14], que en presencia de luz UV y oxígeno del medio ambiente provoca la degradación polimérica afectando la capacidad de absorción de luz solar como se pudo observar en las curvas de la Fig. 4. Para evitar que la luz UV degrade la mezcla de polímeros, se pueden emplear agentes químicos que interrumpan el proceso cíclico de fotooxidación o también se pueden emplear óxidos transparentes solo a la luz visible y que reflejen la luz UV [15].

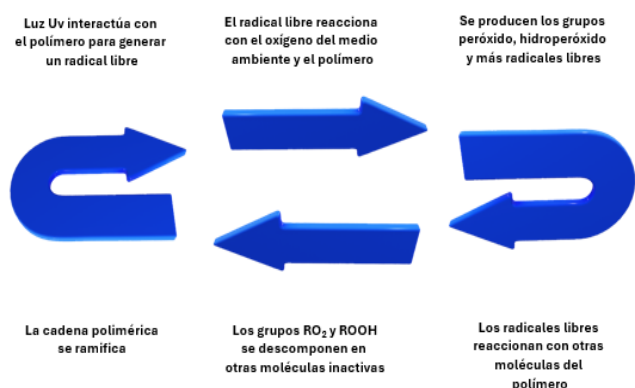


Fig. 7. Esquema simplificado del proceso cíclico de fotooxidación de los polímeros.

IV. CONCLUSIONES

Se observó que la mezcla de polímeros P3HT:PCBM (capa absorbente), al estar expuesta a la luz solar directa, con el paso del tiempo se ve afectada por la luz UV disminuyendo la capacidad de absorber luz solar al degradarse los polímeros por el efecto de fotooxidación. Después de 90 días de exposición, la capacidad de absorción solar se reduce significativamente, llegando a absorber aproximadamente sólo un 20% de la luz solar incidente. Esto significa que el 80% de la luz no es absorbido lo que disminuye la eficiencia de la celda solar para convertir luz solar en energía eléctrica, por lo que, en investigaciones futuras, se pueden incluir materiales que reflejen la luz UV para evitar o disminuir la degradación de los polímeros de la capa absorbente y aumentar la eficiencia de la celda solar en la que puede formar parte el sistema PET/ITO/P3HT:PCBM.

REFERENCIAS

- [1] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 1092-1105, Sep., 2016, DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.022.
- [2] A. Morales, M. Pérez, J. Pérez y S. De León, "Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México, Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, vol. 25, no. 70, pp. 92-101, 2017.
- [3] G. Martínez, "Polímeros", *Ciencias*, vol. 4, no. 139, pp. 18-24, [Online].
- [4] O. Noguera, R. Pinto, and J. Villarreal, "La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares," *ITECKNE*, vol. 15, no. 1, pp. 7, Jun. 2018, DOI: 10.15332/iteckne.v15i1.1959.
- [5] J. De Jesús, M. Basilio, and C. Antonio Hernández, "Celdas solares y la tecnología del silicio", *NEXTIA*, no. 8, pp. 11-16, 2019, [Online].
- [6] A. Vázquez, J. Nolasco, "Celdas solares orgánicas: una alternativa económica y sustentable", *Elementos*, no. 134, pp. 119-124, 2024.
- [7] Caballero, Ana, "Células solares orgánicas: energía sostenible y flexible", Abr. 2023. [Online]. Disponible en: <https://climate.selectra.com/>.
- [8] P. Berger and M. Kim, "Polymer solar cells: P3HT:PCBM and beyond," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, Jan. 2018, DOI: 10.1063/1.5012992.
- [9] L. Bolaños and L. Álvarez, "polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos," vol. 34, no. 1, pp. 18-38, 2018.
- [10] A. Tournebise et al., "New insights into the mechanisms of photodegradation/stabilization of P3HT:PCBM active layers using poly(3-hexyl-d 13-thiophene)," *Chemistry of Materials*, vol. 25, no. 22, pp. 4522-4528, Nov. 2013.
- [11] M. Jørgensen, K. Norrman, and F. Krebs, "Stability/degradation of polymer solar cells," vol. 92, no. 7, pp. 686-714, Jul. 2008. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.01.005.
- [12] M. I. Loeza, M. Zapata, R. J. Mis, J. L. Peña, and E. N. Hernández, "Iluminación y concentración de precursores: efectos sobre el P3HT:PCBM," *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial7, pp. 76-83, Dec. 2022, DOI: 10.29057/icbi.v10iespecial7.9831.
- [13] O. Plascencia, M. Oviedo, E. N. Hernández, "Estudio de las propiedades ópticas de un polímero P3HT PCBM para aplicación en celdas solares fotovoltaicas flexibles", vol. 3, pp. 2588-2592, 2017.
- [14] E. Yousif and R. Haddad, "Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review," no. 398, 2013. [Online].



C. Montero *et al.*: Disminución de absorción de luz solar de la mezcla de polímeros P3HT:PCBM depositados en PET/ITO.

[15] E. M. Lungulescu and T. Zaharescu, "Stabilization of polymers against photodegradation," *Advanced Structured Materials*, vol. 26, pp. 165–192, Nov. 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-25196-7_6.



CARLOS MONTERO TAVERA profesor invitado en el Departamento de Ingeniería Mecánica, DICIS, Universidad de Guanajuato. Realizó el doctorado en Ciencias de los Materiales en CINVESTAV unidad Querétaro.

BIOGRAFÍAS



ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Mecánica, DICIS, Universidad de Guanajuato. Realizó el doctorado en Física Aplicada en CICATA Legaria, Ciudad de México



WILMA BETZABÉ ROJAS SALINAS profesora y responsable del laboratorio de química de DICIS, Universidad de Guanajuato. Realizó su maestría en Biociencias en DICIVA, Universidad de Guanajuato.



MARIELY LOEZA POOT investigadora postdoctoral, CINVESTAV unidad Mérida. Realizó su doctorado en física aplicada en CINVESTAV unidad Mérida.



Determinación del potencial bioquímico de metano (BPM) de residuos de berenjena (*Solanum melongena*)

KARINA GONZÁLEZ-RAMÍREZ¹, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{2,3}, ANDREA DE JESÚS GÁRATE-OSUNA⁴, KARLA DENISSE LUNA-AVELAR^{3,5}, MIGUEL BETANCOURT-LOZANO³, JENNIFER VIANEY FÉLIX-MEDINA^{5,6*}.

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México.

²Maestría en Ciencias Aplicadas, Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

³Laboratorio de Ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

⁴Programa de Posgrado en Biotecnología, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.

⁵Estancias posdoctorales por México, CONAHICYT-Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, La Cruz, Sinaloa, México

⁶Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México.

kgonzalezr391@alumno.uaemex.mx

ulises.ballardo@ciad.mx

andregarateosuna@gmail.com

karla.luna@ciad.mx

mbl@ciad.mx

autor de correspondencia: jevianey9@gmail.com

RESUMEN En este trabajo se evalúa el potencial bioquímico de metano (BPM) mediante el proceso de digestión anaeróbica (DA) de biomasa de berenjena. Se emplea harina de berenjena (HB) como sustrato y se utiliza un inóculo obtenido de la empresa BeGaia® para las pruebas de BPM. Además se analiza la adición de nanopartículas de hierro (nZVI) como aditivo para mejorar el BPM. Los valores obtenidos son de $84.496 \pm 0.002\%$ de sólidos totales (ST) y $92.523 \pm 0.002\%$ de sólidos volátiles (SV) para la HB, mientras que para el inóculo se registran $59.029 \pm 0.02\%$ de SV y $7.127 \pm 0.02\%$ de ST. La digestión anaeróbica se mantiene por 55 días, logrando una producción acumulada de $333.99 \pm 33.63 \text{ ml CH}_4/\text{gSV}$ para la HB. La adición de nZVI genera una producción similar ($331.72 \pm 14.29 \text{ ml CH}_4/\text{gSV}$); sin embargo, se observa una mejora en el porcentaje de CH_4 del biogás, incrementando del $58.90 \pm 4.97\%$ al $68.17 \pm 3.80\%$. Aunque las nZVI no aumentan la producción acumulada, mejoran la calidad del biogás. Estos resultados aportan información valiosa para optimizar la gestión de residuos agrícolas mediante la producción de biogás.

PALABRAS CLAVE — Biogás, biomasa de berenjena, digestión anaeróbica, nanopartículas.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de cambio climático y búsqueda de alternativas energéticas sostenibles, las energías renovables se han posicionado como protagonistas clave en la transición hacia un futuro más limpio y resiliente [1].

México ha establecido ambiciosos objetivos para aumentar la participación de las energías renovables en su matriz energética. Las fuentes renovables, como la energía solar, eólica y la bioenergía, están siendo desarrolladas y expandidas para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

Según un estudio de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), México cuenta con una amplia variedad de recursos biomásicos disponibles, que incluyen residuos agrícolas, forestales, así como de la industria agroalimentaria. Estos materiales tienen un

potencial significativo para la producción de energía, tanto térmica como eléctrica [3].

Los residuos orgánicos (ROs) representan una fuente de materia prima abundante y ampliamente disponible para la producción de bioenergía [4].

Este tipo de energía proveniente de ROs se presenta como una opción especialmente prometedora, con un alto potencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la dependencia de fuentes fósiles y promover la economía circular [5].

Por otro lado, dentro de los ROs, se ubican los residuos agroindustriales, que usualmente mantienen una composición proximal que le confiere alto potencial para ser convertidos en diversos productos energéticos, ya sea biodiesel (mediante la transesterificación), biogás, mediante digestión anaeróbica o incluso bioetanol mediante fermentación alcohólica [6].



Dentro de los principales biocombustibles disponibles, el biogás (con alto contenido de metano), ha generado mucho interés ya que, mediante la generación de este, se descompone la materia orgánica para obtener una mezcla de gases con alto potencial energético [7].

La utilización de este producto energético aporta en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente metano, que de otro modo se liberaría a la atmósfera desde los vertederos [8].

Por otro lado, el biogás se genera en un proceso llamado digestión anaeróbica (DA), donde la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno. Este proceso es llevado a cabo por consorcios de microorganismos que degradan la materia orgánica y producen biogás (CH_4 y CO_2 , principalmente) como subproducto [6].

Un factor importante para considerar respecto a esta tecnología es que la conversión de residuos orgánicos en biogás puede generar ingresos adicionales para los productores, reducir los costos asociados con la gestión de residuos y promover la economía circular [9].

La nanotecnología está emergiendo como una herramienta prometedora para mejorar la producción de biogás, un proceso clave en la gestión de residuos y la generación de energía renovable [7].

Por otro lado, dentro de las opciones de residuos agroindustriales disponibles para este propósito, los subproductos de berenjena han tomado mucho interés como un material con potencial metanogénico considerable debido principalmente a algunos factores como su alta disponibilidad y su composición bioquímica única [10].

En México, la berenjena se cultiva principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora, y Michoacán, donde la producción nacional ronda en aproximadamente 40,000 toneladas de berenjena al año, con una creciente demanda tanto en el mercado nacional como en exportaciones; también, se ha reportado que una parte importante de esta producción (que no presenta la calidad de exportación) se clasifica como “segunda” y se queda en el mercado nacional, donde usualmente representan pérdidas, esto se traduce en que frutos completos pueden llegar a desecharse directamente como subproductos [11].

Además, la berenjena se utiliza de manera importante en la industria para producir extractos y conservas. Por otro lado, los antioxidantes presentes en la berenjena también se investigan para su uso en productos de salud y belleza, dicho procesamiento se puede traducir en la generación de residuos orgánicos, que normalmente no se disponen de manera adecuada y que su mal manejo puede representar problemas ambientales y de salud [12].

A pesar de la disponibilidad de ROs de berenjena y su potencial teórico para utilizarse como fuente de bioenergía, los estudios al respecto han sido vagamente explorados. Esta investigación se centra en evaluar el potencial metanogénico de los residuos de berenjena, analizando su composición química, la eficiencia de la digestión anaeróbica. Por ello, el presente estudio no solo busca contribuir al conocimiento científico sobre la valorización energética de residuos agrícolas, sino también proporcionar datos relevantes para el desarrollo de estrategias de gestión de residuos más sostenibles y rentables a nivel agrícola e industrial.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

1. Material vegetal.

Las muestras de berenjena fueron donadas por la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS).

Primeramente, los frutos se lavaron y desinfectaron con agua tibia y jabón. Una vez limpios los frutos se cortaron en rodajas de aproximadamente 5 mm de diámetro en una rebanadora de carnes frías (Modelo RPK-250B, Imbera Protek, Tlaquepaque, Jalisco, México). Posteriormente, se colocaron en charolas de aluminio y se secaron a 40 °C por 72 h en una estufa con circulación de aire caliente. Una vez secas, las rodajas de berenjena se trituraron en un molino de laboratorio y se pasaron por un tamiz de malla 60. Finalmente, la harina de berenjena (HB) se almacenó en bolsas de plástico herméticamente cerradas (Ziploc®), cubiertas con aluminio para protegerlas de la luz. Las bolsas fueron almacenadas a 4 °C hasta su posterior uso.

2. Inóculo

Se utilizó un inóculo (IBg) recuperado del digestor mesofílico de la empresa de biofertilizantes BeGaia, ubicado y operado en Mazatlán, Sinaloa.

3. Nanopartículas

Se utilizaron nanopartículas de hierro zero valente (nZVI), obtenidas mediante síntesis verde a través de biomasa de la microalga *Nannochloropsis oculata*. La formación de nanopartículas fue confirmada con microscopía electrónica de barrido (SEM), y a través de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) por los servicios de Servei de Microscopia y Servei d'Anàlisi Química Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona Spain. Dicho proyecto fue realizado en colaboración con el Grupo de Investigación en Compostaje (GICOM) en la Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.

B. MÉTODOS

1. Caracterización de inóculo y sustrato

Para la caracterización de inóculo y sustrato, se realizaron pruebas fisicoquímicas para determinar los contenidos de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad (H) y sólidos fijos (SF) o cenizas, las cuales se evaluaron según lo reportado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [13].

Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 105°C por 11 horas en un horno de secado, se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (w_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 1 g de muestra (sustrato), así como 12 g de muestra correspondientes al inóculo (IBg) y se registró su peso ($w_{muestra}$), finalmente se secaron las muestras a 105°C por 24 h. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso (w_{total}).

El porcentaje de ST se calculó utilizando la Ec. (1). Las pruebas se realizaron por triplicado y el resultado se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar [13].

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

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) [13].

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

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



Fig. 1. Crisoles con las muestras calcinadas.

2. Fase experimental

La evaluación del potencial bioquímico de metano (BPM) se realizó a partir del proceso de digestión anaeróbica, se utilizaron reactores de vidrio de 60 mL sellados con tapas de aluminio con septum hermético de politetrafluoroetileno (PTFE), a los cuales se les añadieron el IBg y la biomasa de HB como sustrato en una relación 2:1 (inóculo:sustrato), además se evaluó el efecto de la adición de nZVI sobre su BPM. Los reactores se colocaron por triplicado para cada tratamiento (Tabla I), con un volumen de trabajo de 40 mL [4,7].



Fig. 2. Reactores de cada tratamiento.

Paralelamente, el inóculo se utilizó como control negativo para restar su producción endógena de la producción generada por el sustrato, mientras que, como control positivo se emplearon reactores adicionados con celulosa [4,7].

TABLA I. COMBINACIÓN DE SUSTRATOS EN DA

Inóculo	Sustrato
IBg	HB
	HB+nZVI

IBg: inóculo del digestor mesofílico de la empresa de biofertilizantes BeGaia; HB: Harina de berenjena; nZVI: nanopartículas de hierro zero Valente.

Para la determinación del biometano producido por los reactores, se empleó un eudiómetro, en el cual por medio de una solución de hidróxido de sodio 1N ($NaOH$), se atrapó el dióxido de carbono mediante una trampa de metano CH_4 , de forma simultánea se empleó un manómetro SMC ISE20-P para la medición de la presión de los gases (MPa). Las pruebas de DA se realizaron con la incubadora CSRscentific CVP-500 con agitación constante a 150 rpm en condiciones de $37 \pm 1^\circ C$ por 55 días [4,7].



Fig. 3. Sistema de medición; eudiómetro y manómetro.

Finalmente, el porcentaje de remoción de materia orgánica (en % de SV) se calculó mediante la diferencia de SV presentes en el reactor al inicio y al final de la DA [4].

C. RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

La Tabla II muestra los resultados de la caracterización del sustrato e inóculo, se determinó que la humedad de la HB es del $15.504 \pm 0.02\%$, por otro lado, respecto a la cantidad de material disponible para la DA, presentó $84.496 \pm 0.02\%$, para los ST y $92.523 \pm 0.02\%$ correspondiente a los SV; la determinación de ST y SV, son esenciales para obtener información relevante sobre la cantidad y la calidad de la materia orgánica de un material, lo que es crucial para la gestión adecuada de residuos y para la optimización de procesos de tratamiento y digestión anaeróbica, los resultados obtenidos para HB muestran un alto contenido de materia orgánica disponible para transformarse en biogás, por lo que se podría considerar un sustrato adecuado [14]. En cuanto al inóculo se observó un alto contenido de SF, lo que indica que la cantidad de materia orgánica disponible es menor, esto se ha reportado previamente para lodos activados de este tipo [7].

TABLA III. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO E INÓCULO

Parámetros	HB	IBg
%H	15.504 ± 0.02	92.873 ± 0.02
%ST	84.496 ± 0.02	7.127 ± 0.02
%SV	92.523 ± 0.02	59.029 ± 0.02
%SF	7.478 ± 0.02	40.971 ± 0.02

H: Humedad; ST: Sólidos totales; SV: Sólidos volátiles; SF: Sólidos fijos o cenizas

2. Producción de biogás

La producción de biogás acumulada obtenida tras un tiempo de retención hidráulica de 55 días, fue de 333.99 ± 33.63 mL de CH_4/gSV para HB (Fig. 4), estos valores no se pueden comparar directamente con producción de biometano de residuos de berenjena, debido a que no hay reportes previos empleando este sustrato, sin embargo, fueron mayores a lo reportado por Gonzalez-Sanchez et al. [15], quienes analizaron residuos agroindustriales de mango y plátano, reportando una producción de 65 mL de CH_4/gSV , lo que podría indicar que emplear HB genera resultados prometedores en cuanto a potencial metanogénico.

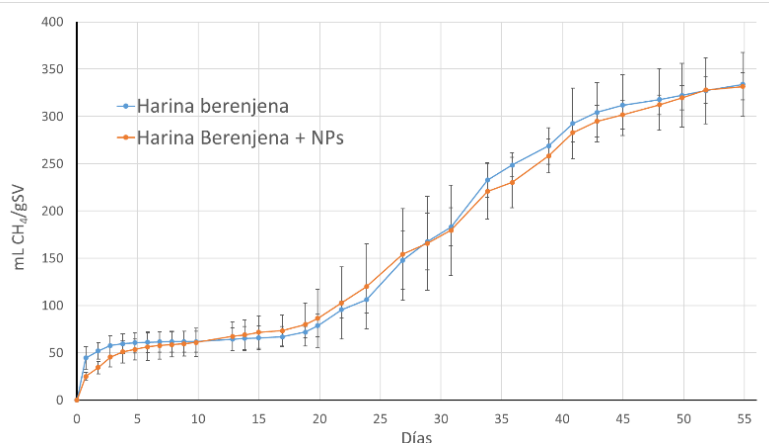


Fig. 4. Producción acumulada de metano a partir de Harina de Berenjena y nanopartículas.

3. Efecto de la adición de nanopartículas sobre el BPM

Las nanopartículas tienen un impacto significativo en el proceso de digestión anaeróbica al mejorar diversos aspectos de la eficiencia y estabilidad del proceso al actuar como catalizadores que facilitan la conversión de materia orgánica en metano [16, 17]. Las nanopartículas, especialmente las de hierro, pueden estabilizar el proceso de digestión anaeróbica al promover una reducción eficiente de compuestos tóxicos y mantener un equilibrio en las condiciones operativas del digestor. Esto ayuda a evitar fluctuaciones en la producción de biogás y en la calidad del digestato [18].

La adición de nZVI en el proceso de DA con HB (IBg+HB+nZVI), generó valores de producción acumulada de 331.72 ± 14.29 mL de $\text{CH}_4/\text{g SV}$, como se muestra en Fig. 4.

En el presente experimento no se observó una diferencia significativa en el BPM al añadir las nZVI en los reactores de DA. Sin embargo, en los resultados obtenidos correspondientes al porcentaje de metano presente en el biogás, se pudo observar una mejora al utilizar las



nanopartículas en los reactores, ya que las mezclas IBg con HB presentó 58.90 ± 4.97 % CH_4 , mientras que al añadir nZVI en los reactores este se elevó hasta 68.17 ± 3.80 % CH_4 . Este comportamiento podría deberse a que las nanopartículas, especialmente las de hierro, pueden estabilizar el proceso de digestión anaeróbica al promover una reducción eficiente de compuestos tóxicos y mantener un equilibrio en las condiciones operativas del digestor. Esto

III. CONCLUSIONES

La creciente preocupación por la gestión sostenible de residuos orgánicos y la valorización de desechos agrícolas mediante procesos biotecnológicos se ha convertido en una estrategia clave para reducir impactos ambientales y generar energía renovable. Los residuos de berenjena, un subproducto significativo en la industria alimentaria, en cuanto a su caracterización química se concluye que la harina de berenjena presenta alto contenido de materia orgánica disponible, que la proyecta como una opción prometedora para la generación de biogás, lo que se comprueba con un valor de BPM de 333.99 ± 33.63 mL de CH_4 /gSV.

Los resultados obtenidos indican que la adición de nanopartículas de hierro (nZVI), no presenta un efecto potenciador de la producción de metano de la HB (al menos en las condiciones del presente experimento), aunque se observó una ligera mejora en la calidad del biogás obtenido. Dicha información nos proporciona una base para futuras investigaciones y ajustes en la metodología para optimizar la producción de biogás a partir de este tipo de residuos agrícolas.

Se considera que este estudio es relevante, ya que, al no existir información científica que describa el aprovechamiento de este residuo, los resultados obtenidos podrían significar un avance para que futuros estudios puedan enfocarse en la optimización de condiciones de pretratamiento y en la caracterización detallada de las propiedades de los inóculos para mejorar la comprensión de su interacción con diferentes sustratos y aditivos. Asimismo, la evaluación de la estabilidad a largo plazo del proceso metanogénico y el análisis de la composición microbiológica de los inóculos podrían proporcionar información adicional valiosa para la mejora de la producción de biogás en aplicaciones industriales.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán por el apoyo en el desarrollo de este proyecto, a la empresa BeGaia S.A. de C.V. por la donación de lodos activados para las pruebas de DA. Se agradece a la MC Irma Eugenia Martínez Rodríguez (CIAD), por el apoyo en las actividades de caracterización de sustratos

ayuda a evitar fluctuaciones en la producción de biogás y en la calidad del digestato [18].

e inóculos, a la MC Gabriela Aguilar Zarate (CIAD) por el apoyo en el desarrollo de los cálculos y análisis de resultados, a la MC Francis Isela Marrujo López (CIAD), por el apoyo en el uso de la mufla, sí como a René Tonatiuh Herrera Álvarez, Valeria Monserrat Montes Núñez y Yadriessia González Arenas por el apoyo técnico en las mediciones de eudiometría.

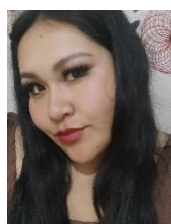
REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Estadísticas sobre el impacto del cambio climático en México," 2022. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/cambio-climatico/>.
- [2] A. T. de Oliveira, M. S. da Silva, and M. C. B. de Oliveira, "Renewable Energy in Mexico: Current Status and Future Perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 101-115, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.042.
- [3] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), "Estudio del Potencial de Biomasa en México," 2018. Disponible en: <https://www.conuee.org.mx/index.php/component/k2/item/367-estudio-del-potencial-de-biomasa-en-mexico>.
- [4] M. A. T. da Silva, A. M. A. de Lima, and M. C. B. de Oliveira, "Organic waste as a source of bioenergy: A review of the current state of knowledge," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 100-114, Dec. 2017.
- [5] M. M. Rahman, M. S. Hossain, and M. A. Khan, "Challenges and Benefits of Organic Waste for Bioenergy Production: A Review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 295, pp. 126411, Dec. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126411.
- [6] J. A. Silva, M. A. Gómez, and A. V. Pardo, "Uso de residuos agroindustriales para la producción de biogás en México," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 20, no. 1, pp. 45-58, 2021. DOI: 10.24275/rmiq/2021v20n1a4.
- [7] M. J. C. de la Rubia, R. A. Fernández, and M. J. Sánchez, "Biogas production from organic waste: Technologies and perspectives," *Waste Management*, vol. 59, pp. 199-208, Mar. 2017.
- [8] A. Rivera, J. Castillo, and C. Morales, "Impacto ambiental del biogás: Reducción de emisiones de metano y beneficios adicionales," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 19, no. 2, pp. 189-202, 2022. DOI: 10.29357/rca.v19n2a6.



- [9] F. Ruiz, M. Fernández, and J. Ortega, "Beneficios económicos del uso de biogás en la gestión de residuos," *Economía y Energía*, vol. 29, no. 2, pp. 79-90, 2021.
- [10] M. González, J. Rivera, and A. Pérez, "Cultivo y manejo de berenjena en México: Estado actual y perspectivas," *Rev. Mexicana Agricultura*, vol. 41, no. 2, pp. 115-129, 2022.
- [11] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Estadísticas de Producción Agropecuaria," 2023. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>.
- [12] A. J. García, M. T. Rodríguez, and J. L. Pérez, "Usos industriales de la berenjena: Extractos y aplicaciones en productos de salud," *Revista Latinoamericana de Ciencias*, vol. 18, no. 3, pp. 215-228, 2021. DOI: 10.5209/rlds.2021.18.3.215.
- [13] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 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>
- [14] N. A. Patil and M. K. Jha, "Assessment of total and volatile solids in organic waste management and their influence on anaerobic digestion processes," *Waste Management*, vol. 72, pp. 65-73, Dec. 2018.
- [15] González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yáñez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia Residuos agroindustriales metanización y composición bacteriana en digestión anaerobia. *ELSEIVER*, 15-23.
- [16] S. K. Gupta, A. P. Sharma, and R. V. Rao, "Application of nanoparticle-based catalysts for improved biogas production in anaerobic digestion," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 349-358, 2017.
- [17] M. Islam, M. A. Rahman, and M. A. Hossain, "Enhancing methane production from anaerobic digestion of organic waste using metal oxide nanoparticles," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 971-979, 2018.
- [18] R. Sánchez, A. Fernández, and J. Morales, "Innovaciones tecnológicas en el sector energético mexicano," *Ing. Tecnol. Energética*, vol. 22, no. 2, pp. 85-98, 2024.

BIOGRAFÍAS



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

ambientalistas y proyectos de impacto socioambiental en gobierno municipal.

DAVID U. SANTOS BALLARDO. Ingeniero Bioquímico; Maestro en



Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigador Titular B de CIAD Unidad Mazatlán; Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía;

Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

ANDREA DE J. GÁRATE OSUNA. Ingeniera en Energía de profesión.



Maestra en Ciencias Aplicadas con área de acentuación en Desarrollo Sustentable y Bioenergía. Actualmente cursando el Doctorado en Ciencias en Biotecnología, enfocado a la línea de investigación de medioambiente, donde ha desarrollado un proyecto de investigación para el aprovechamiento de biomasa de microalgas marinas bajo un concepto de biorrefinerías, con aplicaciones en sectores con gran impacto comercial como lo son bioenergía, nanomateriales, fitorremediación y la industria alimentaria, con el fin de promover las energías limpias como una alternativa para mitigar los estragos que ha dejado el cambio climático. Autora de artículos de revistas arbitradas y de divulgación científica, perteneciente al directorio de investigadores SSIT-CONFIE (investigadora asociada)..

KARLA D. LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y



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

acoplamiento de bioprocesos.



MIGUEL BETANCOURT LOZANO

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



JENNIFER VIANEY FELIX MEDINA Ingeniera Bioquímica; Maestra en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigadora en el Instituto Tecnológico de Culiacán; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2022; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigadora Honorífica. Actualmente desarrolla investigación relacionada con el aprovechamiento de sub-productos

de la industria alimenticia, además en el desarrollo de alimentos funcionales que promuevan la sostenibilidad de su producción



Efecto de la degradación de residuos de pescado empleando mosca soldado negro sobre el potencial metanogénico

ALONDRA ESTEFANÍA DE LA PARRA-LÓPEZ¹, MIGUEL BETANCOURT-LOZANO², BRUNO GÓMEZ-GIL³, ERICK JOSUE NAVARRO-BARRÓN^{4,5}, SOFÍA GUADALUPE LERMA-CARREÓN⁶, KARLA DENISSE LUNA-AVELAR^{2,4}

¹ Posgrado de maestría en ciencias aplicadas, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

² Laboratorio de Ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

³ Laboratorio de Genómica Microbiana, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

⁴ Estancias posdoctorales por México, CONAHCYT. México.

⁵ Ciencias de la salud en Universidad Autónoma de Occidente. Mazatlán, Sinaloa, México.

⁶ Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Culiacán, Sinaloa, México.

ade124@estudiantes.ciad.mx

mbl@ciad.mx

erick.barron@uadeo.mx

bruno@ciad.mx

sofialerma41@gmail.com

karla.luna@ciad.mx

RESUMEN En las comunidades pesqueras, los residuos de pescados y mariscos pueden representar hasta 40% del volumen colectado, generando problemas ambientales y socioeconómicos. Por ello, es crucial implementar estrategias que mejoren la producción y explorar bioprocesos como una solución a la alta generación de residuos. El presente estudio muestra el uso de larvas de mosca soldado para mejorar el potencial metanogénico de residuos de pescado mediante digestión anaeróbica. Se encontró que el frass (residuo digestivo de las larvas) de larvas alimentadas con residuos de pescado, tuvo características similares a estándares reportados: sólidos totales (19-34%), sólidos volátiles (69-72%), cenizas (29.21%), y un pH de 6.7-7.5. Notablemente, el frass mostró un potencial metanogénico 1.9 veces superior a los residuos de pescado crudos. Estos hallazgos muestran que combinar el cultivo de larvas con digestión anaeróbica para producir biogás a partir de residuos de pescado mejora el rendimiento, ofreciendo una estrategia prometedora para reducir la huella ambiental y promover la sostenibilidad en comunidades pesqueras.

PALABRAS CLAVE— Digestión anaeróbica, larvas de mosca soldado negra, potencial metanogénico, residuos de pescado, frass.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado del desperdicio en la cadena alimenticia representa en la actualidad graves amenazas en el contexto socioeconómico (pérdidas de oportunidad productiva) y ambiental (contaminación ambiental por escasez de vertederos [1]). Aunado a esto, se suman los riesgos para la salud, por lo que existe la necesidad de tomar medidas adecuadas para reducir el volumen de residuos mediante la adopción de prácticas de gestión estándar [2].

Entre el tipo de residuos que no son comúnmente aprovechados se encuentra el pescado, una materia prima perecedera que generalmente representa hasta un 40% como pérdida física [3]. A nivel mundial, los residuos de pescado

(RP) descartados anualmente se estimaron en 9.1 millones de toneladas (MT) [4].

La gestión adecuada de los residuos de pescado (RP) representa un desafío significativo debido a su alta inestabilidad biológica. Factores como el elevado contenido de agua, exceso de compuestos nitrogenados, la rápida autooxidación y la intensa actividad enzimática contribuyen a su rápida degradación y potencial de patogenicidad [5]. Sin embargo, a pesar de estas dificultades, los RP poseen un valor considerable debido a su rica composición en nutrientes y compuestos bioactivos. Estos componentes pueden ser aprovechados en diversos sectores, ofreciendo beneficios tanto ambientales como económicos a la sociedad [6].

Actualmente, se investigan diversos tipos de procesamiento y gestión de residuos de alimentos para obtener beneficios y aplicaciones sociales [7]. El enfoque de la digestión anaeróbica (DA) ha aparecido como una de las soluciones más prometedoras para la gestión de biomasa residual dado que es capaz de producir energía y nutrientes de manera simultáneamente [8].

Investigaciones recientes han reportado el potencial del frass (excremento) de larvas de mosca soldado-negra (BSFL) (*Hermetia illucens*) para producir biogás. Por ejemplo, se ha utilizado frass de residuos de alimentos (frutas y verduras) capaces de alcanzar producciones de metano (CH_4) entre 200-320 $\text{ml CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$ [9, 10]. En este sentido, no existen reportes de frass derivado de biotransformación de residuos pesqueros utilizando BSFL. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la degradación de residuos de pescado como ingrediente adicional a la dieta control utilizando larvas de mosca soldado negro (*Hermetia illucens*) como pre-tratamiento para mejorar el potencial metanogénico (PM) en el proceso de digestión anaeróbica. De esta manera, se espera lograr el aprovechamiento de residuos de procesos como cultivo larvario de BSFL y el procesamiento de pescado para brindar acceso a energía limpia, disponible, económica y confiable, que además permite combatir el cambio climático y sus efectos disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

II. DESARROLLO

A. MATERIAL Y MÉTODOS

1. Obtención de residuos de pescado crudo, frass de larvas e inóculo

Los RP (vísceras, piel, cabeza, espinas de sardina) fueron proporcionados por la empresa Alimentos Kay S. A. de C. V. de Mazatlán, Sinaloa. Para realizar los experimentos de DA, se emplearon como sustratos dos tipos de muestras: residuo de pescado crudo (RPC) y frass colectado del cultivo de larvas alimentadas con residuos de pescado (FRP). En la Fig. 1 se muestra el diagrama de trabajo que se siguió para la obtención y análisis de los sustratos para evaluar el potencial metanogénico mediante DA.



Fig. 1. Esquema de trabajo para la obtención de residuos de pescado crudo (RPC; verde) y frass de residuos de pescado (FRP; azul).

El FRP se obtuvo a partir de biotransformar los RPC mediante BSFL. Los RPC se procesaron a razón de 20 $\text{mg día}^{-1} \text{ larva}^{-1}$, durante 15 días a $28 \pm 1^\circ \text{C}$. Posteriormente, las larvas fueron separadas y el frass fue colectado para analizar el efecto de dicho bioproceso sobre su PM.

El inóculo fue colectado de un digestor anaeróbico de la empresa de biofertilizantes BeGaia, el cual procesa residuos agropecuarios (estiércol vacuno), ubicada en Escamillas, Sinaloa, México.

2. Caracterización de inóculo y sustrato

Previo a las pruebas de digestión anaeróbica, se caracterizaron los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) del inóculo y los sustratos (RPC y FRP). Para determinar estos parámetros, se utilizaron tres muestras de $2 \text{ g} \pm 0.1$ de sustrato y $10 \text{ g} \pm 0.1$ de inóculo, se midió su pH y posteriormente fueron sometidas a 105°C por 24 h en un horno y combustión a 550°C por 4 h.

3. Potencial metanogénico (PM)

Los experimentos de producción de biogás se realizaron por triplicado utilizando reactores de vidrio de 120 ml con un volumen de trabajo de 70 ml, sellados herméticamente y equipados con un septo para punción y medición del volumen de biogás producido. La determinación del PM de los sustratos (dieta antes y después de ser sometida a la degradación por BSFL) se realizó empleando una relación 2:1 (inóculo:sustrato); dicha producción fue medida empleando un eudiómetro que contenía NaOH 1N, en el cual el volumen desplazado corresponde a metano producido (en ml CH_4). Se consideró también un control negativo que contenía únicamente inóculo, cuyo resultado se utilizó para corregir la producción de metano residual por actividad endógena del inóculo. Finalmente, se realizó la comparación entre la producción de metano generada a partir de las



muestras con RPC, antes y después del proceso de degradación con BSFL. Los biodigestores experimentales se mantuvieron en una incubadora con agitación constante (150 rpm) a 37 ± 1 °C por 32 días [12].

4. Ajuste datos al modelo de Gompertz modificado

Los datos de producción acumulada de metano (ml CH₄ g⁻¹ SV) fueron ajustados empleando el modelo de Gompertz modificado que se muestra en la Ec. 1, la cual nos permite evaluar el efecto del proceso de degradación de BSFL sobre los sustratos mediante la estimación de la producción acumulada de metano.

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

donde M , es el potencial de biometano acumulado (PBM) (ml CH₄ g⁻¹ SV); P , la producción máxima de metano (ml CH₄ g⁻¹ SV); t , el tiempo (días); R_{max} , la tasa diaria máxima de producción de metano (ml CH₄ g⁻¹ SV día⁻¹); y , λ el tiempo de la fase de latencia (días) [13].

5. Remoción de materia orgánica

Finalizados los 30 días del experimento de DA, se evaluó la degradación de materia orgánica en los biodigestores, utilizando la Ecuación 2 para calcular el porcentaje de remoción de SV al final de la DA.

$$\%RM = 100 \cdot \left\{ \frac{(gSV_f \cdot 100)}{gSV_i} \right\} \quad (2)$$

Donde: %RM, es el porcentaje de remoción de materia orgánica; gSV_f : gramos de sólidos volátiles finales; y , gSV_i : gramos de sólidos volátiles iniciales.

6. Análisis estadístico

Los resultados de la producción acumulada de CH₄ obtenidos a partir de la DA de los sustratos se analizaron mediante un ANOVA de un solo factor (tipo de sustrato) acoplado con la prueba de rangos múltiples de Fisher (LSD, $p \leq 0.05$) para determinar las posibles diferencias en producción entre los tratamientos.

B. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de sustratos e inóculo

Los sólidos totales (ST) se definen como la cantidad de materia (incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos”) que permanece después de evaporar y secar una muestra. Los sólidos volátiles (SV) son aquellos que se liberan de la muestra, volatilizándose cuando ésta se calcina. Se considera que los SV poseen componentes orgánicos que teóricamente se pueden convertir en metano [14].

Los valores de SV y los ST son útiles para establecer las condiciones de operación del proceso anaeróbico, en el cual se estima el potencial de conversión de los sustratos a biogás. Sin embargo, un alto contenido de SV no necesariamente se traduce en un alto rendimiento de biogás, ya que el componente orgánico del sustrato puede contener una cantidad elevada de material de difícil degradación, como es el caso de la lignina [15]. Los resultados de la caracterización de los sustratos se presentan en la Tabla I.

Para RPC y FRP se obtuvieron valores de ST de 35 y 19 %, respectivamente, muy similar a lo reportado por [16] para frass obtenido del cultivo de BSFL con varios residuos de alimentos (35.4 %). Asimismo, los SV para ambos sustratos se encuentran entre 69-73 %, cercano a lo reportado por [9], cuyo valor fue de 85.4 % de SV. En cuanto al contenido de cenizas, [10] reportó para frass obtenido del cultivo de BSFL con orujo de zanahoria y remolacha, un 29.21 %, similar a los valores aquí reportados para RPC. Con respecto al inóculo proveniente del digestor alimentado con estiércol vacuno, los valores fueron similares a [17] quienes reportaron valores de 2.5 % de ST y 66.4 % de SV.

TABLA I. COMPOSICIÓN Y MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO

Material	Humedad (%)	ST (%)	SV (%)	Ceniza	pH
INO	96.8±0.1	3.2±0.1	62.1±0.7	37.9±0.7	7.3±0.1
RPC	65.5±0.8	34.5±0.8	72.6±2.9	27.4±2.9	7.1±0.1
FRP	80.8±1.5	19.21±1.5	69.3±1.6	30.7±1.6	7.3±0.1

ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles. Los valores representan el promedio de tres mediciones ± desviación estándar.

Es importante mencionar que el alto contenido de humedad en una materia prima puede favorecer el proceso de conversión bioquímica que se lleva a cabo sin la adición de agua, reduciendo así, el costo operativo que implica este recurso [18]. Sin embargo, el contenido de humedad dentro del sustrato puede afectar la actividad microbiana, la temperatura del compuesto y la velocidad de descomposición, pero puede facilitar el transporte de nutrientes [19]. En este sentido, el contenido de humedad de los sustratos e inóculo en este estudio varió de 65 a 97 % y fue comparable con lo reportado en la literatura. Asimismo, los valores de pH de las muestras se encuentran dentro de lo establecido para favorecer la producción de metano. El valor de pH óptimo de los microorganismos metanogénicos es de 6.7-7.5 [20].

2. Potencial metanogénico (ajuste al modelo de Gompertz modificado)

La medición de la producción de biogás y el análisis de la fracción de CH₄ se utilizan para determinar el potencial metanogénico (PM). A partir del PM se calcula el nivel de

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024

biodegradabilidad final, que representa el rendimiento de la conversión de metano a partir de sustratos orgánicos, con lo cual se pueden identificar inhibidores en la digestión anaeróbica del sustrato [21].

Para obtener la fracción experimental de metano en el biogás se utilizó el método volumétrico de desplazamiento a través de una solución alcalina de hidróxido de sodio con concentración de 1 normal (NaOH 1N) que captura el dióxido de carbono (CO₂) producido, proporcionando directamente la cantidad de metano [22]. Mientras que, la producción acumulada teórica se obtuvo a partir del ajuste de los datos experimentales con el modelo de Gompertz modificado, que describe la densidad bacteriana con respecto al tiempo, expresada como curva de crecimiento que tiene una fase de latencia y otra de crecimiento exponencial [23].

En la [Tabla II](#) se muestran los resultados obtenidos de la producción acumulada experimental y teórica de CH₄ a los 32 días experimentales. La [Fig. 2](#) muestra el comportamiento de las curvas de producción de metano para cada sustrato. El análisis estadístico mostró diferencias significativas en las producciones acumuladas experimentalmente, donde la FRP mostró una producción de metano superior respecto a RPC.

TABLA II. COMPOSICIÓN Y MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO

Parámetro	RPC	FRP
Producción experimental (ml CH ₄ gSV ⁻¹)	453.64 ± 7.99 ^B	898.33 ± 5.13 ^A
%CH ₄	68.97 ± 4.33 ^A	66.13 ± 4.23 ^A
Producción estimada ⁺ (ml CH ₄ gSV ⁻¹)	467.13	944.03
Producción diaria estimada ⁺ (ml CH ₄ gSV ⁻¹)	39.82	70.8
Fase Lag (días) ⁺	3.42	6.5
% mejora*		98.03
% de degradación	14.4 ± 0.1 ^B	27.9 ± 1.0 ^A

RPC: residuos de pescado crudos; FRP: Frass de residuos de pescado; NA: no aplica. *Respecto al PM de RPC; Letras diferentes muestras diferencias significativas. ⁺Calculado a partir del modelo de Gompertz modificado.

La producción de FRP obtuvo una producción global de metano de 898.33 ml CH₄ gSV⁻¹, que resultó 1.98 veces mayor que la obtenida con RPC. De hecho, la producción de FRP supera también en 4.49 y 2.81 veces a lo reportado por otros autores que han reportaron PM utilizando frass obtenido a partir de residuos orgánicos [9, 10].

Lo obtenido de FRP indica que la biotransformación utilizando BSFL es un pretratamiento efectivo para aumentar significativamente la producción de metano. Esto se debe a que las enzimas y microbiota de las larvas promueven la conversión de los sustratos en una forma más soluble y biodisponible para las microorganismos metanogénicos en la DA [12]. Lo anterior perfila la posibilidad para que los RP,

que es un sustrato poco estudiado, pueda ser utilizado para la producción de biocombustibles.

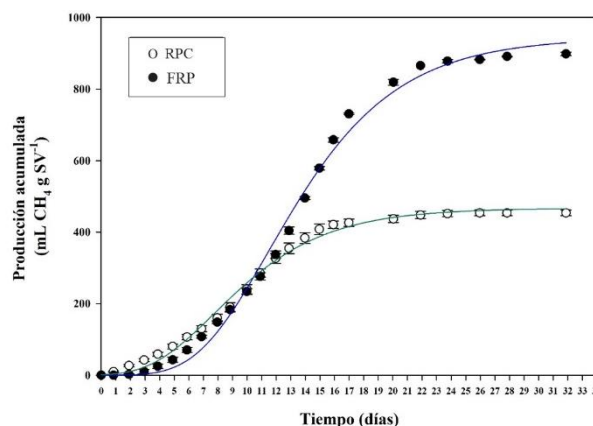


Fig. 2. Gráfica de la producción acumulada de metano (ml CH₄ gSV⁻¹) en RPC y FRP a los 32 días

La [Tabla II](#) muestra el porcentaje de remoción de materia orgánica, donde FRP muestra el mayor valor, es decir, 27.9 % de degradación, lo que es congruente con su mayor capacidad de producción de metano. Aunque no se tienen suficientes investigaciones en cuanto a la utilización de frass de BSFL con RP, autores como [24] han reportado que el desecho de pescado tiene un PM que oscila entre 250-350 ml CH₄ gSV⁻¹ para atún, sardina y caballa del Atlántico.

3. Acoplamiento de bioprocesos: BSFL Y DA.

En la [Fig. 3](#) se muestran los posibles bioproductos a generar utilizando el acoplamiento de bioprocesos como la DA y degradación con BSFL. Al hacer una comparación de los diferentes escenarios, se puede resaltar que el acoplamiento de la degradación con BSFL y DA, podría dar lugar a la generación de tres bioproductos, primeramente, el cultivo de larvas permitirá el crecimiento de las mismas alcanzándose una biomasa larval en base seca de 64.5g, así como la generación de 750g de frass, mismo que puede ser utilizado como materia prima (o sustrato) en la DA, obteniendo a su vez 209 l de metano y 121.97 kg de digestato (compuesto del sustrato degradado en combinación con el inóculo utilizado), que pueden ser aprovechados en forma de combustible o energía y fertilizante, respectivamente. Mientras que la biomasa larval puede ser convertida en harina rica en nutrientes para alimentación animal [9]. Cabe señalar que las proporciones indicadas anteriormente se basan en el uso de 1kg de residuo de pescado en dichos bioprocesos.

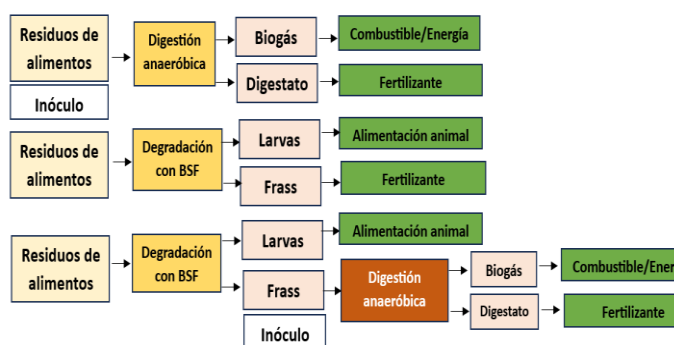


Fig. 3. Esquema de tres estrategias de tratamiento posibles para residuos de alimentos [9]

III. CONCLUSIONES

El frass que se generó con el tratamiento de BSFL al incorporar RPC, demostró ser un buen sustrato en el proceso de DA para la generación de metano. Este superó 1.9 veces a la muestra cruda de RPC, es decir, sin haber sido tratada por BSFL. Los resultados obtenidos superan en 4.5 y 2.8 veces a los reportados por trabajos recientes que han utilizado frass de residuos orgánicos para la generación de metano.

Bajo un escenario de acoplamiento de los bioprocesos de BSFL y DA, permitirá la generación de al menos tres bioproductos de interés como lo son: el biogás, que se puede utilizar como combustible o energía; el digestato que cumple su función como fertilizante y la biomasa larval que es convertida en harina rica en nutrientes para la alimentación animal. Por lo anteriormente descrito, se recomienda explorar la alternativa de valorización de RPC de comunidades pesqueras para mejorar la cadena de valor mediante un enfoque de economía circular.

REFERENCIAS

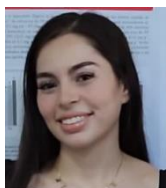
- [1] K. He, Y. Liu, L. Tian, W. He, y Q. Cheng, "Review in anaerobic digestion of food waste", *Heliyon*, vol. 10, núm. 7, p. e28200, abr. 2024, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28200.
- [2] K. Paritosh, S. K. Kushwaha, M. Yadav, N. Pareek, A. Chawade, y V. Vivekanand, "Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling", *BioMed Res. Int.*, vol. 2017, p. 2370927, 2017, DOI: 10.1155/2017/2370927.
- [3] F. Kruijssen, I. Tedesco, A. Ward, L. Pincus, D. Love, y A. L. Thorne-Lyman, "Loss and waste in fish value chains: A review of the evidence from low and middle-income countries", *Glob. Food Secur.*, vol. 26, p. 100434, sep. 2020, DOI: 10.1016/j.gfs.2020.100434.
- [4] M. A. P. Roda *et al.*, *A third assessment of global marine fisheries discards*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
- [5] C. O. García-Sifuentes, S. M. Scheuren-Acevedo, J. C. Zamorano-Apodaca, C. O. García-Sifuentes, S. M. Scheuren-Acevedo, y J. C. Zamorano-Apodaca, "Explorando diferentes subproductos considerados como residuos por la industria pesquera en México", *Biotechnia*, vol. 22, núm. 2, pp. 61–69, 2020, DOI: 10.18633/biotechnia.v22i2.1246.
- [6] D. Coppola, C. Lauritano, F. Palma Esposito, G. Riccio, C. Rizzo, y D. de Pascale, "Fish Waste: From Problem to Valuable Resource", *Mar. Drugs*, vol. 19, núm. 2, p. 116, feb. 2021, DOI: 10.3390/md19020116.
- [7] T. N. B. Dung, B. Sen, C.-C. Chen, G. Kumar, y C.-Y. Lin, "Food Waste to Bioenergy via Anaerobic Processes", *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 307–312, ene. 2014, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.1113.
- [8] M. Morita y K. Sasaki, "Factors influencing the degradation of garbage in methanogenic bioreactors and impacts on biogas formation", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 94, núm. 3, pp. 575–582, may 2012, DOI: 10.1007/s00253-012-3953-z.
- [9] C. Lalander, Å. Nordberg, y B. Vinnerås, "A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces – assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion", *GCB Bioenergy*, vol. 10, núm. 2, pp. 84–91, 2018, DOI: 10.1111/gcbb.12470.
- [10] P. Bulak, K. Proc, M. Pawłowska, A. Kasprzycka, W. Berus, y A. Bieganski, "Biogas generation from insects breeding post production wastes", *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118777, ene. 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118777.
- [11] APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater." 1999.
- [12] I. Ferrer, S. Ponsá, F. Vázquez, y X. Font, "Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion", *Biochem. Eng. J.*, vol. 42, núm. 2, pp. 186–192, nov. 2008, DOI: 10.1016/j.bej.2008.06.020.
- [13] S. Ponsá, T. Gea, y A. Sánchez, "Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates", *Biosyst. Eng.*, vol. 108, núm. 4, pp. 352–360, abr. 2011, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.01.007.
- [14] FAO, "Manual de biogás". 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [15] T. D. Yavini, A. I. Chia, y A. John, "Evaluation of the effect of total solids concentration on biogas yields of agricultural wastes", *Int Res J Env. Sci*, vol. 3, núm. 2, pp. 70–75, 2014.
- [16] S. S. Win, J. H. Ebner, S. A. Brownell, S. S. Pagano, P. Cruz-Diloné, y T. A. Trabold, "Anaerobic digestion of black soldier fly larvae (BSFL) biomass as part of an integrated biorefinery", *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 705–712, nov. 2018, DOI: 10.1016/j.renene.2018.04.093.
- [17] K. D. Luna-Avelar *et al.*, "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 Bioprod. Process.*, vol. 128, pp. 143–152, jul. 2021, DOI: 10.1016/j.fbp.2021.04.015.
- [18] R. Gumisiriza, J. F. Hawumba, A. Balyeidhusa, M. Okure, y O. Hensel, "Processing of East African highland green bananas: waste generation and characterization as a potential feedstock for biogas production in Uganda", *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci. ASRJETS*, vol. 53, núm. 1, pp. 215–236, 2019.
- [19] R. Mrosso, A. C. Mecha, y J. Kiplagat, "Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: Effect of parameters", *Heliyon*, vol. 9, núm. 5, p. e16360, may 2023, DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16360.
- [20] D. Deublein y A. Steinhauser, *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons, 2011.
- [21] I. Angelidaki *et al.*, "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays", *Water Sci. Technol.*, vol. 59, núm. 5, pp. 927–934, mar. 2009, DOI: 10.2166/wst.2009.040.



- [22] L. M. Cárdenas-Cleves, B. A. Parra-Orobio, P. Torres-Lozada, y C. H. Vázquez-Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos”, *Rev. ION*, vol. 29, núm. 1, pp. 95–108, 2016.
- [23] X. Pan *et al.*, “Methane production from formate, acetate and H₂/CO₂; focusing on kinetics and microbial characterization”, *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 796–806, oct. 2016, DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.032.
- [24] M. Eiroa, J. C. Costa, M. M. Alves, C. Kennes, y M. C. Veiga, “Evaluation of the biomethane potential of solid fish waste”, *Waste Manag.*, vol. 32, núm. 7, pp. 1347–1352, jul. 2012, DOI: 10.1016/j.wasman.2012.03.020.

BIOGRAFÍAS

ALONDRA ESTEFANÍA DE LA PARRA LÓPEZ Ingeniera en biotecnología egresada de la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN). Actualmente cursando el posgrado en maestría en ciencias en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Mazatlán con un enfoque en la investigación para la mejora en la producción de biogás a partir de diferentes residuos como el pescado y el frass de mosca soldado negro (BSF), así como el aprovechamiento de sus subproductos como digestato y biomasa larval.



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



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



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



se dirige al estudio de la biodiversidad de bacterias en sistemas de bioprocesos acoplados.

SOFÍA GUADALUPE LERMA CARREÓN Licenciada Química Farmacéutica Bióloga egresada de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Ha realizado investigación en metagenómica trabajando con cultivo de larva de mosca soldado negro (BSF) para clasificación taxonómica y funcional de su microbiota intestinal.



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



Análisis de estrategias de modulación para un DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje

LUIS ALEJANDRO AVILA ALVAREZ, LUIS EDUARDO UGALDE CABALLERO.

Programa de graduados e investigación en ingeniería eléctrica
TecNM/ITMorelia
m18121617@morelia.tecnm.mx
luis.uc@morelia.tecnm.mx

RESUMEN Actualmente los convertidores DC-DC con capacidad de flujo de potencia bidireccional son un campo de investigación de interés, debido a sus aplicaciones en la integración de energías renovables, movilidad eléctrica y sistemas de almacenamiento de energía. En este trabajo se presenta el estudio de la topología del convertidor DC-DC DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje, inicialmente se presentan los fundamentos teóricos del convertidor y posteriormente se analiza su comportamiento utilizando las estrategias de modulación a Single Phase Shift, Extended Phase Shift, Dual Phase Shift y Triple Phase Shift, evaluando las ventajas en la implementación de cada uno.

PALABRAS CLAVE— Dual Active bridge, desplazamiento de fase, DAB configuración bajo voltaje paralelo-serie alto voltaje.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente tendencia en la integración de fuentes de generación en corriente directa (Direct Current, DC) está impulsando el uso de convertidores DC-DC basados en electrónica de potencia para la conexión, transmisión y conversión de energía. Estos convertidores poseen un papel importante en la interconexión de sistemas de energía renovable, sistemas de almacenamiento y vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EV) [1].

Para su integración en sistemas eléctricos de potencia (Power Electric System, PES) o para sistemas eléctricos aislados, es necesario la implementación de un convertidor que permita la gestión del flujo de potencia de manera bidireccional y brinde aislamiento galvánico para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro.

Entre los convertidores bidireccionales DC-DC aislados (isolated bidirectional dc-dc converters, IBDCs), existe el puente activo doble, (Dual Active Bridge, DAB) el cual ofrece la capacidad de flujo de potencia bidireccional, alta densidad de potencia, aislamiento galvánico y flexibilidad en gestión de potencia [1-3].

El convertidor DAB consiste en la conexión de dos puentes activos conectados entre sí por un transformador de alta frecuencia (High Frequency Transformer, HFT), cada puente es controlado con un ciclo de trabajo constante para generar una onda cuadrada de voltaje en las terminales del transformador, a las cuales se les puede aplicar un desplazamiento de fase para controlar el flujo de potencia desde un puente a otro [4].

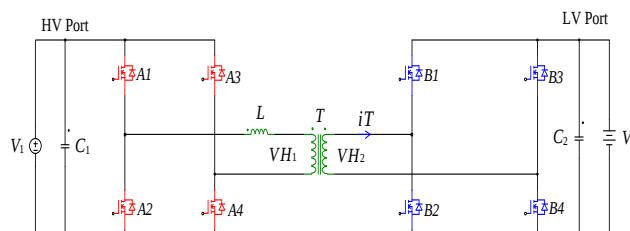


Fig. 1. Convertidor cd-cd bidireccional: Topología convencional DAB.

Con el fin de aumentar la eficiencia del DAB, se han realizado numerosos estudios que plantean modificaciones en su estructura, como la estructura presentada en [1], donde se propone la conexión en paralelo de dos puentes activos en el lado de bajo voltaje por medio de dos HFTs a un puente activo en el lado de alto voltaje conectado en serie con los devanados de los transformadores, lo que permite distribuir la corriente entre los dos puentes de baja tensión a la mitad para mejorar el flujo de potencia [3]. A esta topología se le llama DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje.

Distintas estrategias de modulación por desplazamiento de fase también se han planteado para modificar y mejorar la respuesta del convertidor convencional DAB, como son: desplazamiento de fase simple (Single Phase shift, SPS), desplazamiento de fase extendido (Extended Phase Shift, EPS), desplazamiento de fase doble (Dual Phase Shift, DPS) y desplazamiento de fase triple (Triple Phase Shift, TPS) [3-6].

En el presente artículo, se estudia el desempeño de las estrategias de modulación SPS, EPS, DPS y TPS en la topología DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje con el fin de encontrar el método de modulación más eficiente para la topología.

En la Sección II se describen las arquitecturas de la configuración convencional DAB y la configuración DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje (parallel-LV series-HV DAB-based). La Sección III describe el modelado con el que se realizarán las pruebas de cada estrategia de modulación y la implementación de las mismas junto con una descripción de su funcionamiento y las respectivas formas de onda resultantes de su simulación. La sección IV presenta una comparativa del funcionamiento entre la configuración convencional y la topología bajo voltaje paralelo-serie alto voltaje. Las observaciones finales se detallan en la Sección V.

II. CARACTERIZACIÓN DEL CONVERTIDOR

A. CONFIGURACIÓN CONVENCIONAL DAB

Debido a su característica de gran densidad de potencia con relación a su tamaño y peso reducidos, el convertidor convencional DAB es ideal para su integración en EVs. El transformador de alta frecuencia provee aislamiento galvánico, alta eficiencia, y capacidad de reducción o elevación de tensión en una estructura compacta.

La configuración convencional del convertidor DAB se muestra en la Fig. 1. Propuesta originalmente en 1990 por [7], este convertidor bidireccional basa su funcionamiento en dos puentes completos conectados por un transformador de alta frecuencia. La inductancia de fuga (L) del transformador se emplea tanto para almacenar energía como para transferir potencia [4, 8].

Ambos puentes son controlados para generar una forma de onda cuadrada de Voltaje a alta frecuencia en el lado primario (V_1) y secundario (V_2) del transformador. Para lograr la bidireccionalidad en la transmisión de potencia, se realiza un desplazamiento de fase entre las señales V_1 y V_2 , con un ciclo de trabajo en 50% [8]. A los métodos de desplazamiento de fase se les denomina estrategias de modulación.

Existen varias estrategias de modulación, tales como: SPS, EPS, DPS, y TPS. La técnica de modulación más sencilla es la SPS, se basa en el desfase δ de las tensiones V_1 y V_2 el cual controla la magnitud y dirección de la energía entre los dos puentes [4, 9].

El flujo de potencia (P) se puede expresar con la Ec (1):

$$P = \frac{nV_1V_2}{2\pi f_s L} \delta \left(1 - \frac{\delta}{\pi}\right) \quad (1)$$

Donde δ es el valor del ángulo de desfase, V_1 y V_2 son los voltajes de entrada y salida, f_s es la frecuencia de conmutación, n es la relación de transformación del transformador y L es el valor de la inductancia de fuga [8].

La modulación SPS se logra únicamente a través del ajuste del desplazamiento de fase δ entre ambos puentes, mientras que las modulaciones DPS, EPS y TPS presentan grados de control adicionales al desplazamiento de fase δ entre los puentes, se utilizan desplazamientos de fase interiores α y β , produciendo un voltaje de CA de tres niveles en ambos puentes [2, 8, 9].

B. CONFIGURACIÓN PARALELO BAJO VOLTAJE-SERIE ALTO VOLTAJE

La configuración DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje basada en la topología convencional DAB es mostrada en la Fig. 2 y propuesta en [3], presenta un arreglo distinto a la topología convencional DAB expandiéndola a tres puentes, colocando una inductancia de fuga en el lado de alto voltaje conectada en serie a dos transformadores (T_1 , T_2) de alta frecuencia, a los cuales se les conectan dos puentes completos en paralelo en el lado de bajo voltaje.

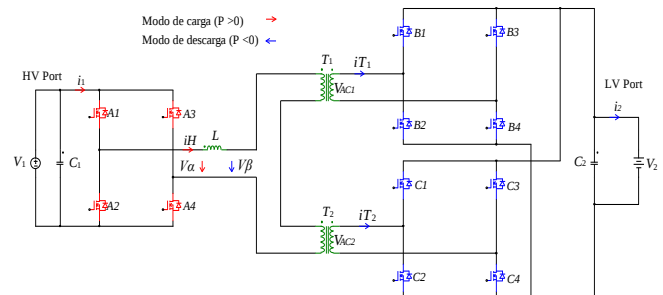


Fig. 2. Convertidor DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje.

El aumento en el número de componentes provoca que el costo del dispositivo aumente, sin embargo, permite también una mayor corriente de operación para aplicaciones que requieran mayor densidad de potencia entre los puertos de entrada y salida [3].

III. MODELADO Y CONTROL

La configuración del convertidor analizada en este trabajo permite la integración de ángulos de desplazamiento internos y externos que permiten lograr conmutación suave y optimización de la corriente circulante por los componentes, reduciendo el estrés por conmutación en los interruptores. Para lograr la conmutación suave se considera la conmutación de los dispositivos por pares: (A1, A2), (A3, A4), (B1, B2)/(C1, C2) y (B3, B4)/(C3, C4).

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó la evaluación del convertidor usando componentes ideales, sin considerar los capacitores de C_1 y C_2 de la Fig. 1. Con el fin de observar claramente las diferencias entre las técnicas de conmutación.

El cálculo del flujo de potencia del convertidor paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje esta dado por la Ec (2):

$$P = nV_1V_2 \frac{\delta(\pi-|\delta|)}{2\pi^2 f_s L} = \frac{nV_1V_2}{2\pi f_s} \delta \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right) \quad (2)$$

Donde n es la relación de transformación de T_1 y T_2 . La Ec (3) muestra la relación entre la potencia transferida en función del desplazamiento de fase (δ) entre el puente de alta tensión y los puentes de baja tensión, la frecuencia de conmutación y la inductancia de fuga. La potencia máxima ocurre cuando $\delta = \pm\pi/2$.

El desplazamiento de fase puede ser expresado con la Ec (3):

$$\delta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8f_s L |P|}{nV_1V_2}}\right) \quad (3)$$

La modulación SPS (Fig. 3) se logra únicamente a través del ajuste del desplazamiento de fase δ entre ambos puentes. Las modulaciones EPS (Fig. 4), DPS y TPS (Fig. 5) presentan además de un desplazamiento de fase exterior, δ , un desplazamiento de fase interior α para el puente de alto voltaje y β para los puentes de bajo voltaje [2, 8, 9].

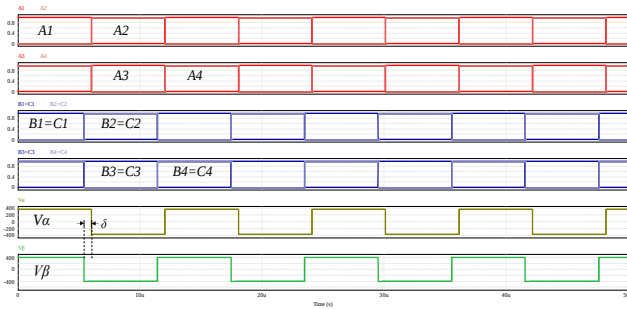


Fig. 3. Señales de encendido y apagado con desplazamiento de fase integrado para la modulación SPS.

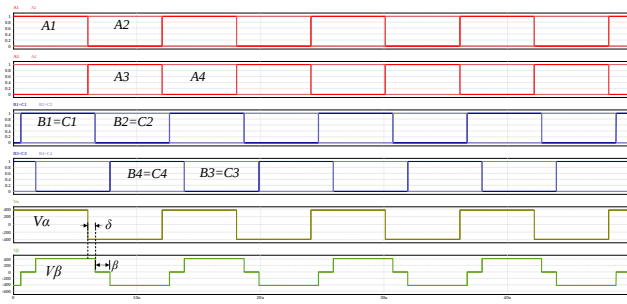


Fig. 4. Señales de encendido y apagado con desplazamiento de fase integrado para la modulación EPS.

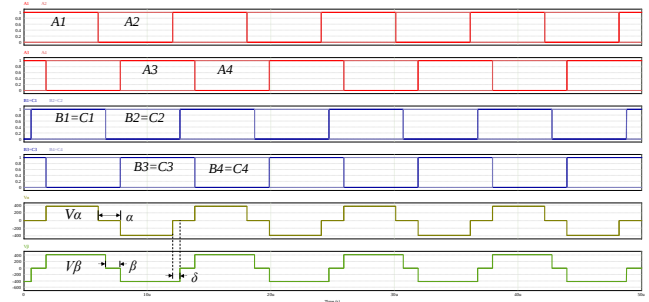


Fig. 5. Señales de encendido y apagado con desplazamiento de fase integrado para las modulaciones DPS y TPS.

La simulación del convertidor se llevó a cabo con los parámetros mostrados en las Tablas I y II, considerando los modos elevador y reductor del convertidor.

TABLA I. PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR EN MODO REDUCTOR

Parámetro	Valor
Voltaje nominal, V_1	380 V
Voltaje nominal, V_2	48 V
Relación de transformación de los transformadores, $n1/n2$	4:1
Inductor de potencia, L	20 μ H
Frecuencia de conmutación, f_s	83 kHz

TABLA II. PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR EN MODO ELEVADOR

Parámetro	Valor
Voltaje nominal, V_1	370 V
Voltaje nominal, V_2	50 V
Relación de transformación de los transformadores, $n1/n2$	4:1
Inductor de potencia, L	20 μ H
Frecuencia de conmutación, f_s	83 kHz

A. METODOS DE CONTROL POR DESPLAZAMIENTO DE FASE

1. Single Phase Shift

La modulación SPS es el método de control más usado para investigaciones gracias a su fácil implementación [5]. Es un control adecuado para aplicaciones donde la relación del voltaje de entrada y salida es fija, por lo que su uso es popular para transferir potencia en corriente directa.

La eficiencia del convertidor es principalmente afectada por pérdidas por conducción. Esta pérdida está relacionada con el valor de la corriente pico, y la corriente RMS está relacionada con pérdidas por corriente circulante. Cuando el voltaje de entrada y salida del convertidor varían, la corriente pico y RMS aumenta, lo que provoca que la eficiencia del método SPS se reduzca debido a las pérdidas por conmutación [2, 11].

En la modulación SPS, los pares de interruptores en ambos lados del convertidor son conmutados para generar ondas cuadradas con un ciclo de trabajo del 50 % en ambos lados del transformador.

A través del ajuste de δ entre los interruptores del lado de alta tensión (A1, A2), (A3, A4) y los interruptores de baja tensión (B1, B2)/(C1, C2), (B3/B4)/(C3,C4) la dirección y magnitud de la potencia del convertidor puede ser controlada.

En las Fig. 6 y Fig. 7 se muestran las formas de onda principales del convertidor DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje.

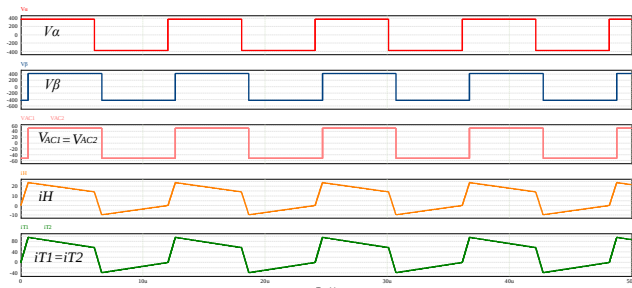


Fig. 6. Resultados de simulación para el método SPS en modo reductor.

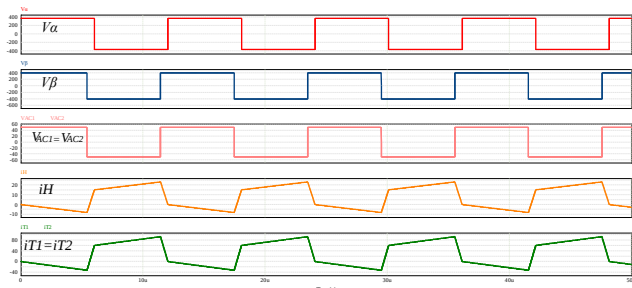


Fig. 7. Resultados de simulación para el método SPS en modo elevador.

El voltaje AC producido por el convertidor con la implementación del método SPS resulta en una forma de onda cuadrada de dos niveles ($V\alpha$ y $V\beta$) en ambos lados del convertidor con valores de voltaje reducidos (Fig. 6) o elevados (Fig. 7), lo que se observa en la tensión de AC V_{AC1} y V_{AC2} , dependiendo del modo de operación. Los valores de la corriente RMS en modo reductor ($iT_1 = iT_2 = 56.68 A_{RMS}$) y en modo elevador ($iT_1 = iT_2 = 53.93 A_{RMS}$), estos valores sirven como referencia para comparar la reducción de corriente de los métodos de control.

2. Extended Phase Shift

Con el fin de mejorar el desempeño del convertidor bajo condiciones de voltaje variable, se puede optar por la modulación EPS.

Comparado con la modulación SPS, esta modulación puede aumentar la eficiencia gracias a la reducción de la corriente circulante no deseada, producida por las

fluctuaciones de voltaje entre los puentes de alto y bajo voltaje, y detectada como interferencias electromagnéticas en los puntos donde existe una interacción entre ambos puentes. Cuando esto ocurre, tanto la corriente pico como la corriente RMS que circula por el transformador aumentan. Reducir estas corrientes permite obtener un mejor resultado en rangos más amplios de voltaje [2, 3].

La implementación de este método es más complicada que la modulación SPS, pero más sencilla que las modulaciones DPS y TPS.

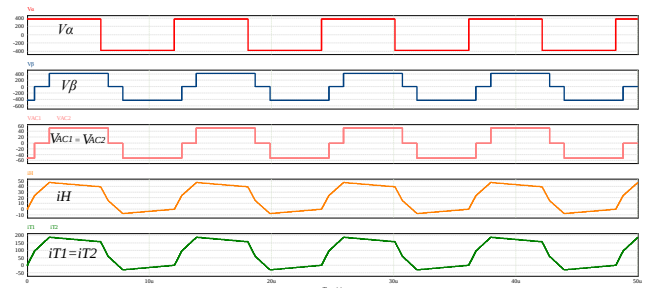


Fig. 8. Resultados de simulación para el método EPS en modo reductor.

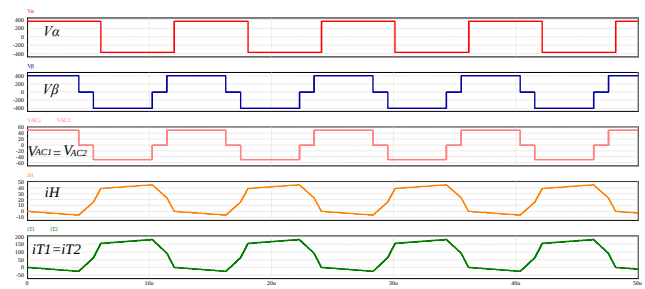


Fig. 9. Resultados de simulación para el método EPS en modo elevador.

En esta modulación, los pares de interruptores de uno de los lados del convertidor son conmutados con un desplazamiento de fase interno β , además del desplazamiento de fase externo δ .

Las Fig. 8 y Fig. 9 muestran que la tensión de AC en el lado de alto voltaje del convertidor ($V\alpha$) se convierte en una onda de tres niveles, mientras que el lado de bajo voltaje se mantiene como una onda cuadrada de dos niveles ($V\beta$) como se muestra en V_{AC1} y V_{AC2} . El valor de la corriente RMS en modo reductor ($iT_1 = iT_2 = 53.31 A_{RMS}$) muestra una reducción de un 6.8% y en modo elevador ($iT_1 = iT_2 = 51.6 A_{RMS}$) una reducción de 5.3% respecto a la modulación SPS.

Con la integración de β en los puentes en el lado de bajo voltaje, se añade un grado más de control que permite reducir las corrientes no deseadas producidas por las fluctuaciones de voltaje, además de expandir el área de operación de la zona de conmutación a voltaje cero.

3. Dual Phase Shift

Cuando el rango de voltaje a ambos lados del convertidor aumenta, también aumenta la corriente circulante y somete a más estrés a los componentes, lo que produce pérdidas de conmutación y reduciendo eficiencia.

Similar al método de control EPS, el control DPS permite la reducción de corriente circulante y mejorar la eficiencia del convertidor sin necesidad de aumentar la frecuencia de conmutación de los interruptores. También implica la integración de dos grados de control, donde además del desplazamiento de fase externo, δ , Se añade un desplazamiento de fase interno, α y β , de igual valor para los puentes de bajo y alto voltaje. Esto produce un voltaje de AC a ambos lados del convertidor con una forma de onda de tres niveles ($V\alpha$ y $V\beta$), esto se observa en las Fig. 10 y Fig. 11, a diferencia del método EPS donde solo se presentaba una forma de onda de dos niveles en el lado de bajo voltaje del convertidor [12]. El valor de la corriente RMS en modo reductor ($iT_1 = iT_2 = 53.71 A_{RMS}$) muestra una reducción de un 8.28% y en modo elevador ($iT_1 = iT_2 = 29.26 A_{RMS}$) una reducción de 45.93% respecto a la modulación SPS.

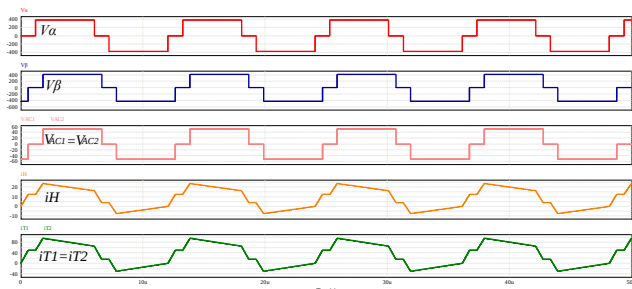


Fig. 10. Resultados de simulación para el método DPS en modo reductor.

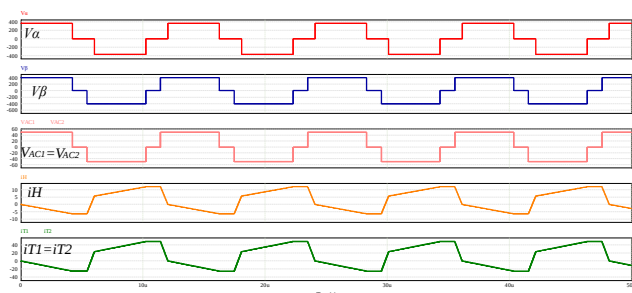


Fig. 11. Resultados de simulación para el método DPS en modo elevador.

4. Triple-Phase-Shift

Para lograr la máxima optimización del convertidor, se puede integrar el método de control TPS. Similar al método DPS, en esta modulación los pares interconectados de interruptores de ambos lados del convertidor son conmutados con un desplazamiento de fase interno.

Este método también implica un desplazamiento de fase externo δ , sin embargo y a diferencia del método DPS, para esta forma de control α y β deben tener valores distintos. Por ello, el control TPS ofrece tres grados de control.

Una elección óptima de los parámetros de esta modulación permite conseguir las pérdidas mínimas por conducción y corriente circulante, sin embargo, el análisis necesario para su implementación es el más complicado entre todas las técnicas de control anteriormente descritas.

Las Fig. 12 y Fig. 13 muestran las formas de onda del convertidor. El valor de la corriente RMS en modo reductor ($iT_1 = iT_2 = 31.91 A_{RMS}$) muestra una reducción de un 43.84% y en modo elevador ($iT_1 = iT_2 = 25.26 A_{RMS}$) una reducción de 53.16% respecto a la modulación SPS.

La modulación SPS requiere solo de un grado de control, las modulaciones EPS y DPS requieren dos grados de control y la modulación TPS requiere de tres grados de control, haciéndolo el más complejo de implementar, lo que provoca que no sea elegido en muchas aplicaciones pese a su capacidad lograr la máxima optimización del convertidor.

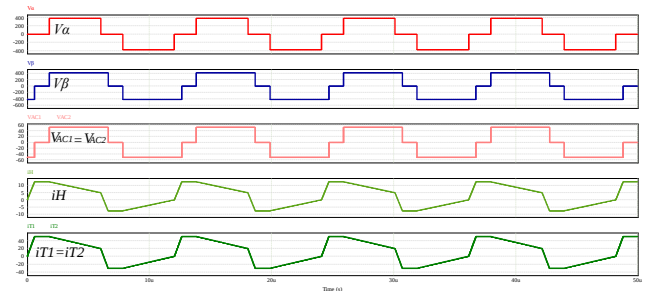


Fig. 12. Resultados de simulación para el método TPS en modo reductor.

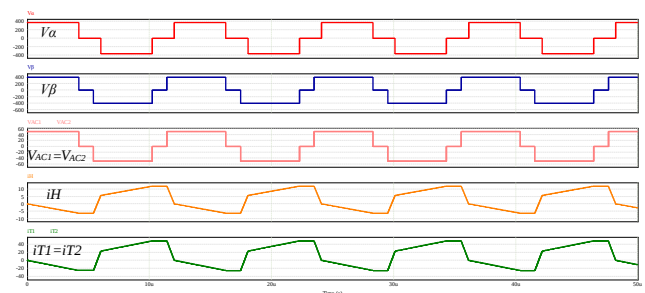


Fig. 13. Resultados de simulación para el método TPS en modo elevador.

El control SPS es el más sencillo de integrar, pero posee limitaciones en su eficiencia, rangos de voltaje y capacidad de operación en el área de conmutación a voltaje cero.

A partir de esta, surgen el resto de estrategias de modulación. La modulación EPS presenta mejora en estas áreas, sigue obteniendo baja eficiencia en rangos altos de tensión. El método de control DPS es óptimo para su integración en la mayoría de los casos gracias a su relación de grado de dificultad de implementación y eficiencia [2].

IV. COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS

El convertidor convencional DAB posee características únicas que lo posicionan como una opción eficiente y flexible

para muchas aplicaciones cuando se busca la selección de un convertidor DC-DC, su configuración simétrica, bidireccionalidad y conmutación a voltaje cero lo convierten en una estructura ideal para el campo de conversión de energías renovables, carga de vehículos y transformadores inteligentes, entre otros. Sin embargo, el convertidor sufre de una alta corriente RMS que reduce su eficiencia general, un problema que se vuelve más severo para aplicaciones donde se requiere de niveles altos de potencia [4].

La [Tabla III](#) muestra la comparación entre la configuración convencional DAB y el convertidor DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje.

Para este último, el diseño con dos transformadores y dos puentes completos en el lado de bajo voltaje permite reducir el estrés por paso de corriente en los interruptores, lo que a su vez reduce las pérdidas totales en el proceso de conversión del convertidor. Estas características abren la posibilidad de crear diseños del convertidor que necesiten menor disipación de calor y usen mayor frecuencia de conmutación [3].

TABLA III. PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR EN MODO REDUCTOR

Estructura	Parámetro	
	Convertidor convencional DAB	Convertidor DAB paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje
Corriente operativa	Estándar	Mejorada
Costo	Estándar	Aumentado
Densidad de potencia	Estándar	Mejorada
Eficiencia	Estándar	Mejorada

La [Fig. 14](#) muestra las formas de onda resultantes de la operación del convertidor convencional DAB en modo reductor utilizando la modulación TPS usando los parámetros de la [Tabla IV](#), por otro lado, la [Fig. 15](#) muestra las formas de onda del convertidor bajo voltaje paralelo-serie alto voltaje bajo las mismas condiciones operativas, usando los parámetros de la [Tabla II](#).

TABLA IV. PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR CONVENCIONAL DAB EN MODO REDUCTOR

Parámetro	Valor
Voltaje nominal en el puerto de alto voltaje, V_1	380 V
Voltaje nominal en el puerto de bajo voltaje, V_2	48 V
Relación de transformación del transformador (T), $n1/n2$	4:1
Inductor de potencia, L	28 μ H

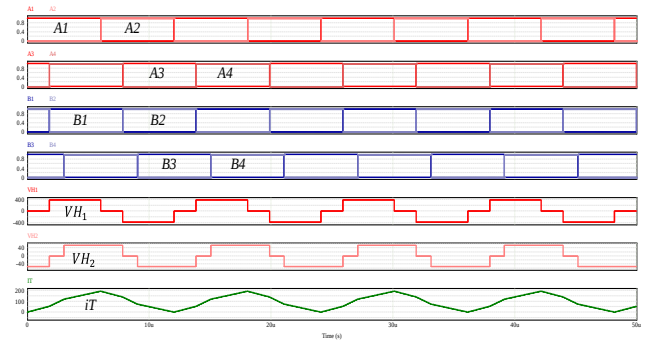


Fig. 14. Formas de onda resultantes del convertidor convencional DAB con la modulación TPS en modo reductor.

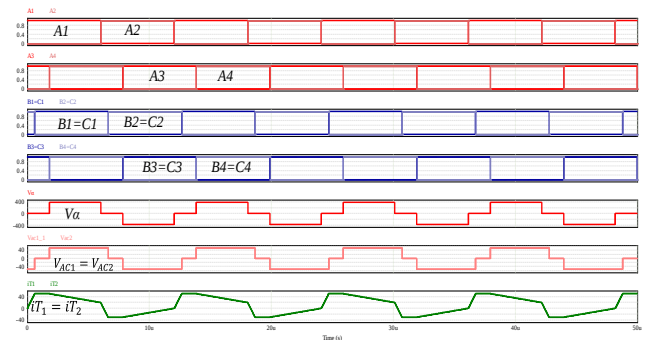


Fig. 15. Formas de onda resultantes del convertidor DAB bajo voltaje paralelo-serie alto voltaje con modulación TPS en modo reductor.

Comparando los resultados mostrados en la [Fig. 14](#) y [Fig. 15](#), el convertidor convencional DAB presenta una forma de onda de voltaje (V_{H1}, V_{H2}) de tres niveles en los puentes de alto y bajo voltaje, mismas que también se producen en la configuración bajo voltaje paralelo-serie alto voltaje mostradas en V_{AC1} , V_{AC2} y V_α . Sin embargo, la configuración convencional presenta un aumento del 350.44% en la corriente RMS ($i_T = 111.82 A_{RMS}$) respecto a la configuración paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje ($i_{T1} = i_{T2} = 31.91 A_{RMS}$), aun cuando le es aplicada la modulación TPS, la cual permite la máxima reducción de corriente RMS.

V. CONCLUSIONES

La investigación presentada en este trabajo ha explorado la arquitectura y distintas técnicas de modulación del convertidor paralelo bajo voltaje-serie alto voltaje basado en el DAB, a pesar de ser más costoso y complejo de controlar que la configuración convencional, permite una mejora significativa en la gestión del flujo de potencia y reducción de corriente mostrada en la [Tabla V](#).

Se evaluaron diferentes técnicas de desplazamiento de fase, siendo el SPS el más básico y comúnmente utilizado debido a su simplicidad de implementación. Sin embargo, esta estrategia tiene limitaciones en su capacidad de manejar variaciones en el voltaje de entrada y salida, lo que afecta la eficiencia del convertidor en rangos de operación más amplios.

TABLA V. Comparación de reducción de corriente RMS por modulación.

Modulación	Porcentaje de Reducción de corriente RMS respecto a SPS	
	Modo elevador	Modo Reductor
EPS	5.3%	6.8%
DPS	45.93%	8.28%
TPS	53.16%	43.84%

Las modulaciones DPS y TPS demostraron ser alternativas más eficientes, particularmente en la reducción de las corrientes circulantes, lo que optimiza la operación del convertidor bajo condiciones de alta carga.

Finalmente, el TPS se presentó como la técnica más avanzada, ofreciendo la mayor optimización en términos de pérdidas y eficiencia, aunque su complejidad hace que su implementación sea menos común.

La elección la técnica de modulación y la topología del convertidor DAB debe ser cuidadosamente seleccionada en función de los requisitos específicos de la aplicación. Mientras que las soluciones más simples como el control SPS pueden ser adecuadas para sistemas con condiciones de operación estables, aplicaciones con variaciones de tensión o necesidades de mayor eficiencia se beneficiarán de técnicas de control más avanzadas como el EPS o el DPS.

En última instancia, el TPS ofrece el máximo rendimiento, pero su complejidad lo limita a casos donde la optimización total del sistema justifique su uso.

REFERENCIAS

- [1] F. D. Esteban, F. M. Serra and C. H. De Angelo, "Control of a DC-DC Dual Active Bridge Converter in DC Microgrids Applications," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 8, pp. 1261-1269, Aug. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9475856.
- [2] B. Zhao, Q. Song, W. Liu and Y. Sun, "Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4091-4106, Aug. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
- [3] Serban, C. Pondiche and M. Ordonez, "Analysis and Design of Bidirectional Parallel-Series DAB-Based Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 10370-10382, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3272336
- [4] J. Huang, C. Wang, Z. Zhang, Z. Ouyang, G. Zsurzsan and M. A. E. Andersen, "Analysis of Partial Parallel Dual Active Bridge Converter with Additional Phase Shift Control," 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022, pp. 1044-1045, doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9806904.
- [5] Ilker Kayaalp, Tugce Demirdelen, Tahsin Koroglu, M. Ugras Cuma, K. Cagatay Bayindir, and Mehmet Tumay, "Comparison of Different Phase-Shift Control Methods at Isolated Bidirectional DC-DC Converter", *J. Appl. Methods Electron. Comput.*, vol. 4, no. 3, pp. 68-73, Aug. 2016.
- [6] D. Segaran, D. G. Holmes and B. P. McGrath, "Comparative analysis of single and three-phase dual active bridge bidirectional DC-DC converters," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 1-6.

- [7] D. Das, N. Weise, K. Basu, R. Baranwal and N. Mohan, "A Bidirectional Soft-Switched DAB-Based Single-Stage Three-Phase AC-DC Converter for V2G Application," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 186-199, March 2019, doi: 10.1109/TTE.2018.2886455.
- [8] C. T. Yeraldy Marion., "Modelación y control de convertidor Dual Active Bridge para aplicaciones de transición energética," Tesis de licenciatura, Dept. Ing. Elec., Univ. Tecnica Federico Santa Maria., Valparaíso, Chile, 2021.
- [9] M. Lucas Pablo, "Diseño y simulación de un DAB (Puente dual activo)," Tesis de licenciatura, Dept. Ing. Elec., Univ. Nacional de Mar del Plata., Buenos Aires, Argentina, 2023.
- [10] J. Huang, C. Wang, Z. Zhang, Z. Ouyang, G. Zsurzsan and M. A. E. Andersen, "Analysis of Partial Parallel Dual Active Bridge Converter with Additional Phase Shift Control," 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022, pp. 1044-1045, doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9806904.
- [11] E. Serban, C. Pondiche, J. Wassmuth and M. Ordonez, "Bidirectional Parallel Low-Voltage Series High-Voltage DAB-based Converter Analysis and Design," 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Houston, TX, USA, 2022, pp. 107-114, doi: 10.1109/APEC43599.2022.9773669.
- [12] D. Sha, "Research Literature of DAB converters," in *High-Frequency Isolated Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converters with Wide Voltage Gain*. Primera edicion. Gateway East, Singapore: Spring, 2019, ch. 1, pp. 12-19.

BIOGRAFÍAS



LUIS ALEJANDRO AVILA ALVAREZ Ingeniero eléctrico egresado de la licenciatura en ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia (IT Morelia), con especialización en energías renovables. Actualmente estudiante de la maestría en ciencias de la ingeniería eléctrica en el Programa de graduados e investigación en ingeniería eléctrica (PGIIE).



LUIS EDUARDO UGALDE CABALLERO Ingeniero en electrónica y maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Doctorado en ingeniería eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, profesor investigador en el PGIIE del IT Morelia, Sus campos de interés incluyen enlaces de HVDC, transformadores electrónicos y convertidores electrónicos para integración de energías renovables.



Ejemplo base de dimensionamiento de un sistema de bombeo solar aislado para riego agrícola

ELMER G. ROBLES LECONA, ENRIQUE A. ZAMORA CÁRDENAS, VÍCTOR J. GUTIÉRREZ MARTÍNEZ.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

eg.robleslecona@ugto.mx

e.zamora@ugto.mx

vj.gutierrez@ugto.mx

RESUMEN La gestión del agua en México es un desafío crucial para la agricultura, especialmente en áreas con escasez hídrica. Los sistemas fotovoltaicos (SFV) aislados presentan una solución innovadora para el riego en zonas remotas. En el presente trabajo se presenta una breve descripción de estos sistemas mencionando sus principales beneficios económicos y ambientales, así como los desafíos a los que se enfrenta su desarrollo. Posteriormente, se presenta el diseño de un sistema de bombeo aislado localizado en Salamanca, Gto., que se pretende sirva como ejemplo base de dimensionamiento, de tal forma que pueda ser usado como referencia cuando se esté analizando la posibilidad de instalar este tipo de sistemas. Ambos objetivos pretenden difundir las ventajas de este tipo de tecnología para lograr un mayor entendimiento por parte de participantes clave en el sector agrícola. El diseño considera que se ha realizado previamente la evaluación de la demanda hídrica de los cultivos y las condiciones climáticas del área, asegurando la eficiencia y sostenibilidad del sistema. También se consideran aspectos técnicos como la profundidad del pozo de agua, el caudal demandado, la altura de elevación requerida para el riego efectivo y las pérdidas asociadas a la tubería y accesorios.

PALABRAS CLAVE — Sistema solar fotovoltaico, bombeo agrícola, recursos hidráulicos.

I. INTRODUCCIÓN

México enfrenta desafíos significativos en la gestión del agua para la agricultura, utilizando aproximadamente el 76% de su agua extraída para riego agrícola, lo que refleja una alta dependencia de este recurso. La creciente demanda agrícola en regiones áridas y semiáridas, como el Desierto de Sonora y el Altiplano Mexicano, agrava la presión sobre los recursos hídricos limitados [1]. En particular, en el estado de Guanajuato esta situación es crítica, donde el uso de agua para riego agrícola es considerable, con un consumo que varía entre 7,000 y 12,000 m³/ha/año [2]. El estado utiliza al año alrededor de 4,000 Mm³ de agua para riego, lo que resalta la importancia del bombeo agrícola para mantener la producción en una región con escasez de agua superficial [3]. Como resultado, esta práctica ha llevado a la sobreexplotación de acuíferos, como el Valle de León y el Acuífero del Bajío, provocando la disminución de los niveles freáticos y afectando la calidad del agua. Esta sobreexplotación puede tener consecuencias a largo plazo, como el aumento de los costos de bombeo y la degradación ambiental.

A medida que la presión sobre los recursos hídricos continúa creciendo, se están promoviendo prácticas más sostenibles en el estado, como la adopción de tecnologías de riego más eficientes y técnicas de conservación de agua para mitigar los problemas asociados con el bombeo agrícola y

asegurar un uso más equilibrado de los recursos hídricos. En ese sentido el bombeo solar agrícola ha emergido como una solución innovadora y sostenible en la gestión del agua para la agricultura, especialmente en regiones como Guanajuato, donde la disponibilidad de agua es un desafío significativo. Esta tecnología, que utiliza módulos solares fotovoltaicos (SFV) para alimentar bombas de agua, ofrece varias ventajas cruciales, por ejemplo, al utilizar la energía solar, los agricultores pueden reducir su dependencia de fuentes de energía convencionales, disminuyendo así los costos operativos y mitigando problemas asociados con el suministro de energía eléctrica. Además, el bombeo solar es una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, ya que reduce la huella de carbono del proceso de bombeo y ayuda a conservar los recursos hídricos al promover un uso más eficiente del agua. En un estado como Guanajuato, donde la sobreexplotación de acuíferos es un problema, adoptar tecnologías que minimicen el impacto ambiental es crucial para asegurar la sostenibilidad a largo plazo [4].

Por otra parte, los sistemas de bombeo solar aislado para uso agrícola en el estado de Guanajuato están ganando terreno como una solución para la gestión eficiente del agua, particularmente en las zonas rurales donde la infraestructura de la red eléctrica es limitada o inexistente. Estos sistemas aislados, que no requieren interconexión con la red eléctrica convencional, utilizan energía solar fotovoltaica para alimentar bombas de agua, permitiendo el riego de cultivos

Congreso Internacional de Energía de la UG, 06 – 08 de noviembre de 2024

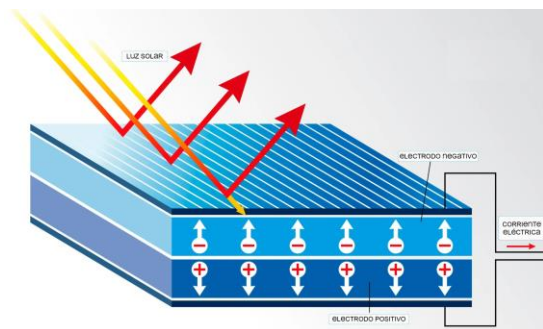


Fig. 1. Funcionamiento básico del módulo SFV

sin depender de combustibles fósiles ni de la disponibilidad de electricidad. Estos sistemas permiten a los agricultores acceder al agua subterránea sin recurrir a motores diésel o conexiones eléctricas costosas. Además, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas del estado producen una alta irradiación solar durante todo el año, favoreciendo el uso de esta tecnología.

Sin embargo, el desconocimiento de la tecnología solar por parte de los agricultores, y en particular de los sistemas aislados, puede llevar a que enfrenten costos energéticos significativamente más altos, principalmente por su dependencia en combustibles fósiles. Además, el no contar con información suficiente acerca del potencial de ahorro y retorno de inversión, los agricultores pueden subestimar el potencial de estos sistemas, que, aunque requieren una inversión inicial elevada, presentan ahorros significativos y beneficios económicos a largo plazo [3], [4]. Por tal motivo, en el presente trabajo se presenta una breve descripción de estos sistemas mencionando sus principales beneficios económicos y ambientales, así como los desafíos a los que se enfrenta su desarrollo. Posteriormente, se presenta el diseño de un sistema de bombeo aislado que se pretende sirva como ejemplo base de dimensionamiento, de tal forma que pueda ser usado como referencia cuando se esté analizando la posibilidad de instalar este tipo de sistemas. Ambos objetivos pretenden difundir las ventajas de este tipo de tecnología para lograr un mayor entendimiento por parte de participantes clave en el sector agrícola.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta el principio básico de funcionamiento de los sistemas SFV aislados utilizados para riego agrícola, mencionando también sus beneficios económicos y ambientales, así como los principales desafíos para la implementación de estos sistemas. La Sección III presenta los conceptos básicos y el diseño de un sistema SFV aislado para riego agrícola. Finalmente, en la Sección IV se desarrollan las conclusiones emanadas del presente trabajo.

II. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EN EL CONTEXTO AGRÍCOLA

A. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los SFV aislados generan electricidad a partir de la luz solar mediante módulos SFV. Como se mencionó anteriormente, el término autonomía significa que no se encuentran interconectados a la red eléctrica para operar bombas de agua, siendo ideales para áreas remotas particularmente donde no se cuenta con infraestructura de suministro eléctrico. Sus componentes típicos incluyen módulos SFV, controladores de carga y baterías (en algunos casos), inversores o variadores y equipo de bombeo, donde este último puede ser en corriente directa o alterna. El esquema básico de funcionamiento de los módulos SFV se presenta en la Fig. 1, donde se puede apreciar cómo el efecto fotoeléctrico produce el almacenamiento de cargas positivas y negativas en dos placas semiconductoras denominadas electrodos; al cerrar el circuito entre las placas se produce la circulación de la corriente eléctrica en CD [5]. Cabe señalar que con la madurez que ha logrado la tecnología de los módulos SFV se han alcanzado hasta un 22% de eficiencia en la conversión de energía y una vida útil de hasta 25 años en la mayoría de los módulos fotovoltaicos comerciales. Para el caso cuando se incluyen baterías en el sistema, se hace uso de un dispositivo controlador de carga, cuya función es regular la cantidad de energía que es almacenada/extraída en las baterías permitiendo la disponibilidad de energía eléctrica cuando hay poca o nula irradiación solar.

Cuando no se incluye almacenamiento en el sistema, típicamente se hace uso de un variador solar de frecuencia (VSF). Este dispositivo, además de transformar la energía de CD en CA (ya sea monofásica o trifásica), realiza un arranque suave del motor que acciona la bomba hidráulica reduciendo así la corriente de arranque. También resulta útil para variar la velocidad del motor, permitiendo controlar el flujo de agua. Finalmente, el equipo de bombeo es el que realiza el trabajo para transportar el agua y pueden ser en CD o en CA. Es importante mencionar que el equipo de bombeo que ha tenido mayor incidencia en este tipo de sistemas es el que se alimenta de CA. Aunque existen bombas que operan en CD, no han logrado la eficiencia y desempeño de su contraparte. Por lo tanto, en el presente trabajo se considerará únicamente el caso de sistemas de bombeo solar que utilizan bombas en CA.

B. BENEFICIOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Los sistemas de bombeo solar aislados ofrecen importantes beneficios económicos y ambientales. Desde el punto de vista económico, estos sistemas permiten reducir significativamente los costos operativos al no depender de combustibles fósiles o de redes eléctricas. Al usar la energía solar, se eliminan gastos recurrentes como el de electricidad o el mantenimiento de generadores diésel. En algunos casos, el ahorro operativo puede alcanzar hasta el 70%, dependiendo del tamaño y la ubicación del sistema, lo que genera un retorno de inversión favorable a mediano y largo plazo [6]. Por otra parte, dado que este tipo de sistemas son modulares, pueden ampliarse según necesidades futuras. La capacidad de



operar en áreas remotas elimina la necesidad de extender costosas redes eléctricas, lo que comparativamente reduce los costos iniciales de instalación.

En términos ambientales, los sistemas de bombeo solar reducen las emisiones de gases de efecto invernadero al no utilizar combustibles fósiles, contribuyendo así a mitigar el cambio climático. Al ser una fuente de energía limpia y renovable, promueven un desarrollo sostenible en regiones rurales o remotas; favorecen también la conservación del agua al poder gestionar de manera eficiente este recurso, mejorando la sostenibilidad de las prácticas agrícolas en áreas de difícil acceso. Como consecuencia, la implementación de estos sistemas ayuda a cumplir con los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones. Particularmente en áreas donde la biodiversidad es sensible, estos sistemas pueden integrarse sin causar un impacto ambiental negativo, favoreciendo la preservación del ecosistema local.

C. DESAFÍOS DE SU IMPLEMENTACIÓN

1. Inversión inicial y variabilidad en la producción

A pesar de sus ventajas, la implementación de sistemas SFV aislados presenta desafíos relevantes. El principal obstáculo es la inversión inicial, que puede ser considerable; se estima que el costo inicial de estos sistemas oscila entre \$300,000 y \$500,000 pesos mexicanos por hectárea [7]. No obstante, esta inversión se amortiza con el tiempo debido a la reducción en los costos operativos y de mantenimiento. Por otra parte, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) ha implementado programas de subsidios y financiamiento que pueden facilitar la adopción de estas tecnologías [8]. Otro desafío es la variabilidad en la producción de energía solar, que depende de factores climáticos y estacionales.

2. Explotación de los recursos hídricos no regulada

En el caso particular del estado de Guanajuato, la proliferación de pozos clandestinos representa un problema significativo para la gestión del agua. Según la Comisión Nacional del Agua, se estima que en Guanajuato operan aproximadamente 1,200 pozos no autorizados, particularmente en las regiones del Bajío y el noreste del estado [9]. Estos pozos, que funcionan sin permisos y sin un control adecuado, contribuyen a la sobreexplotación de los acuíferos locales. Se ha mostrado en [3] que los niveles freáticos en el estado han descendido hasta dos metros por año en las zonas más afectadas. Esta sobreexplotación no solo disminuye la disponibilidad de agua para otros usos, sino que también deteriora la calidad de los recursos hídricos, afectando la agricultura y los ecosistemas acuáticos locales.

La introducción de sistemas SFV aislados podría tener un impacto mixto en el problema de los pozos clandestinos. Por un lado, la capacidad de operar bombas de agua sin conexión

a la red eléctrica podría incentivar la expansión de pozos no regulados, especialmente en áreas donde la supervisión es limitada. El bajo costo operativo de los sistemas SFV podría hacer más accesible el uso de pozos clandestinos, exacerbando la sobreexplotación de los acuíferos. Por otro lado, si se implementan de manera regulada y supervisada, estos sistemas podrían ofrecer una alternativa sostenible a los sistemas de riego que utilizan combustibles fósiles, reduciendo la presión sobre los recursos hídricos. Por ejemplo, en [10] se muestra como se ha logrado la reducción del uso de agua en la producción agrícola en el Bajío, incluyendo Guanajuato, con la implementación de sistemas de riego tecnificados, que puede reducir el consumo de agua en un 40% respecto a métodos tradicionales.

Para mitigar los riesgos asociados, es esencial fortalecer la regulación y supervisión de la extracción de agua, particularmente en estados como Guanajuato, donde la proliferación de pozos clandestinos es un riesgo significativo. Por otra parte, es recomendable implementar y fomentar políticas de subsidios y financiamiento que faciliten la adopción de tecnologías sostenibles. La colaboración entre instituciones gubernamentales, organizaciones, grupos de investigación y el sector privado es clave para promover la expansión responsable de los sistemas SFV en el sector.

III. DISEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO AGRÍCOLA

En esta Sección se presenta el diseño de un sistema de bombeo solar aislado. Se pretende que este ejemplo sirva como una referencia que pueda ser usada y modificada cuando se esté analizando la posibilidad de instalar este tipo de sistemas. Se debe tener en cuenta que un requisito para el diseño de un sistema SFV para bombeo agrícola alimentado por un pozo subterráneo es poseer conocimientos básicos en hidráulica, electricidad y en sistemas SFV autónomos e interconectados. Por otra parte, para asegurar el suministro suficiente de agua al cultivo se deben realizar estudios previos donde se determine el aforo del pozo, que es uno de los datos más importantes, ya que hace referencia a la disponibilidad del agua. Los estudios se realizan en periodos de tiempo que van de las 14, 48 o 72 horas, donde se realizan mediciones que son un indicativo de hasta donde se puede extraer agua sin abatir el pozo. Se menciona que por ley deben de ser mínimo 48 horas y si es un pozo nuevo deben ser mínimo 72 horas [11].

Las cantidades básicas por considerar para el dimensionamiento del sistema son el caudal (Q), que es la cantidad de agua que una bomba impulsa por las tuberías en un cierto periodo de tiempo y está dado en lps (litros por segundo), m^3/h (metros cúbicos por hora), GPM (galones por minuto) o lpm (litros por minuto); Carga o altura (H) hasta la cual la bomba es capaz de elevar el agua, está dada en m , mca (metros columna agua), kg/cm^2 , psi o bar ; y potencia eléctrica dada en W , kW o HP . La relación básica se define por la [Ec.](#)

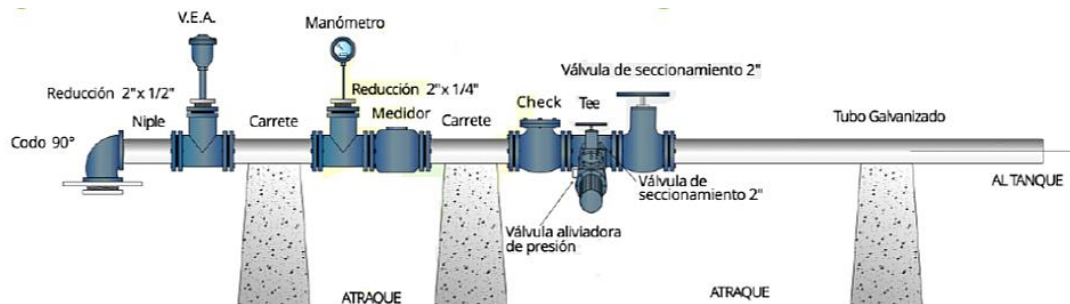


Fig. 2. Componentes esenciales de un tren de descarga de un sistema de bombeo [12]

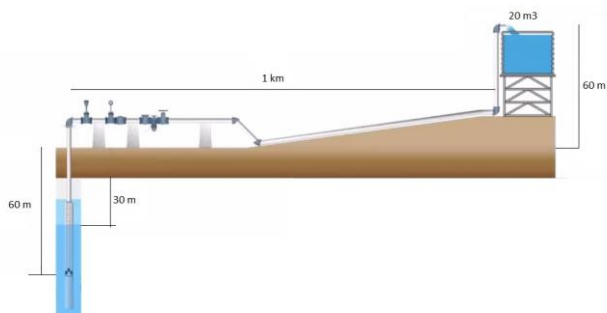


Fig. 3. Sistema de bombeo a diseñar [12]

(1), donde c es una constante que depende de la eficiencia de la bomba, la gravedad y el tipo de líquido [13].

$$P = Q \times H \times c. \quad (1)$$

Es importante también considerar las diferentes pérdidas que ocurren durante el proceso tales como las pérdidas por fricción, ya que la fricción entre el líquido y las superficies en contacto con él produce pérdida de energía y presión en todo el sistema: en la propia tubería, en los codos, en las válvulas, etc. Las pérdidas por fricción dependen de varios factores como son el caudal del sistema, la velocidad y viscosidad del líquido, la longitud y superficie de las tuberías. Sin embargo, los fabricantes de tuberías simplifican la determinación de las pérdidas proporcionando sitios web donde pueden ser calculadas [14]. Las pérdidas por accesorios como codos, tees y válvulas son proporcionadas también por los fabricantes, *e.g.*, [15]. Por lo tanto, para calcular las pérdidas por fricción totales se utiliza la ecuación (2) [13].

$$h_f = (\text{Longitud total} + \text{Accesorios}) \frac{\text{factor}}{100} \quad (2)$$

Otros datos importantes por considerar para el diseño son: profundidad del pozo, niveles estático y dinámico, desnivel topográfico a vencer, longitud de la línea de conducción, y tipo de uso (almacenamiento o riego directo). En el caso de que sea riego por aspersión se debe conocer el modelo del aspersor, presión de operación y gasto del aspersor, datos que son proporcionados por tablas del fabricante. En la Fig. 2 se muestran los accesorios básicos indispensables que incluye un tren de descarga en un sistema de bombeo para riego

agrícola, de tal forma que, de acuerdo con la información anteriormente mencionada, se procede a calcular las pérdidas por fricción incluyendo los accesorios correspondientes [12].

Posteriormente, se procede a calcular la carga dinámica total (CDT) de la siguiente manera [13]:

$$CDT = \text{Nivel dinámico} + \text{Desnivel topográfico} + \text{Presión de trabajo} + h_f, \quad (3)$$

donde la presión de trabajo se refiere a la pérdida de altura correspondiente cuando se utilizan aspersores. Una vez conocido este dato se realiza la selección de la bomba de acuerdo con las curvas proporcionadas por los fabricantes y se corroboran los datos de corriente del motor asociado, que servirá para dimensionar el sistema SFV incluyendo el VSF.

A. EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR LOCALIZADO EN SALAMANCA GUANAJUATO

Para fines ilustrativos, se considerará que se han realizado los estudios previos mencionados anteriormente, de tal forma que se asegura el suministro sin abatir el pozo en cuestión. El ejemplo consiste en diseñar un sistema de bombeo agrícola que demanda 20 m^3 de agua al día con las características que se muestran en la Fig. 3 [12].

1. Demanda diaria y pérdidas por fricción.

Como primer paso se procede a calcular las horas solares pico (h_{sp}) promedio al año en la ciudad de Salamanca Gto. con el uso de la herramienta [16] denominada NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) | Data Access Viewer (DAV), resultando en 5.9 hsp . Posteriormente se realiza una visualización de la proyección solar en las coordenadas seleccionadas con la herramienta

desarrollada en [17], tal como se muestra en la Fig. 4. Se puede apreciar que inclusive durante el solsticio de invierno (arco de círculo rojo en la figura) se tiene buena irradiación solar llegando a las 4.58 hsp. Es importante aclarar que aún y cuando en esta herramienta se muestren edificaciones, estas solo son consideradas para análisis de sombras en proyectos residenciales, comerciales o industriales. Por lo tanto, calculando la demanda de agua por hora se tiene

$$20\text{m}^3/5.9 = 3.38\text{m}^3/\text{h},$$

por lo que se propone una tubería de acero galvanizado de 1 1/2" cuyo porcentaje de pérdidas por fricción es de 2.375 % de acuerdo con las tablas correspondientes incluidas en [18].

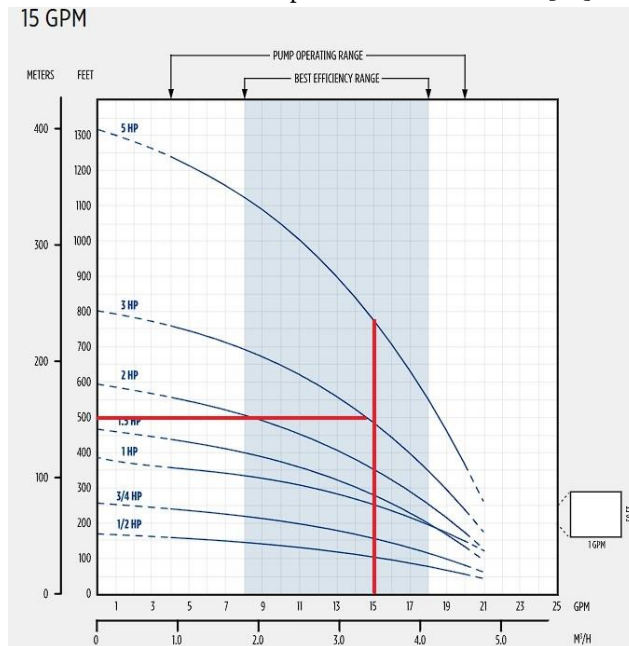


Fig. 5. Curva de desempeño de una bomba de 15 GPM [19]



Three-Phase Motors

APPLICATION

Table 22 Three-Phase Motor Specifications (60 Hz) 3450 rpm

TYPE	MOTOR MODEL PREFIX	RATING					FULL LOAD		MAXIMUM LOAD		LINE TO LINE RESISTANCE OHMS
		HP	KW	VOLTS	HZ	S.F.	AMPS	WATTS	AMPS	WATTS	
S	234307	5	3.7	200	60	1.15	18.3	4800	20.5	5500	.68-.83
	234317			230	60	1.15	15.9	4800	17.8	5500	.91-1.1
	234347			380	60	1.15	9.6	4800	10.8	5500	2.6-3.2
	234327			460	60	1.15	8.0	4800	8.9	5500	3.6-4.4
	234337			575	60	1.15	6.4	4800	7.1	5500	5.6-6.9

Fig. 6. Especificaciones de motores trifásicos a 60 Hz y 3450 rpm [19]

De la misma manera se determinan las pérdidas en *mca* por los accesorios básicos incluidos que se muestran en la Fig. 2 y la longitud total de arrastre, como se presenta en la Tabla I. Aplicando el factor de pérdidas de la tubería a la longitud total se obtiene la CDT.

$$CDT = 60 + 60 + 0 + 2.375(1,182.7) = 148.08\text{mca}$$

TABLA I. PÉRDIDAS POR ACCESORIOS Y LONGITUD TOTAL DE ARRASTRE.

Pieza	mca equivalentes	Núm. de piezas	Total (m.c.a.)
Codo 90°	2.7	3	8.1
Codo 45°	1.3	2	2.6
Tee	5.8	3	17.4
Medidor de gasto	27	1	27
Válvula check	7	1	7
Válvula compuerta	0.6	1	0.6
Longitud total de arrastre		1	1,120
Total			1,182.7

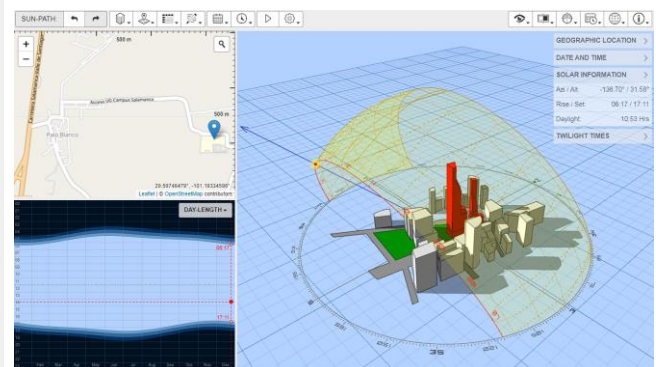


Fig. 4. Proyección de sombras en el sitio considerado durante el solsticio de invierno.

Note que se ha mostrado el valor de cero en la suma anterior únicamente para resaltar que no se considera presión de trabajo por no tener aspersores.

2. Selección del equipo de bombeo

Es importante seleccionar el equipo tomando en cuenta

el mayor rango de eficiencia y considerando su flujo nominal.

Para el caso considerado se tiene una demanda de 3.38 m³/h que equivale a 14.88 GPM. Diferentes fabricantes ofrecen bombas que proporcionan 15 GPM, como se muestra en la Fig. 5. Se puede apreciar que para que este equipo proporcione aproximadamente los 15 GPM y una CDT de

Electrical and enclosure data

Voltage			3 x 208-240 V	3 x 380-440 V
Installation environment	Minimum ambient temperature	[°C (°F)]	-10 (14)	-10 (14)
	Maximum ambient temperature	[°C (°F)]	60 (140)	60 (140)
	Maximum relative humidity	[%]	100	100
Electrical data	Minimum MPP voltage	[VDC]	230	450
	Recommended MPP voltage	[VDC]	290-336	530-615
	Maximum input voltage	[VDC]	400	800
	Input voltage	[VAC]	208-240	380-480
	Rated output voltage	[VAC]	208-240	380-440
	Minimum frequency	[Hz]	5	5
	Maximum frequency	[Hz]	160	160
	Phases		3	3
	Enclosure class		IP66	IP54, IP66

Fig. 7. Especificaciones de motores trifásicos a 60 Hz y 3450 rpm [20].

ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{max} (Wp)*	485	490	495	500	505	510
Power Tolerance- P_{max} (W)	0 ~ +5					
Maximum Power Voltage- V_{mp} (V)	42.2	42.4	42.6	42.8	43.0	43.2
Maximum Power Current- I_{mp} (A)	11.49	11.56	11.63	11.69	11.75	11.81
Open Circuit Voltage- V_{oc} (V)	51.1	51.3	51.5	51.7	51.9	52.1
Short Circuit Current- I_{sc} (A)	12.07	12.14	12.21	12.28	12.35	12.42
Module Efficiency η_m (%)	20.1	20.3	20.5	20.7	21.0	21.2

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Measuring tolerance: ±3%.

Fig. 8. Tabla de especificaciones del módulo SFV Vertex 510W+ TSM-DE18M(II) [21].

150 *mca.* aproximadamente, la bomba de 3 *HP* queda prácticamente al límite de los requerimientos; es por lo que se decide seleccionar la inmediata superior de 5 *HP*. Sin embargo, es importante aclarar que la bomba seleccionada operaría nominalmente en el punto donde se intercepten la altura requerida y la curva de la bomba, que para el caso de la Fig. 5 serían aproximadamente 19 *GPM*, que es un caudal mayor al requerido y la bomba operaría fuera del área sombreada que representa la mayor eficiencia. Por lo tanto, será necesario reducir la velocidad de la bomba para que opere al caudal deseado; esto se logra realizando ajustes en el VSF, que es un dispositivo típico en este tipo de sistema.

Una vez seleccionada la bomba es necesario verificar la corriente del motor, dado que por ejemplo una bomba de 5 *HP* puede operar a 230 V con una corriente nominal de 15.9 A y de máxima carga de 17.8 A ó 460 V con una corriente nominal de 8 A y de máxima carga de 8.9 A, como se muestra en la Fig. 6. Es importante mencionar que, dado que se utilizan VSF, la corriente de arranque no es de interés, ya que se realiza un arranque “suave.” Para el presente ejemplo se selecciona un motor de 5 *HP* operando a 230 V.

3. Selección del VSF

El parámetro crítico por considerar en la selección del VSF es la corriente máxima de salida en CA. De la amplia gama de VSF existentes en el mercado, es recomendable realizar su selección de una potencia inmediata superior al motor de la bomba seleccionado, esto con la finalidad de considerar condiciones atípicas de operación. Para el presente ejemplo, si se considera un VSF de 7.5 *HP* con las

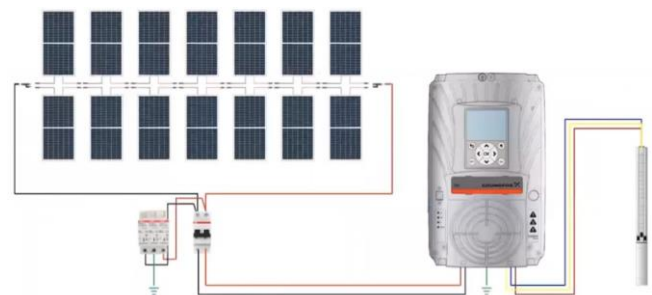


Fig. 9. Configuración mínima del sistema SFV para bombeo agrícola resultante.

características mostradas en la Fig. 7, se tiene que para un voltaje nominal de salida de 3×230 V la corriente máxima de salida es de 25 A, valor que es superior a la máxima corriente de carga del motor de la bomba que es de 17.8 A, con lo que se asegura su correcto funcionamiento.

4. Diseño del arreglo SFV

Hoy en día existen en el mercado una amplia gama de módulos SFV de potencias cada vez mayores que permiten un diseño que minimiza el área a ocupar resultante. Los parámetros por considerar para el diseño del arreglo SFV son el voltaje máximo de entrada de CD del VSF, el voltaje mínimo de entrada para trabajar la bomba a voltaje nominal, que para el VSF seleccionado son de 400 y 290 V, respectivamente (como se muestra en la Fig. 7), y la corriente máxima de carga del motor de la bomba que es de 17.8 A (valor mostrado en la Fig. 6). Si se selecciona un módulo SFV de 500 W, con un voltaje y corriente a máxima potencia de 42.8 V y 11.69 A como se muestra en la Fig. 8 se tiene:

$$\text{Núm.mód.en serie}(\min) = 290 / 42.8 = 6.7 \approx 7 \text{ mód.}$$

$$\text{Núm.mód.en serie}(\max) = 400 / 42.8 = 9.3 \approx 9 \text{ mód.}$$

Con la corriente máxima de carga del motor se tiene:

$$\text{Núm.mód.en paralelo} = 17.8 / 11.69 = 1.53 \approx 2$$

Por lo que la configuración mínima del sistema es como se muestra en la Fig. 9.



Cabe resaltar que se seleccionaron 14 módulos de 500 W, resultando en una potencia en CD de 7 kWp para accionar una bomba de 5 HP (3.730 kW AC), y aunque el valor de la potencia en CD pudiera parecer mucho mayor, en este diseño se han asegurado tanto el voltaje mínimo a MPPT, el voltaje máximo de entrada en CD y la corriente que demanda el motor. Por otra parte, se recomienda que en lado de CA no se excedan 50 m de distancia del VSF a la bomba para asegurar una caída de voltaje menor al 3%. En caso de que se exceda esta distancia se debe agregar un filtro senoidal. El valor del dispositivo de protección, de acuerdo con [22], es de

$$(12.28 \times 2) \times 1.56 = 38.31 \approx 40 \text{ A}$$

Finalmente, de la hoja de especificaciones del módulo seleccionado se tiene un área de $(2.09 \text{ m}) \times (1.134 \text{ m}) = 2.37 \text{ m}^2$ siendo un total de 33.2 m^2 de superficie ocupada por los 14 módulos. Este diseño final permitirá la evaluación de la viabilidad económica para la instalación del sistema de bombeo solar, ya que puede ser fácilmente modificado de acuerdo con las condiciones particulares.

IV. CONCLUSIONES

Con la finalidad de difundir la aplicación en el sector agrícola de los sistemas SFV aislados para riego, en el presente trabajo se han presentado sus principales ventajas y desafíos. Dentro de las principales ventajas resalta la no dependencia tanto de la red eléctrica como de generadores diésel, disminuyendo significativamente los costos operativos. Además, estos sistemas fomentan la tecnificación del sector, aprovechando de manera óptima los recursos hídricos, logrando también su sostenibilidad. Sin embargo, dicha no dependencia de la red eléctrica y bajos costos operativos, puede dar lugar a la sobreexplotación de los recursos de la región por medio de la proliferación de pozos clandestinos. Sin embargo, se debe realizar cooperación entre diferentes sectores para asegurar una explotación razonada que logre no abatir los pozos existentes y aproveche los recursos de nuevos pozos.

Con la misma finalidad se ha presentado además el dimensionamiento de un sistema de este tipo ubicado en Salamanca Gto. Por medio de relaciones fundamentales, la información solar del sitio y la proporcionada por los fabricantes de equipos, se han seleccionado sus elementos fundamentales como son: tubería, elementos del tren de descarga, bomba y su motor eléctrico asociado, VSF y sistema SFV. Este ejemplo puede servir como base para realizar el dimensionamiento de este tipo de sistemas, que de manera fácil y directa ayudará a tener una perspectiva general de los equipos y costos asociados, fomentando así la implementación de este tipo de tecnología.

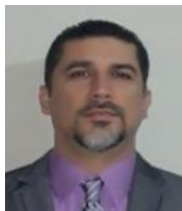
REFERENCIAS

- [1] Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, "New study highlights opportunities for Dutch water businesses in Mexico," Disponible en: <https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2021/08/12/new-study-highlights-opportunities-for-dutch-water-businesses-in-mexico-agricultural-sector>. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "AQUASTAT – FAO'S Global information system on water and agriculture." Disponible en: <https://www.fao.org/aquastat/en/databases/subnational-irrigation/>. Fecha de acceso: 28/08/2024.
- [3] J. Hernández-Ruiz, *et al.*, "Perspective of Water-Use Programs in Agriculture in Guanajuato." *Agriculture*, núm. 14, vol. 8, Jul. 2024.
- [4] B. S. Amézaga-Campos, *et al.*, "Hydrogeochemistry characterization of an overexploited municipal, agricultural, and industrial aquifer, central Mexico," *Applied Geochemistry*, vol. 142, Jul. 2022.
- [5] PanelPower-Energía Inteligente, "¿Cómo funcionan los paneles solares?" Disponible en: <https://www.panelpower.com.mx/como-funcionan-los-paneles-solares>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [6] A. O. M. Maka, and J. M. Alabid, "Solar energy technology and its roles in sustainable development," *Clean Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 476–483, Jun. 2022.
- [7] J. J. Bolaños, R. Perea, M. Rivera, "Propuesta de bombeo solar para un sistema de riego agrícola semi automatizado mediante un tanque elevado en el municipio de Tecamác, Estado de México," Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2019.
- [8] Gobierno de México, Programas de SADER y otras entidades operados por FIRA. Disponible en: <https://www.gob.mx/fira/acciones-y-programas/programas-de-sagarpa-y-otras-entidades-operados-por-fira>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [9] Comisión Nacional del Agua, "Estadísticas del agua en México." Disponible en: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html. Fecha de acceso: 12/08/2024.
- [10] F. Simon, F. García Álvaro, V. Nele, "Reduced Water Use in Barley and Maize Production Through Conservation Agriculture and Drip Irrigation," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, Dic. 2021.
- [11] Comisión Nacional del Agua, Especificaciones técnicas generales para la perforación de pozos para agua. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/767441/EspecificacionesTecnicasGeneralesParaLaPerforacionDePozosParaAgua2016.pdf>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [12] Cámara de Profesionales de la Energía Solar Fotovoltaica, "Guía de diseño de sistemas solares fotovoltaicos." Comunicación privada. 2023.
- [13] Grundfos, Irrigation pump handbook. Disponible en: <https://magazines.grundfos.com/Grundfos/SU/US/IrrigationPumpHandbookRev102012/?Page=56&page=56>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [14] Cálculos hidráulicos en línea, calculadoras de conversión de presión. Disponible en: <https://hydraulic-calculation.com/es/article.php?dmm=41.25&lm=100&ql=30&fluid=0.000001&material=0.1&ID=2&submit=Calcular>
- [15] Goulds Pumps, "Pérdida por fricción. Datos técnicos." Disponible en: <https://www.gouldspumps.com/es-CL/Home/>
- [16] NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). Data Access Viewer (DAV) v2.3.6. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [17] Sunpath3d. Disponible en: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath3d.html>. Fecha de acceso: 28/08/2024.
- [18] Franklin Electric, "Manual AIM. Sistemas sumergibles de 60 Hz. Aplicación, instalación, mantenimiento." Disponible en: <https://www.franklinwater.com/>. Fecha de acceso: 28/08/2024.
- [19] Franklin Electric, "FPS TRI-SEAL Submersible Well Pump." Disponible en: <https://www.franklinwater.com/products/submersible-well-pumps/residential-duty-submersible-well-pumps/tri-seal-4-inch-submersible-well-pumps/fps-tri-seal-submersible-well-pump/>
- [20] Grundfos RSL. Disponible en: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-5141278.pdf>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [21] Trinasolar, Vertex 510W+ TSM-DE18M(II). Disponible en: <https://pages.trinasolar.com/DE18M.html>. Fecha de acceso: 03/09/2024.
- [22] Diario oficial de la Federación, NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización). Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512096/NOM-001-SEDE-2012.pdf>. Fecha de acceso: 03/09/2024.

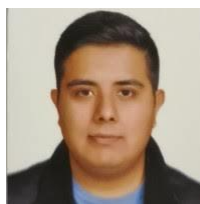


E. Robles *et al.*: Ejemplo base de dimensionamiento de un sistema de bombeo solar aislado para riego agrícola.

BIOGRAFÍAS



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.



ELMER G. ROBLES LECONA Actualmente se encuentra cursando el último semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato. Sus áreas de interés son la eficiencia energética, calidad de la energía y energías renovables.



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.