



**Donde la energía del sol y la tierra se unen para construir  
un futuro sostenible y en armonía con el ambiente.**



## Información Legal

Geovoltaica Revista de Energía y Sostenibilidad, Año 1, Número 2. Mayo-Agosto de 2025, es una publicación cuatrimestral, editada por el Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Mazatlán, Sinaloa, México. <https://www.revistageovoltaica.com>, E-mail: [editor@revistageovoltaica.com](mailto:editor@revistageovoltaica.com). Editores responsables: Dr. Eber Enrique Orozco Guillén, Dr. Guillermo Rubio Astorga y Dr. Erik Vázquez Fernández. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2025-053013375900-102, ISSN: 3061-8681. Ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Mazatlán, Sinaloa. Fecha de última Actualización 25 de Agosto de 2025. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación.



# **GEOVOLTAICA**

Revista de Energía y Sostenibilidad



[revistageovoltaica.com](http://revistageovoltaica.com)

# Editorial

## *Innovar, colaborar y transformar: Nuestro rol en la construcción de un futuro sostenible"*

Es un honor para el comité editorial de GEOVOLTAICA Revista de Energía y Sostenibilidad presentar el segundo número de nuestro primer volumen, una entrega que consolida nuestra trayectoria como un espacio de convergencia entre la ingeniería de vanguardia y el análisis estratégico. Con la publicación de estos trabajos, la revista reafirma su misión de difundir investigaciones científicas y desarrollos tecnológicos orientados a la sostenibilidad, el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales y la innovación aplicada en los sectores agrícola y energético. En este número, exploramos cómo la digitalización y el control preciso no son solo herramientas auxiliares, sino pilares fundamentales para enfrentar la escasez de recursos y la complejidad de los mercados energéticos contemporáneos.

El sector agrícola, vital para la seguridad alimentaria, encuentra en esta edición propuestas de alto impacto tecnológico. Presentamos una investigación centrada en el diseño de infraestructura para el monitoreo y control remoto de invernaderos mediante conectividad 3G, donde el uso de enrutadores industriales y el almacenamiento en la nube permiten una supervisión en tiempo real sin precedentes. Este avance se complementa perfectamente con el estudio sobre la implementación de sistemas de control PID y ON-OFF en entornos protegidos a escala laboratorio. Los resultados presentados son contundentes: la capacidad de reducir la temperatura máxima en al menos 10 °C y optimizar la humedad relativa demuestra que la automatización es la respuesta lógica ante climas cada vez más hostiles. La integración de interfaces gráficas y sistemas de alerta por SMS no solo previene daños en los cultivos, sino que democratiza la interpretación de datos complejos para el productor.

En el ámbito del procesamiento digital de señales, fundamental para la instrumentación de los sistemas energéticos modernos, incluimos un desarrollo relevante sobre interfaces gráficas para el diseño de filtros FIR pasa-bajas mediante el método de ventaneo. Este trabajo, validado rigurosamente frente a herramientas comerciales consolidadas como MATLAB, demuestra que el desarrollo de software especializado y accesible es un motor de autonomía tecnológica. La precisión alcanzada en estos filtros digitales es un testimonio de la capacidad técnica de nuestros investigadores para crear herramientas de simulación robustas que sirven de base para aplicaciones más amplias en la gestión de datos de sensores y actuadores en redes inteligentes.

Finalmente, esta edición cierra con un análisis profundo sobre el Mercado Eléctrico Mayorista en México, abarcando el periodo de 2013 a 2025. Este artículo desglosa la evolución del marco institucional y el papel crítico del CENACE, examinando cómo las subastas de largo plazo fueron catalizadores para la incorporación de energías renovables. Sin embargo, existen importantes desafíos estructurales, como el rezago en la Red Nacional de Transmisión y la incertidumbre regulatoria observada en años recientes. Se concluye que la transición hacia una matriz limpia requiere un equilibrio delicado entre el liderazgo gubernamental y la participación privada, siempre bajo reglas claras que garanticen la inversión.

Extendemos una cordial invitación a académicos, estudiantes de posgrado, investigadores y científicos para que consideren a GEOVOLTAICA como el destino de sus futuras publicaciones. Nuestra revista se ofrece como un foro abierto y riguroso para el intercambio de hallazgos que impulsen el desarrollo científico; valoramos profundamente las contribuciones que, desde el rigor académico, propongan soluciones tangibles a los retos de la sostenibilidad y la innovación tecnológica. Estamos convencidos de que su participación es esencial para continuar fortaleciendo esta plataforma y expandir las fronteras del conocimiento en beneficio de nuestra sociedad y el medio ambiente.

**Dr. Néstor Daniel Galán Hernández**  
**Editor en jefe**  
**Geovoltaica**  
**Revista de Energía y Sostenibilidad**

# Comité Editorial

- **Dr. Néstor Daniel Galán Hernández**  
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Eber Enrique Orozco Guillén**  
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Guillermo Rubio Astorga**  
Tecnológico Nacional de México, México
- **Dr. Erik Eduardo Vázquez Fernández**  
Universidad De Colima, México

# Comité Científico

- **Dr. Javier Bernardo Cabrera Mejia**  
Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.
- **Dr. Mario Luna Risco**  
Universidad de Medellín. Colombia
- **Dra. Nildia Yamileth Mejias Brizuela**  
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dra. Dulce Ambriz Pérez**  
Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Dr. David Ulises Santos Ballardo**  
Centro de Investigaciones en Alimentación y Desarrollo, México.
- **Dr. Daniel Orlando Icaza Álvarez**  
Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.
- **Dr. Jorge Alberto Mendoza Pérez**  
Instituto Politécnico Nacional, México.
- **Dr. Denis Javier Aranguri Cayetano**  
Universidad del Santa, Perú
- **Dr. José Gregorio Marcano**  
Universidad de Carabobo, Venezuela.
  
- **Gestión de Medios**

**M.A. Norma Azalia Galán Rueda,**  
Tecnológico Nacional de México, México.

# CONTENIDO

- |           |   |
|-----------|---|
| <b>7</b>  | <b>Diseño de infraestructura tecnológica para monitoreo y control remoto de invernaderos mediante conectividad 3G</b>   |
| <b>12</b> | <b>Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo</b>  |
| <b>20</b> | <b>Implementación de un sistema de control de variables físicas en un invernadero escala laboratorio</b>  |
| <b>27</b> | <b>Mercado Eléctrico Mayorista en México (2013–2025): cambios regulatorios y la participación del Estado y privados en la transición hacia energías renovables.</b> |

# Diseño de infraestructura tecnológica para monitoreo y control remoto de invernaderos mediante conectividad 3G

## Design of technological infrastructure for remote monitoring and Control of greenhouses through 3G connectivity

Cesar Gerardo Parra, Jesús Iván Zazueta Juárez, Jesús Ángel Gonzales Castro, David Enrique Castro Palazuelos, Julio Cesar Picos Ponce, Guillermo Javier Rubio Astorga.

\*Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, M18170161@culiacan.tecnm.mx

### Resumen

*El diseño e implementación de un sistema de monitoreo con conectividad 3G y soporte en la nube para un invernadero es de gran importancia para el cuidado y desarrollo del cultivo. En este trabajo se utiliza un enrutador industrial 3G de la marca Delta Electronics para el envío de datos al servidor DLACloud, se desarrolla una base de datos con la información extraída de la nube, donde se utiliza una infraestructura que permite la supervisión en tiempo real del invernadero. El sistema de monitoreo genera alarmas mediante el envío de mensajes vía SMS y correo electrónico, esto permite una respuesta rápida del sistema en la prevención de daños en el cultivo. Además, se integra una interfaz gráfica que permite al usuario interpretar el comportamiento del sistema.*

**Palabras clave:** Monitoreo, base de datos, Invernadero, enrutador.

### Abstract

*The design and implementation of a monitoring system with 3G connectivity and cloud support for a greenhouse is of great importance for the care and development of crops. In this work, a 3G industrial router from Delta Electronics is used to send data to the DLACloud server. A database is developed with the information extracted from the cloud, using an infrastructure that enables real-time monitoring of the greenhouse. The monitoring system generates alarms by sending SMS and email messages, allowing the system to respond quickly in preventing crop damage. Additionally, a graphical interface is integrated to help the user interpret the system's behavior.*

**Keywords:** Monitoring, database, greenhouse, router.

Recibido: 04/07/2025; Aceptado 04/08/2025; Publicado 25/08/2025

## Introducción

En la agricultura, la productividad y la sostenibilidad son temas de importancia en este sector [1]. En los últimos años el estado de Sinaloa se establece como uno de los principales productores en el sector agrícola, exactamente el 5° lugar nacional, así con un porcentaje del 94% por subsector en el total de alimentos producidos por entidad de la evidencia recopilada del año 2017, como se muestra en la Figura 1 [2].

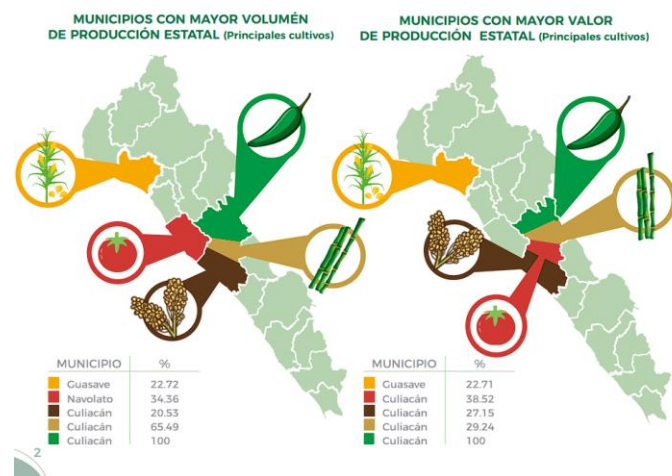


Figura 1. Evidencia del año 2017 Sinaloa se ubicaba en 5° lugar nacional [2].

Sinaloa cuenta con más de 778 mil hectáreas para uso agrícola y se destina un 94 % del agua dulce del estado, esto se observa en la Figura 2 [3]. Por ello, el monitoreo es una herramienta para garantizar un crecimiento eficiente del cultivo y tener un cuidado del recurso hídrico [4]. Estos sistemas se encargan de supervisar las cosechas y cultivos, y miden variables físicas para prevenir el brote de plagas y enfermedades [5].

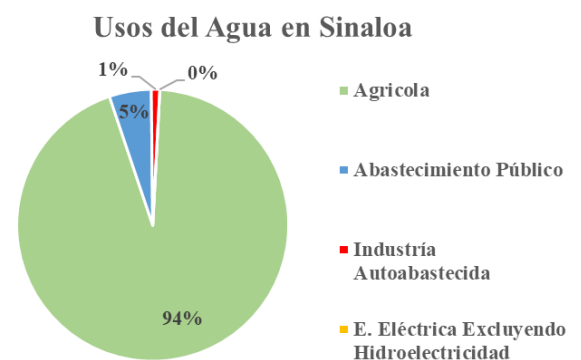


Figura 2. CONAGUA, estadísticas del agua en Sinaloa 2019 [3].

Con el avance de la tecnología, se implementan sistemas de monitoreo que permiten analizar el estado de los cultivos y el invernadero con facilidad [6]. Estos sistemas se pueden conectar con dispositivos

industriales, como lo son los Controladores Lógicos Programables (PLC) y pantallas HMI (Human Machine Interface) [7].

En este proyecto se implementa un sistema de monitoreo remoto mediante un PLC y un enrutador industrial 3G modelo DX-2100RW WW de la marca “Delta Electronics”, en un invernadero de tipo micro túnel. El sistema registra y almacena los parámetros de temperatura, humedad ambiente, humedad del suelo y consumo hídrico directamente en la nube, además, se almacenan en una base de datos local.

## Fundamentación Teórica

Un invernadero es una estructura agrícola diseñada para el cultivo y protección de las plantas. Dependiendo del clima, el cultivo y las necesidades del producto, se puede elegir un tipo de invernadero en específico, donde estos están diseñados con una cubierta de película plástica translúcida que impide el paso de la lluvia y controla mejor las condiciones ambientales [8]. Los invernaderos se pueden tecnificar con sistemas de riego, los cuales están diseñados para suministrar nutrientes y fertilizantes necesarios para brindar un crecimiento del cultivo adecuado [9].

La implementación de sistemas remotos para el monitoreo busca la transmisión e integración de datos a una base para la recopilación y el análisis de éstos [10]. Para recopilar la información, es indispensable una nueva herramienta para la extracción de datos o contenido de una página web [11].

Estos datos se almacenan en un servidor de la nube dedicado y se pueden exportar en formato CSV, JSON y XML, pero se puede manipular grandes conjuntos de datos. Estas herramientas sirven como punto de inflexión para la comparación y análisis de datos e incluso hoy en día tiene gran demanda este tipo de recurso [12]. A continuación, se simplifica el uso de la herramienta *WebScraping* para la extracción de información de la base de datos.

- Especifica una dirección URL de la que se desea obtener la información.
- Se realiza una petición para el direccionamiento de la página, es decir entrar al sitio web.
- Se utilizan palabras claves o expresiones del HTML para la extracción de datos.
- Guarda los datos en cierto formato, ya sea JSON o CSV.

## Metodología

Primeramente, se diseña la topología de red del sistema de comunicación, monitoreo y la base de datos. En la Figura 3 se

encuentra esta topología, donde un PLC y una HMI se conectan al enrutador mediante un conmutador industrial, a cada uno de estos dispositivos se le asigna una dirección IP. Una vez el enrutador tiene la información, la envía mediante la red celular 3G a un servidor en la nube (DIACloud). Después, se activa una tarea que contiene un código, este se ejecuta con el *software* Visual Studio con el motivo de realizar *WebScraping* y extraer la información necesaria para el procesamiento de la base de datos.

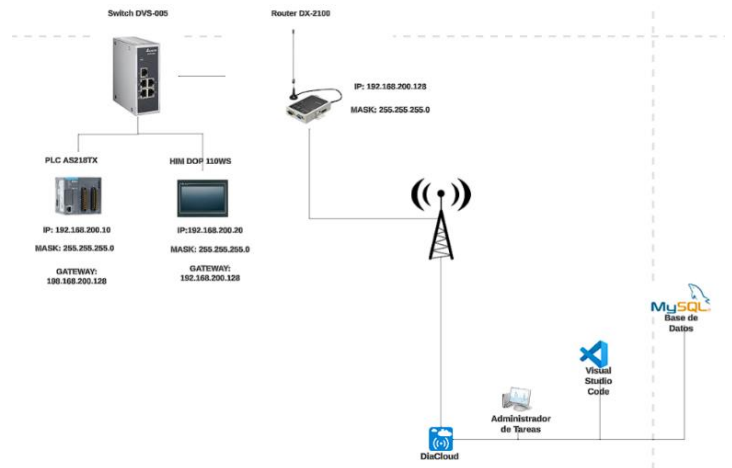


Figura 3. Topología de Red de Proceso.

Para crear la base de datos se utiliza la herramienta MySQL, donde se establecen 4 tablas: Registros, Sensores, Estado de Control y Alertas. Se realiza una estructura de conexión entre tablas. Se tiene como tabla principal el apartado Registros, donde en este mismo se enlaza con las otras tablas. Es decir, Alertas revisa los datos de temperatura de la sección de Registros para su posterior inserción en su tabla.

El código del procesamiento de datos realiza un método denominado *Feature Based*, este se divide en módulos o por carpetas con el objetivo de automatizar un proceso. También se encuentra un punto de entrada (*main*) que se encarga de ejecutar cada uno de los de los módulos establecidos. El primero de estos se denomina “Common”, éste se subdivide en “Configuración” y “Constantes”. En esta sección se configura cada módulo para el almacenamiento de cada una de las variables del invernadero por separado, además, se configura la conexión con la base de datos en MySQL.

Por último, se tiene el módulo “Features”, este se divide en 5 apartados: “Autenticación”, “Procesamiento”, “Descarga”, “Navegador Chrome” y “Navegación”. En esta sección se ingresa al servidor en la nube (DIACloud) para la descarga de información de la base de datos mediante el navegador Chrome.

## Resultados

La implementación del sistema de monitoreo remoto con un enrutador industrial 3G para la descarga de información automática, se lleva a cabo con éxito, lo que permite la generación de una base de datos. Como resultado, se habilita el procesamiento simultaneo de múltiples conjuntos de datos. Esta optimización se refleja en la Figura 4, donde se presenta el procesamiento de información.

Nombre	Estado	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
TEMPERATURA	●	05/06/2025 10:07 a. m.	Archivo de valores...	57 KB
Promedio Humedad 2	●	05/06/2025 10:07 a. m.	Archivo de valores...	57 KB
Promedio Humedad 1	●	05/06/2025 10:07 a. m.	Archivo de valores...	57 KB
HUMEDAD_AMBIENTE	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Archivo de valores...	57 KB
Histeresis Superior	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Archivo de valores...	1 KB
Histeresis Inferior	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Archivo de valores...	1 KB
Encendido	●	05/06/2025 10:06 a. m.	Archivo de valores...	1 KB
CONSUMO_RNA	●	05/06/2025 10:07 a. m.	Archivo de valores...	59 KB
CONSUMO_ONOFF	●	05/06/2025 10:07 a. m.	Archivo de valores...	14 KB
TEMPERATURA	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
PROMEDIO HUMEDAD1-2	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
PROMEDIO DE HUMEDAD3-4	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
HUMEDAD AMBIENTE	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
HISTERESIS_SUPERIOR	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
HISTERESIS_INFERIOR	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
ENCENDIDO	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
CONSUMO_ONOFF	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	
CONSUMO RNA	●	05/06/2025 10:08 a. m.	Carpeta de archivos	

Figura 4. Procesamiento de Datos.

Al finalizar el procesamiento de datos, éstos se almacenan en sus respectivas carpetas para su posterior registro en la base de datos. Este entorno de almacenamiento permite disponer de la información cuando sea requerida. La ejecución de procesos se realiza de forma periódica, con un intervalo de una hora a partir del inicio de sesión del usuario en su equipo de cómputo. Es decir, el programa se ejecuta automáticamente sin necesidad de intervención manual.

En caso de ocurrir una interrupción durante la ejecución del programa, el sistema intenta reiniciar el proceso hasta tres veces. Si persisten las fallas y el sistema no se puede ejecutar o no registra datos de forma correcta, se procede a deshabilitar la tarea general de descarga de información, para evitar errores adicionales.

Por otro lado, para la interpretación y el análisis de datos se requiere una visualización de las variables. Con este propósito, se implementa una interfaz gráfica mediante una computadora que muestra los registros y las alarmas del sistema. Esta funcionalidad ilustra en la Figura 5.

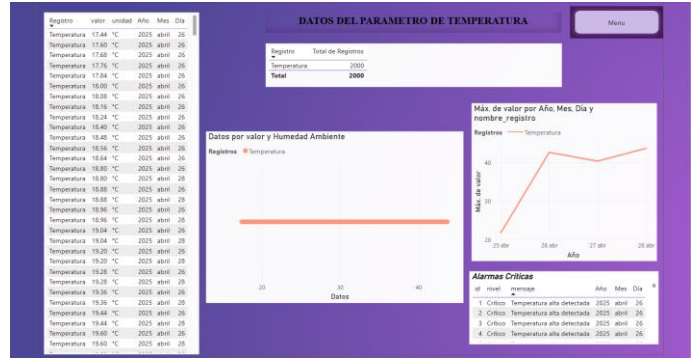


Figura 5. Interfaz para el análisis de datos.

Los resultados demuestran que la implementación de un sistema de monitoreo remoto permite la descarga autónoma de datos, representa un avance en el análisis de información. Esto facilita la toma de decisiones para la mejora del sistema y así obtener una recopilación de datos precisa y eficiente.

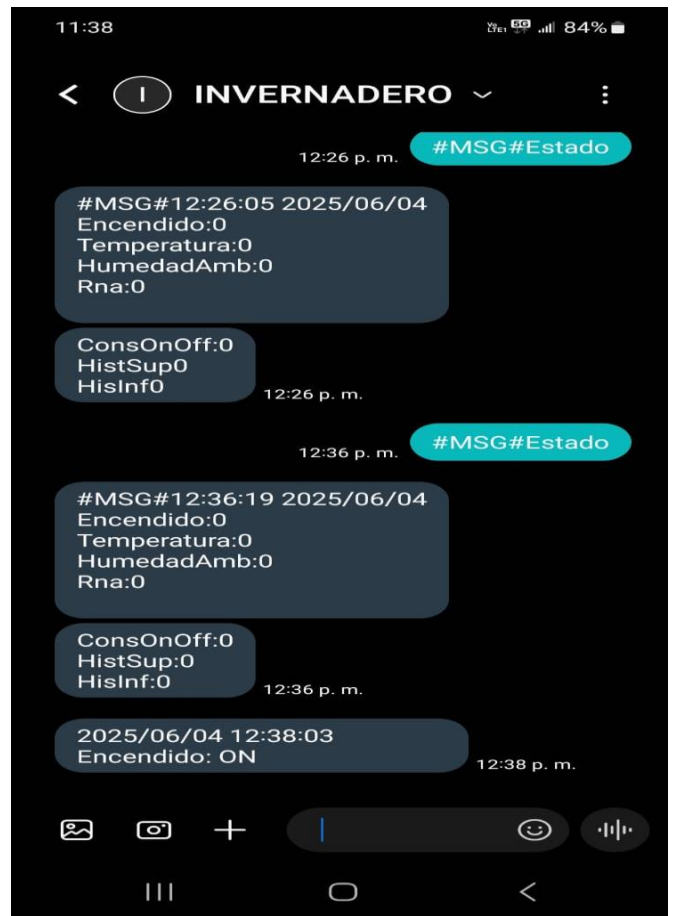


Figura 6. Método de comunicación mediante SMS.

Finalmente, la Figura 6 muestra el método de comunicación con el sistema de monitoreo a través de notificaciones vía mensaje SMS. Al

enviar el comando “#MSM#+ESTADO”, el sistema responde con un mensaje que incluye los datos registrados hasta ese momento, tales como Encendido (el estado del sistema), Temperatura, HumedadAmb (humedad ambiente), ConsumoRNA, ConsumoOnOff y los valores de Histéresis inferior y superior. Además, si detecta un cambio en el estado de encendido, el sistema envía una notificación adicional para indicar ese evento.

## Conclusiones

La implementación de un sistema de comunicación en un invernadero es de importancia para el monitoreo de los parámetros del cultivo. este tipo de tecnología proporciona datos en tiempo real para su posterior análisis. Asimismo, la descarga autónoma de información hacia la base de datos en la nube representa un beneficio, al facilitar la recolección continua de información sin interrumpir otros procesos ni requerir la atención del usuario. Esto no solo ahorra tiempo, también asegura que la información se encuentre disponible y organizada en todo momento para futuras consultas.

El uso de la base de datos para el almacenamiento histórico de información es favorable, en casos donde el servidor local puede alcanzar su límite de capacidad. Contar con un respaldo adecuado permite realizar mejoras en el sistema en el futuro o analizar situaciones pasadas.

Por último, el integrar un sistema de alarmas permite detectar fallas, activaciones inesperadas o eventos importantes de forma inmediata. Esta función mejora la seguridad del invernadero y permite una respuesta rápida ante situaciones críticas. Todo esto contribuye a que la producción agrícola sea eficiente, segura y sostenible.

## Referencias

- [1] SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural), “Cultivando el Futuro Agricultura Sostenible y Sustentable,” Oct. 2023. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivando-el-futuro-agricultura-sostenible-y-sustentable>
- [2] CIEGSIN (Centro de Información Estadística y Geográfica del Estado de Sinaloa), “Agricultura Indicadores Por Tema,” 2017. Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: <https://estadisticas.sinaloa.gob.mx/eBooks/Temas/AGRICULTUR A.pdf>
- [3] CONAGUA, “Estadísticas del Agua en México 2021,” Oct. 2022. [Online]. Available:

- [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/EAM\\_2021.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/EAM_2021.pdf)
- [4] B. Ahmad et al., “Evaluation of Smart Greenhouse Monitoring System using Raspberry-Pi Microcontroller for the Production of Tomato Crop,” *Journal of Applied Research in Plant Sciences*, vol. 4, no. 01, pp. 452–458, Jan. 2023, doi: 10.38211/joarps.2023.04.01.54.
- [5] M. C. Villasana-Montes, E. Hernández-Rojas, R. L. Palomino-Reséndiz, K. F. Maya-Gress, and S. I. Palomino-Reséndiz, “Diseño de sistema de monitoreo para detección temprana de enfermedades y plagas superficiales en plantas mediante visión artificial,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 11, no. Especial4, pp. 221–230, Nov. 2023, doi: 10.29057/icbi.v11iespecial4.11369.
- [6] S. I. Ossa Duque, “Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos,” *Revista Vector*, vol. 12, pp. 51–60, Jun. 2017, doi: 10.17151/vect.2017.12.6.
- [7] J. D. Rodríguez Aragón and N. C. Chacón Medina, “Modelado y control de un sistema de control de temperatura PID para un invernadero de fresaS,” *Apuntes De Ciencia E Ingeniería*, vol. 3, no. 2, Jun. 2025, doi: doi.org/10.37511.
- [8] R. Hernández Villaseñor, “Tipos de invernaderos ¿Qué es un invernadero? y usos.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://hydroenv.com.mx/id44/>
- [9] J. D. Padilla Rochín, “Desarrollo del control de sistema de fertirriego en un invernadero hidropónico para producto primario,” *TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN*, Culiacán, 2023.
- [10] S. Berrios Gomez and H. J. Rivera Herrera, “Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0,” *INGENIERÍA INVESTIGA*, vol. 4, Jun. 2022, doi: 10.47796/ing.v4i0.624.
- [11] R. Mijangos-Espinosa, A. Martínez-Rebollar, H. Estrada-Esquivel, and Y. Hernández-Pérez, “Use of Web Scraping Techniques for Automatic Capturing of Databases Located in the Web,” *Research in Computing Science*, vol. 151, no. 5, pp. 143–157, 2022.
- [12] B. Zhao, “Web Scraping,” in *Encyclopedia of Big Data*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–3. doi: 10.1007/978-3-319-32001-4\_483-1.

## Semblanza Autores



Cesar Gerardo Parra, Ingeniero en Electrónica (2023) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.



Zazueta Juárez Jesús Iván, estudiante de Ingeniería Mecatrónica y Residente en el laboratorio de Mecatrónica y Control de la división de estudios de posgrados e investigación del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.



Jesús Ángel González Castro, Ingeniero en Mecatrónica (2022) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2024) por el TecNM Campus Culiacán. Actualmente, es estudiante de doctorado en el TecMN campus Culiacán.



David Enrique Castro Palazuelos, Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara (2015).



Julio Cesar Picos Ponce, Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017).



Guillermo Javier Rubio Astorga, Ingeniero Eléctrico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (1998). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2001) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2013) por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara.

# Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo

## Development of a Graphical Interface for the design of Low-Pass FIR Filters using the Windowing Method

Jesús Ángel González Castro\*, César Gerardo Parra, David Enrique Castro Palazuelos

\*Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, jesus\_gc@culiacan.tecnm.mx

### Resumen

En la actualidad, los filtros digitales se encuentran presentes en una amplia variedad de sistemas, desempeñando un papel esencial en el procesamiento de señales en múltiples aplicaciones científicas y tecnológicas. Su utilidad principal radica en la capacidad de eliminar componentes de frecuencia no deseados, preservando al mismo tiempo la información relevante de la señal. Esta característica es especialmente crucial en áreas como las telecomunicaciones, instrumentación, y el procesamiento de audio, donde la calidad y precisión de las señales son fundamentales. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una interfaz gráfica para el diseño de filtros FIR pasa-bajas mediante el método de ventaneo, implementada en el entorno de MATLAB. Para validar su funcionamiento, se diseñaron filtros digitales utilizando distintas ventanas durante el diseño y se compararon los resultados con aquellos generados por la interfaz gráfica nativa de MATLAB. Los resultados evidencian diferencias poco significativas entre los filtros diseñados en ambas herramientas, lo que respalda la correcta simulación y funcionamiento de la interfaz propuesta.

**Palabras clave:** DSP, filtro FIR, ecuación en diferencias, instrumentación.

### Abstract

Today, digital filters are present in a wide variety of systems, playing an essential role in signal processing across multiple scientific and technological applications. Their primary utility lies in their ability to eliminate unwanted frequency components while preserving relevant signal information. This feature is especially crucial in areas such as telecommunications, instrumentation, and audio processing, where signal quality and accuracy are critical. In this context, this work focuses on the development of a graphical interface for the design of low-pass FIR filters using the windowing method, implemented in the MATLAB environment. To validate its operation, digital filters were designed using different windows during the design process, and the results were compared with those generated by the native MATLAB graphical interface. The results show only minor differences between the filters designed in both tools, which supports the correct simulation and operation of the proposed interface.

**Keywords:** DSP, FIR filter, difference equation, instrumentation.

Recibido: 07/07/2025; Aceptado 04/08/2025; Publicado 25/08/2025

## Introducción

El filtrado digital representa la forma más común de procesamiento de señales, su función principal es eliminar componentes de frecuencia no deseadas y optimizar características como la magnitud, la fase o el retardo de grupo en determinadas regiones del espectro de una señal [1].

En comparación con los filtros analógicos, los filtros digitales ofrecen ventajas como una mayor precisión, mejor nivel de relación señal a ruido, menor costo de desarrollo y una elevada confiabilidad. Estas ventajas han llevado a que los filtros digitales estén presentes en casi todas las aplicaciones de procesamiento de señales, como en telecomunicaciones, instrumentación, procesamiento de señales de audio, sistemas de monitoreo, entre otros [2-4].

Los filtros digitales pasa-bajas son elementos clave en el procesamiento de señales, ya que permiten atenuar o reducir las componentes de alta frecuencia no deseadas. Su uso es especialmente relevante, ya que contribuyen significativamente a la eliminación de ruido y a la prevención del aliasing. Esta última función es crucial en sistemas de

adquisición de datos, como los convertidores analógico-digitales (del inglés ADC, analog to digital converters) [5].

Por lo tanto, este artículo presenta una interfaz gráfica desarrollada para el diseño de filtros digitales pasa-bajas, que permite al usuario definir de manera flexible las características del filtro según los requerimientos de diseño. La validez de la interfaz se comprueba mediante simulaciones en el entorno de MATLAB/Simulink, y los resultados obtenidos se contrastan con los generados por la herramienta Filter Designer de MATLAB.

## Fundamentación Teórica

El término filtro se utiliza comúnmente para referirse a sistemas que son lineales e invariantes en el tiempo, y cuya función principal es permitir el paso de señales que cumplen con ciertos criterios, mientras rechazan aquellas que no lo hacen. Esta capacidad de discriminación se define a través de la respuesta en frecuencia del sistema discreto  $H(e^{j\omega})$ , la cual está determinada por la ecs. (1),

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j\omega n}, \quad (1)$$

donde  $h(n)$  representa la respuesta al impulso del sistema y  $\omega$  corresponde a la frecuencia angular, la cual se encuentra en el intervalo  $-\pi < \omega \leq \pi$ .

Mediante una selección adecuada de la respuesta al impulso  $h(n)$ , es posible diseñar sistemas que favorezcan determinadas bandas de frecuencia y atenúen o bloqueen otras, permitiendo así un control preciso del contenido espectral de la señal procesada [6]. Cabe señalar que un filtro digital actúa sobre señales discretas en el tiempo, es decir, señales previamente muestreadas [7].

Los sistemas (filtros digitales) lineales e invariantes en el tiempo pueden ser representados por medio de la ecuación en diferencias en el tiempo discreto presentada en ecs. (2).

$$y[n] = -\sum_{k=1}^N a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^M b_k x[n-k], \quad (2)$$

donde  $y[n]$  y  $x[n]$  son la salida y entrada del filtro en el instante  $n$  respectivamente,  $b_k$  son los coeficientes del polinomio que multiplican a las muestras de la salida  $y[n-k]$  (ceros del sistema) y  $a_k$  son los coeficientes que multiplican a las muestras de la entrada  $x[n-k]$  (polos del sistema). A los sistemas representados con la ecuación (2) también se les conoce como filtros de respuesta al impulso infinita (del inglés IIR, *infinite impulse response*) [8].

En los filtros de respuesta al impulso finita (del inglés FIR, *finite impulse response*) causales, la ecuación en diferencias está conformada únicamente por la sumatoria que contiene el producto de los coeficientes  $b_k$  por las muestras de la señal de entrada  $x(n-k)$  [7]. Además, debido a que  $a_0 = 1$  y  $a_k = 0$  para  $k = 1, 2, \dots, N$ , la ecuación en diferencias se puede expresar en forma reducida mediante la ecs. (3).

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (3)$$

Los filtros digitales pueden representarse mediante distintas estructuras, siendo la forma directa una de las más utilizadas debido a que se obtiene a partir de la ecuación en diferencias o de la función de transferencia, sin requerir modificaciones significativas [7]. La Figura 1 muestra la estructura correspondiente a la forma directa I. En el caso particular de los filtros FIR, al tratarse de sistemas que solo presentan ceros, pueden representarse utilizando únicamente la sección de la izquierda del diagrama mostrado en la Figura 1 y matemáticamente se representa por (3). La Figura 2 presenta la estructura de la forma directa de un filtro FIR, en la cual se considera que su longitud es de orden  $M$ . En la literatura se reportan diversos estudios dedicados al diseño de filtros digitales. En [9], se propone el diseño de un filtro FIR por medio de una ventana construida a partir de funciones base gaussianas

Jesús Á. González C., et al., Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo

equiespaciadas, lo que representa una alternativa novedosa frente a los métodos tradicionales de diseño por ventaneo como Hamming o Kaiser.

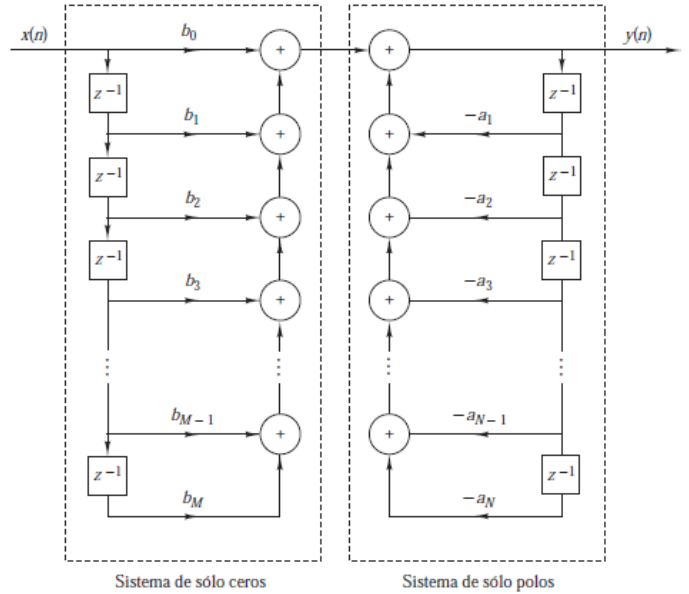


Figura 1. Estructura de la forma directa I en filtros digitales [7].

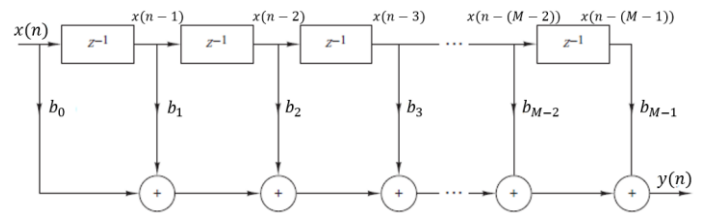


Figura 2. Estructura de la forma directa de un filtro FIR [7].

En esta misma línea, en [10] se analiza y diseña un filtro FIR para el procesamiento de señales electroencefalográficas (EEG), aplicando técnicas de ventaneo con el objetivo de eliminar el ruido y mejorar la calidad de la señal, facilitando así su interpretación clínica. Este estudio refuerza la importancia del filtrado como etapa de preprocesamiento de datos en múltiples áreas, tales como el procesamiento de señales biomédicas, de audio, imagen, ciencia de datos e instrumentación.

## Metodología

Se desarrolla una interfaz gráfica de usuario (del inglés GUI, *graphical user interface*) en el entorno de MATLAB, orientada a facilitar el proceso de diseño de filtros digitales FIR pasa-bajas mediante el método de ventaneo, para evitar confusiones, en este trabajo se le nombrará interfaz de filtros pasa-bajas (InterfazVentaneoFPB). Esta

herramienta interactiva permite al usuario configurar de forma intuitiva los parámetros fundamentales del filtro como son: las frecuencias de corte en las bandas de paso y de rechazo, el rizado permitido en la banda de paso y la atenuación en la banda de rechazo. Además, la interfaz brinda la posibilidad de seleccionar el tipo de ventana a emplear en el diseño (Rectangular, Bartlett, Hann, Hamming o Blackman), así como la frecuencia de muestreo del sistema.

La interfaz gráfica proporciona información clave del diseño, como el orden del filtro, la frecuencia de corte y los coeficientes  $b_k$  correspondientes. Asimismo, incluye un conjunto de representaciones gráficas que permiten un análisis exhaustivo del comportamiento del filtro, tales como la respuesta al impulso, las respuestas en magnitud y fase, y el diagrama de polos y ceros. Estas visualizaciones resultan necesarias para validar las especificaciones del diseño y verificar el cumplimiento de los requerimientos previamente establecidos.

A continuación, se muestra un ejemplo representativo del proceso de diseño de un filtro digital FIR utilizando la InterfazVentaneoFPB, en el cual se especificaron las siguientes características del filtro utilizando una ventana rectangular:

- Frecuencia de corte en la banda de paso ( $\omega_p$ ):  $0.2 \pi$  rad.
- Frecuencia de corte en la banda de rechazo ( $\omega_s$ ):  $0.3 \pi$  rad.
- Rizado en la banda de paso ( $R_p$ ): -3 dB.
- Atenuación en la banda de rechazo ( $A_s$ ): -40 dB.
- Frecuencia de muestreo ( $f_s$ ): 50 KHz.

La Figura 3 presenta la respuesta en frecuencia teórica ideal del filtro y la Figura 4 muestra el diagrama a bloques que describe los pasos necesarios para obtener los coeficientes del filtro utilizando el método de ventaneo, sobre el cual se basa el funcionamiento de la InterfazVentaneoFPB.

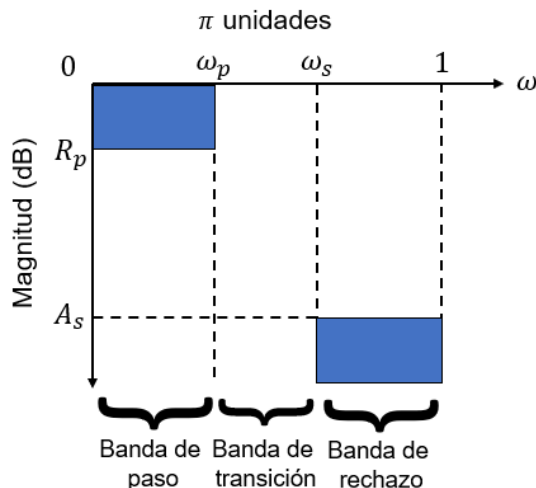


Figura 3. Respuesta en frecuencia teórica deseada del filtro.

Jesús Á. González C., et al., Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo

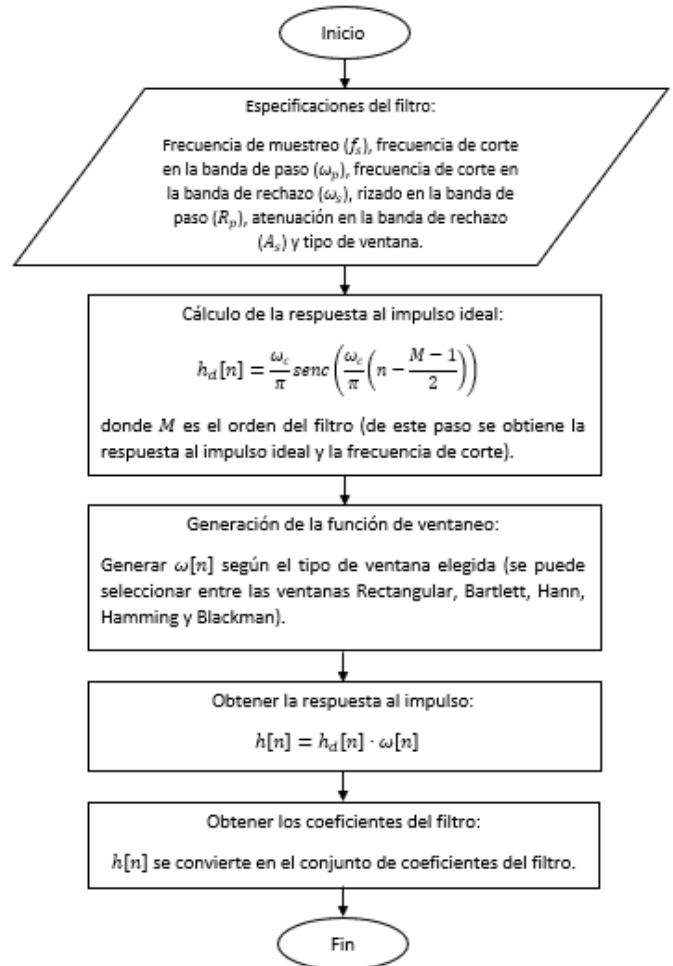


Figura 4. Pasos necesarios para obtener los coeficientes del filtro utilizando el método de ventaneo.

La Figura 5 ilustra el resultado de la generación de un filtro FIR pasabajas en la InterfazVentaneoFPB usando una ventana rectangular.

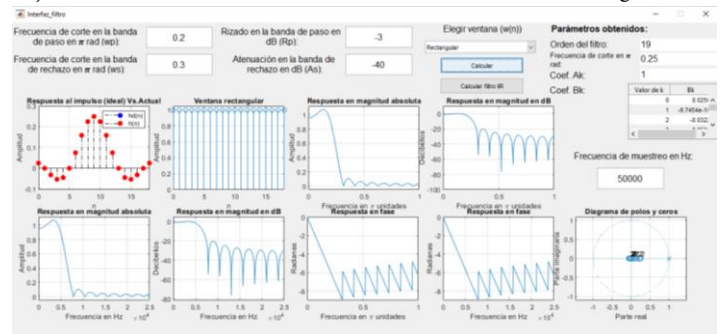


Figura 5. Resultado de la generación de un filtro FIR en la interfaz FPB usando una ventana rectangular.

Con el objetivo de validar la funcionalidad de la interfaz gráfica y el comportamiento de las distintas ventanas disponibles para el diseño de filtros digitales, se realizaron pruebas por medio de simulación. En la Figura 6 se visualiza la respuesta de cada filtro diseñado con las

diferentes ventanas, ante una señal senoidal de 10 kHz y 0.9 volts de amplitud ( $x[n]$ ). Para asegurar una comparación justa, se mantuvieron constantes las especificaciones utilizadas con la ventana rectangular, variando únicamente el tipo de ventana.

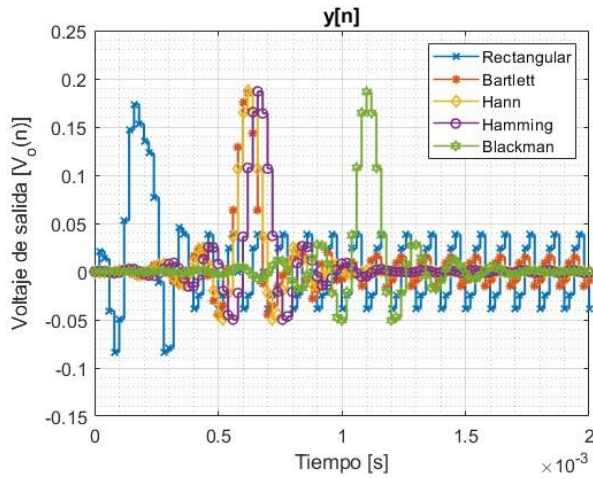


Figura 6. Comparación de la respuesta de los filtros diseñados mediante diferentes ventanas en la InterfazVentaneoFPB.

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo entre los parámetros obtenidos mediante la InterfazVentaneoFPB y los resultados de la simulación para cada caso.

Tabla 1.

Análisis comparativo entre la InterfazVentaneoFPB y la simulación realizada en Simulink.

Ventana	Número de coeficientes (M)	Señal filtrada	Ganancia de amplitud (A)	Atenuación (dB)
Rectangular	19	Interfaz	0.045143	-26.9129
		Simulación	0.045147	-26.9111
Bartlett	62	Interfaz	0.017830	-34.9726
		Simulación	0.017827	-34.9730
Hann	63	Interfaz	0.000140	-77.0774
		Simulación	0.000140	-77.0774
Hamming	67	Interfaz	0.001590	-55.9720
		Simulación	0.001588	-55.9778
Blackman	111	Interfaz	0.000023	-92.7661
		Simulación	0.000023	-92.7661

Cabe señalar que MATLAB almacena las variables numéricas como valores en punto flotante de doble precisión, utilizando 8 bytes (64 bits) de memoria conforme al estándar IEEE 754-2008 [11]. Por lo tanto, los filtros diseñados y simulados cuentan con estas características.

De acuerdo con el análisis presentado en la Tabla 1, únicamente los filtros diseñados con las ventanas de Hann, Hamming y Blackman cumplen con el requisito de una atenuación en la banda de rechazo inferior a -40 dB. Para este trabajo se seleccionó la ventana de Hann, debido a que requiere un menor número de coeficientes, y en consecuencia, una menor cantidad de memoria para su implementación.

Con el objetivo de validar el comportamiento del filtro diseñado mediante la ventana de Hann, se llevaron a cabo tres simulaciones en el entorno MATLAB/Simulink. En cada simulación se utilizó como entrada una señal senoidal de 0.9 volts de amplitud, variando únicamente su frecuencia para representar tres escenarios distintos: una señal dentro de la banda de paso, otra en la banda de transición y una tercera en la banda de rechazo del filtro.

Las Figuras 7, 8 y 9 presentan los resultados de las simulaciones realizadas para señales de entrada senoidales con frecuencias de 1 kHz, 6 kHz y 10 kHz, respectivamente, correspondientes a la banda de paso, la banda de transición y la banda de rechazo del filtro diseñado. En cada caso, se puede observar cómo varía la respuesta del sistema en función de la frecuencia de la señal de entrada, lo cual permite evaluar la capacidad del filtro para atenuar o permitir el paso de determinadas componentes de frecuencia. Adicionalmente, la Tabla 2 expone un análisis comparativo entre los parámetros obtenidos a través del diseño realizado con la InterfazVentaneoFPB y los obtenidos mediante simulación.

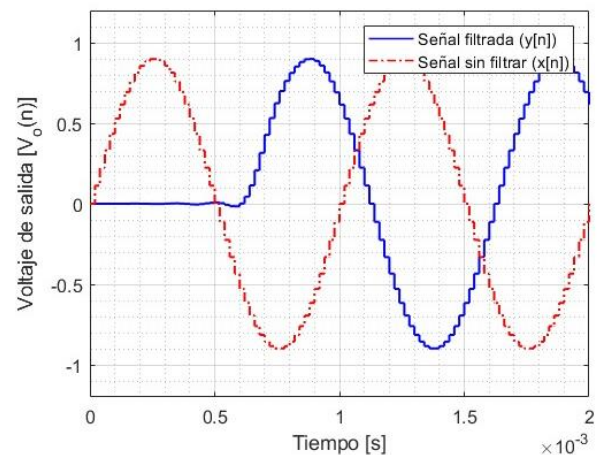


Figura 7. Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de paso (1KHz).

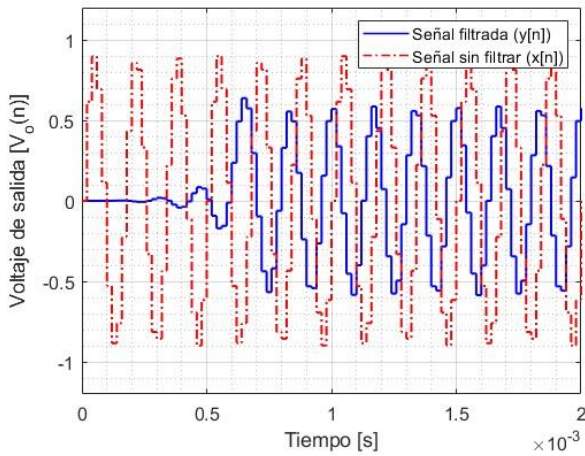


Figura 8. Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de transición (6KHz).

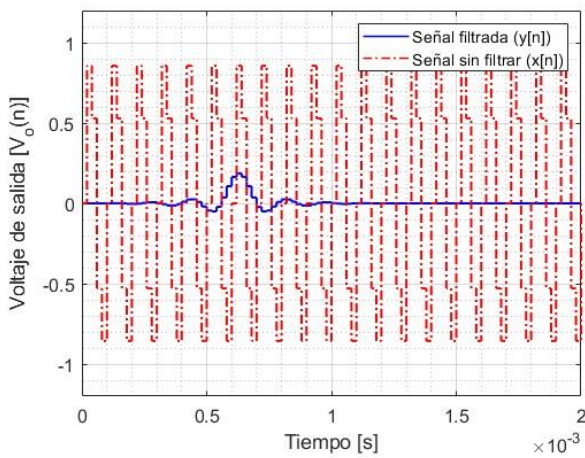


Figura 9. Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de rechazo (10KHz).

Tabla 2.

Análisis comparativo entre la InterfazVentaneoFPB y la simulación realizada en Simulink.

Frecuencia de la señal de entrada	Señal filtrada	Ganancia de amplitud (A)	Atenuación en decibelios (dB)
1 kHz	Interfaz	0.999952	-0.000417
	Simulación	0.999809	-0.000165
6 kHz	Interfaz	0.651833	-3.719740
	Simulación	0.651721	-3.720720
10 kHz	Interfaz	0.000140	-77.077435
	Simulación	0.000140	-77.077435

## Resultados

Para validar la InterfazVentaneoFPB, se realizó una comparación con la herramienta Filter Designer de MATLAB. Esta interfaz, incluida en el Signal Processing Toolbox, permite diseñar y analizar filtros digitales FIR o IIR de forma rápida mediante la definición de especificaciones del filtro [12].

La principal diferencia entre Filter Designer y la InterfazVentaneoFPB radica en los parámetros de entrada. Mientras que Filter Designer solicita directamente al usuario frecuencia de corte  $\omega_c$ , en la InterfazVentaneoFPB esta se calcula a partir de los parámetros  $\omega_p$  y  $\omega_s$ . Otra diferencia es que Filter Designer requiere que el usuario especifique el orden del filtro, mientras que en la InterfazVentaneoFPB dicho valor se determina automáticamente.

Otra diferencia importante se encuentra en la visualización de los gráficos de salida. Al diseñar el filtro con frecuencia normalizada, Filter Designer solo permite representar los resultados en términos de frecuencia normalizada frente a amplitud en decibelios, mientras que la InterfazVentaneoFPB ofrece una visualización más flexible, permitiendo mostrar la amplitud tanto en escala lineal como en decibelios, y la frecuencia en Hz.

La Figura 10 presenta el resultado del diseño del filtro FIR en la InterfazVentaneoFPB usando una ventana de Hann bajo las mismas especificaciones de diseño planteadas en la Metodología.

La Figura 11 ilustra la interfaz gráfica proporcionada por la herramienta Filter Designer, donde se configuró un filtro FIR pasabajos utilizando el método de ventaneo. Se estableció un orden de 62 (lo que equivale a 63 coeficientes), una ventana de Hann y una frecuencia de corte normalizada de  $0.25\pi$  radianes. Estos parámetros fueron seleccionados con el fin de generar un filtro equivalente al diseñado con la interfaz gráfica presentada en este trabajo, con el objetivo de comparar el comportamiento y la respuesta de ambos diseños bajo las mismas condiciones de prueba.

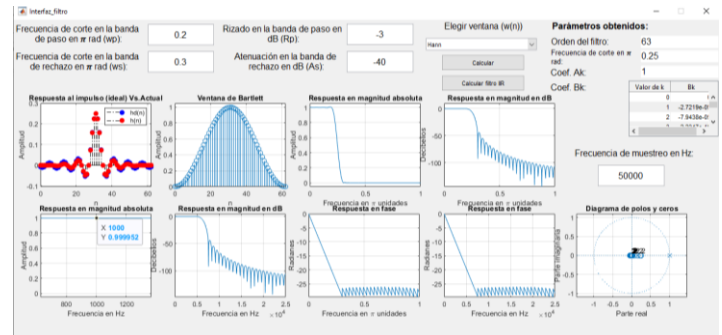


Figura 10. Diseño del filtro mediante una ventana de Hann usando la InterfazVentaneoFPB.

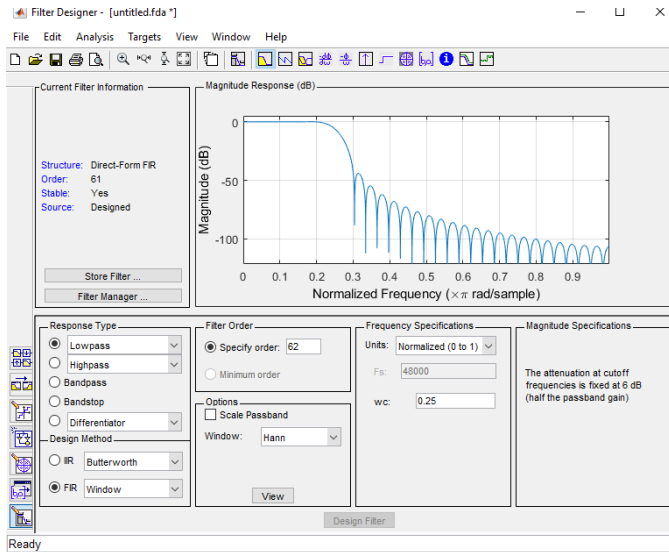


Figura 11. Diseño del filtro mediante una ventana de Hann usando la herramienta Filter Designer de MATLAB.

La Figura 12, presenta una comparación gráfica de la respuesta al impulso unitario  $h(n)$ , equivalente a los coeficientes del filtro, obtenida mediante ambas interfaces gráficas. Se observa que los valores son prácticamente idénticos.

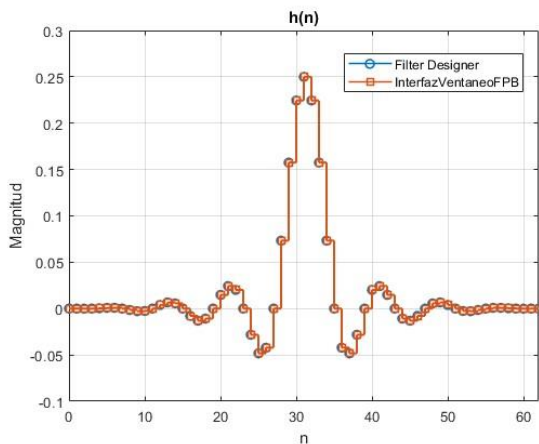


Figura 12. Comparación gráfica de la respuesta al impulso unitario  $h(n)$ , equivalente a los coeficientes del filtro, obtenida mediante la InterfazVentaneoFPB y Filter Designer.

Las Figuras 13, 14 y 15 ilustran una comparación mediante simulación entre el filtro diseñado mediante una ventana de Hann utilizando la InterfazVentaneoFPB y el filtro generado mediante la herramienta Filter Designer de MATLAB al aplicar una entrada senoidal con una frecuencia de 1 kHz, 6 kHz, y 10 kHz respectivamente y una amplitud de 0.9 volts. Esta comparación se realiza con el fin de analizar y contrastar las respuestas de los filtros obtenidos en el dominio del tiempo discreto.

Jesús Á. González C., et al., Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo

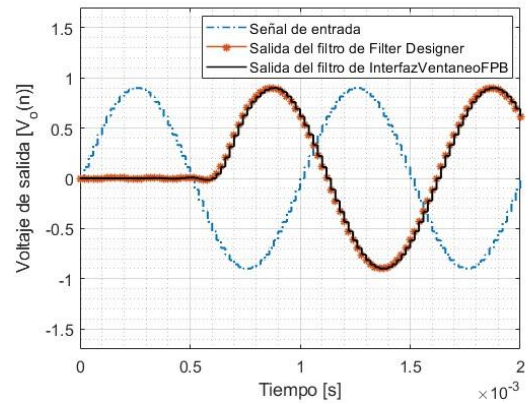


Figura 13. Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la repuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de paso (1 kHz).

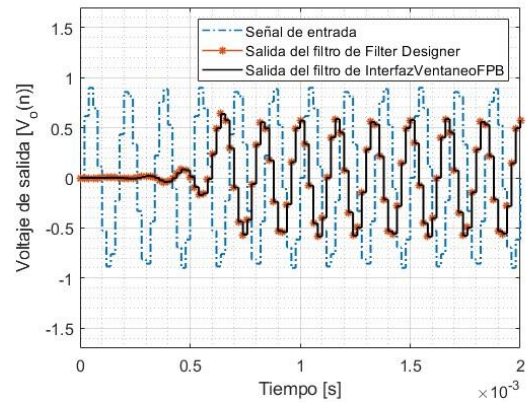


Figura 14. Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la repuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de transición (6 kHz).

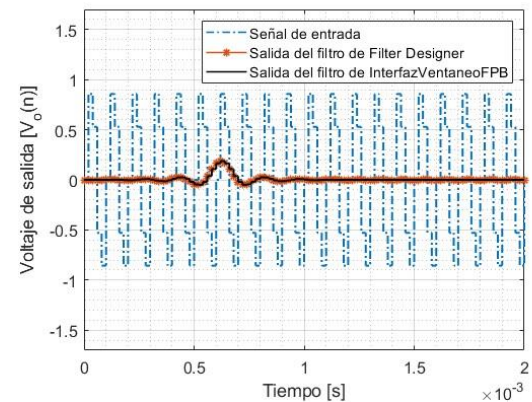


Figura 15. Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la repuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de rechazo (10 kHz).

El análisis comparativo permite verificar que el filtro implementado a través de la InterfazVentaneoFPB ofrece un desempeño equivalente al proporcionado por la herramienta Filter Designer, lo que valida la efectividad del diseño.

## Conclusiones

En este trabajo se presenta una interfaz gráfica desarrollada específicamente para el diseño de filtros digitales FIR pasa-bajas empleando el método de ventaneo, implementada en el entorno de MATLAB. Con el objetivo de validar su funcionamiento, se llevan a cabo simulaciones en Simulink que permiten visualizar de manera clara la respuesta de los filtros diseñados, utilizando distintos tipos de ventanas. Además, se incluye la comparación con un filtro equivalente generado mediante la herramienta Filter Designer, a fin de contrastar los resultados obtenidos con la interfaz propuesta.

A través del análisis realizado se puede constatar que la InterfazVentaneoFPB proporciona información relevante y coherente, que concuerda en gran medida con los resultados obtenidos mediante simulación. Además, se observa que, al aumentar el orden del filtro digital el número de coeficientes mediante las diferentes ventanas crece, se incrementa la atenuación en la banda de rechazo y se reduce la banda de transición, sin embargo, la memoria y el número de operaciones a realizar (suma de productos) se incrementan, lo que conlleva un mayor costo computacional.

A través de las pruebas realizadas se encontró que no existen diferencias significativas entre el filtro generado por la interfaz gráfica desarrollada (InterfazVentaneoFPB) y el obtenido mediante Filter Designer, con esto se puede constatar que la GUI presentada en este proyecto es fiable, además de ser fácil de utilizar y amigable con el usuario.

Como trabajo futuro se visualiza la implementación de este tipo de filtros digitales en diferentes plataformas de *hardware* como microcontroladores, procesadores digitales de señales (del inglés DSP, *digital signal processors*), arreglos de compuertas programables en campo (del inglés FPGA, *field, programmable gate array*), entre otras.

## Referencias

- [1] B. A. Sheno, Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2006.
- [2] T. I. Laakso, V. Valimaki, M. Karjalainen and U. K. Laine, "Splitting the unit delay [FIR/all pass filters design]," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 13, no. 1, pp. 30-60, 1996.

- [3] G. Stoyanov and M. Kawamata, "Variable digital filters," Journal of Signal Processing, vol. 1, no. 4, pp. 275-289, 1997.
- [4] O. A. Jumaev, D. S. Karpovic y M. T. Ismoilov, "Methods for digital signal processing and digital filter synthesis," AIP Conference Proceedings, vol. 2656, 2022.
- [5] A. O. M. Salih, "Audio Noise Reduction Using Low Pass Filters," Open Access Library Journal, vol. 4, no. 11, pp. e3709, 2017.
- [6] A. V. Oppenheim, y R. W. Schaffer, Tratamiento digital de señales. Madrid, España: Pearson, 2011.
- [7] J. G. Proakis, y D. G. Manolakis, Tratamiento de señales en tiempo discreto. Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [8] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd ed. San Diego, Estados Unidos: California Technical Publishing, 1997.
- [9] R. Avanzato, F. Beritelli, G. Capizzi y G. Lo Sciuto " A new design methodology for window-based FIR filters," Electronics Letters, 2023, vol. 59, no. 11, pp. e12815.
- [10] A. Pant y A. Kumar, "EEG Signal Filtering Using Rectangular FIR Window Method," 2024 International Conference on Computer, Electronics, Electrical Engineering & their Applications (IC2E3), Srinagar Garhwal, Uttarakhand, India, 2024, pp. 1-7.
- [11] MATLAB Help Center. Fundamental MATLAB Classes. Disponible en: [https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab\\_prog/fundamental-matlab-classes.html](https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/fundamental-matlab-classes.html)
- [12] MATLAB Help Center. Introduction to Filter Designer. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/introduction-to-filter-designer.html>

## Semblanza Autores



Jesús Ángel González Castro es Ingeniero en Mecatrónica (2022) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2024) por el TecNM Campus Culiacán. Actualmente, es estudiante de doctorado en el TecMN campus Culiacán.



Cesar Gerardo Parra es Ingeniero en Electrónica (2023) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.



David Enrique Castro Palazuelos Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara (2015).

# Implementación de un sistema de control de variables físicas en un invernadero escala laboratorio

## Implementation of a physical variable control system in a laboratory-scale greenhouse

Marco A. Beltrán, Johan A. Soto, Cesar Gerardo Parra, Julio C. Picos, Luis E. Barreto\*

Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación. \*Autor de correspondencia: [luis.bs@culiacan.tecnm.mx](mailto:luis.bs@culiacan.tecnm.mx)

### Resumen

*Ante los desafíos que se presentan en la actualidad como son escasez de agua y climas poco favorables para el desarrollo de las plantas, en esta investigación se realiza la implementación de sistemas de control del tipo PID y ON-OFF en un invernadero escala laboratorio para producción de alimentos. Se logra reducir la temperatura máxima en por lo menos 10 °C y se aumenta la humedad relativa en un 10 % aproximadamente en un intervalo de 6 horas durante los periodos de mayor insolación. Además, se realiza un análisis del comportamiento del sistema de riego, en donde se obtuvo un valor promedio del 81.7 % con un error del 1.7 % con respecto al valor deseado.*

**Palabras clave:** Control, PID, On-Off, Invernadero.

### Abstract

*Facing the current challenges, such as water scarcity and unfavorable climatic conditions for plant development, this research implements PID and ON-OFF control systems in a laboratory-scale greenhouse for food production. It has been achieved to reduce the maximum temperature by at least 10 °C and to increase the relative humidity by about 10 % in a 6-hour interval during the periods of highest insolation. In addition, the performance of the irrigation system has been analyzed, obtaining an average value of 81.7 % with an error of 1.7 % with respect to the desired value.*

**Keywords:** Control, PID, On-Off, Greenhouse.

Recibido: 12/07/2025; Aceptado 04/08/2025; Publicado 25/08/2025

## Introducción

Las condiciones ambientales en el estado de Sinaloa se ven afectadas por altas temperaturas y alta humedad. En los últimos años el recurso hídrico se ha visto limitado, por lo tanto, crear un microclima artificial controlado favorece el crecimiento de los cultivos. Los microclimas artificiales controlados son sistemas que se encuentran aislados del medio ambiente que los rodea con el objetivo de mejorar la calidad de los cultivos [1]. En estos sistemas interactúan variables físicas que pueden ser controladas, como la temperatura, humedad de ambiente y humedad en el suelo [2].

El control de humedad de suelo para el riego en la producción de alimentos es una de las funciones más importantes dentro de un invernadero, sin embargo, esta puede ser afectada por otras variables como la temperatura y humedad del ambiente [3]. Los sistemas de control son una herramienta útil para manipular las variables físicas dentro de un microclima artificial. Para esto, existen métodos de control como el ON-OFF con histéresis y el proporcional-integral-derivativo (PID) [4]. Estos se pueden implementar por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual permite realizar aplicaciones de tipo industrial con control de variables [5].

Existen investigaciones relacionadas con los sistemas de control de riego como se muestra en [6], donde se menciona que el riego agrícola adquiere mayor relevancia cuando su programación es la correcta, pasar de un riego manual, como el método de inundación, a uno por

control de lazo cerrado, puede ahorrar agua hasta un 50 %. [7] En este otro, se menciona la implementación de riegos con control de lazo cerrado pudiendo alcanzar hasta un 73% de ahorro.

En [8] se muestran distintos sistemas de enfriamiento como lo son la ventilación, enfriamiento por evaporación y enfriamiento por desecación y distintos sistemas de control de humidificación, como son la humidificación mediante la adición de agua por microgotas y el método de deshumidificación por bombeo de aire caliente.

Por otra parte, en [9] se presenta la simulación de un controlador PID en un invernadero inteligente con MATLAB Simulink, donde se obtiene un comportamiento oscilatorio en temperatura y humedad. En [10] se diseña un sistema de control por redes neuronales para temperatura y humedad en un invernadero en invierno.

En este trabajo se diseña e implementa un sistema de control para las variables de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. En el punto II de este trabajo se describe la planta de pruebas del invernadero. En el punto III se presenta la implementación de los sistemas de control de variables. En el punto IV los resultados y discusión del análisis del comportamiento de las variables y en el punto V las conclusiones de la investigación.

## Fundamentación Teórica

### PLANTA DE PRUEBAS

Las dimensiones del invernadero escala laboratorio de tipo micro túnel son: 2 metros de ancho, 3 metros de largo, 3 metros de alto y con un techo de forma cilíndrica de un metro de radio. La estructura del invernadero está construida con perfil tubular cuadrado de acero galvanizado. Para cubrir la estructura base se utilizó un plástico de polietileno color lechoso con un porcentaje de sombra de 25 % (Figura 1). En el interior se colocaron 9 contenedores con 60 L de sustrato orgánico para hortalizas. Los componentes eléctricos y electrónicos del invernadero se dividen en tres sistemas para controlar las variables de temperatura interna, humedad relativa interna y humedad de suelo.



Figura 1. Invernadero hidropónico escala laboratorio.

## A. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

### 1. Sistema de humedad.

El sistema de humidificación se encarga de aumentar la humedad interna dentro del invernadero. Está compuesto por dos actuadores: un humidificador ultrasónico, el cual se encuentra en el interior de un tanque de agua para generar vapor y un ventilador que extrae el vapor generado dentro del tanque de agua, a través una tubería para introducirlo al interior del invernadero, como se muestra en la Figura 2.

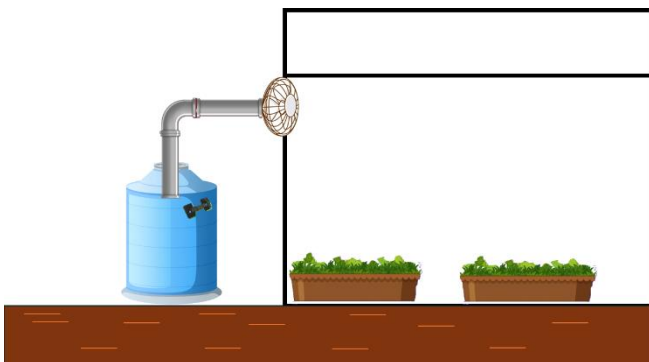


Figura 2. Sistema de humidificación.

Marco A. Beltrán, et. al., Implementación de un sistema de control de variables físicas en un invernadero escala laboratorio

### 2. Sistema de temperatura.

El sistema de temperatura tiene el objetivo de modificar la temperatura interna del invernadero en dos sentidos: enfriamiento y calentamiento. La modificación de la temperatura interna del invernadero depende de un intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado que se encuentra en el interior del invernadero. Este intercambiador de calor está conformado por un par de ventiladores que generan un flujo de aire que circula a través de un radiador. Dentro del radiador se tiene un flujo agua fría o caliente para enfriar o calentar el sistema, en donde cada una de estas provienen de dos sistemas de almacenamiento diferentes. Ambos tanques de agua se encuentran ubicados fuera del invernadero, en donde el agua es transportada por tuberías que se encuentran por debajo del suelo. El tanque de calentamiento se encuentra a la salida del radiador, después se tiene un calentador solar para calentar el agua. Para circular el agua de los subsistemas se utilizan motobombas. Al final de cada subsistema se encuentran instaladas dos válvulas que evitan que el agua de estos se mezcle y de igual forma un par de válvulas después del radiador, las cuales permiten que el agua regrese al subsistema correcto como se observa en la Figura 3.

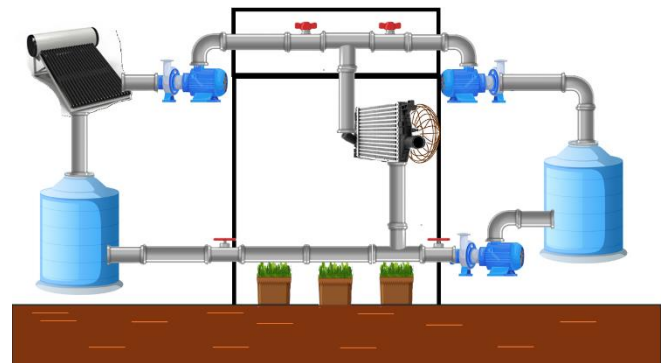


Figura 3. Sistema de temperatura.

### 3. Sistema de riego

La finalidad del sistema de riego es mantener la humedad del suelo adecuada para el desarrollo del cultivo en el interior del invernadero. En la Figura 4 se muestra que el sistema de riego se compone de un tanque de almacenamiento de agua, dos actuadores: una electroválvula y una bomba, un sensor de humedad de suelo y un sistema de micro mangueras y goteros que distribuyen el agua en las nueve macetas utilizadas. Se colocó el sensor de humedad en la maceta más lejana a la salida de la bomba como en la Figura 4 (a) para que el agua residual de la micro manguera fuera captada por el sensor.

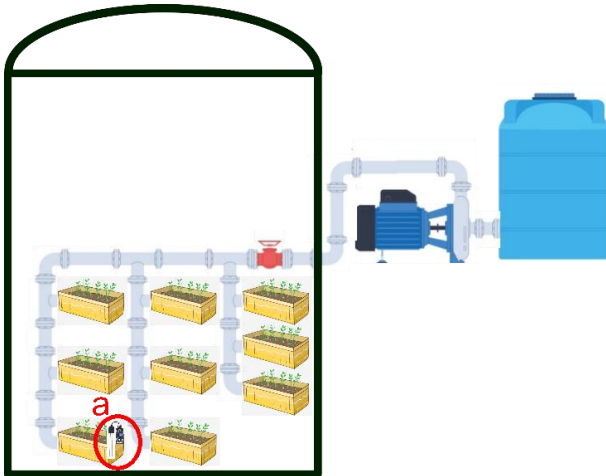


Figura 4. Sistema de riego.

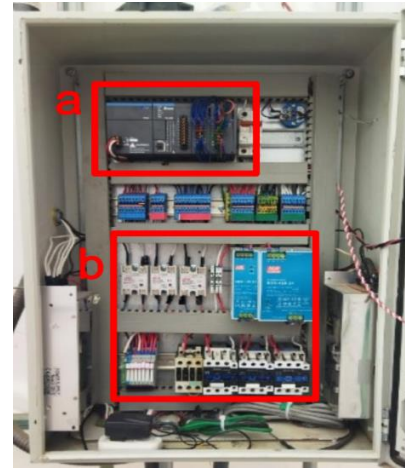


Figura 5. Gabinete eléctrico.

## B. COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema eléctrico está compuesto por una variedad de componentes que se observan en la Figura 5 y se enlistan en la Tabla 1. En el punto (a) del gabinete electrónico se encuentran los componentes de control y en el punto (b) los de potencia, mientras que en el exterior del gabinete tanto dentro como fuera del invernadero se ubican los sensores y actuadores del sistema.

Tabla 1. Componentes eléctricos.

Cantidad	Componente	Descripción
1	AS228T-A	PLC de la marca <i>Delta electronics</i> .
3	Electroválvulas 12v	Actuades en sistemas de riego y temperatura, protección antirretorno.
1	THD-DD2-C	Sensor de humedad relativa ambiental y temperatura.
1	Transmisor 4-20mA	Conversión de señal resistiva a señal de corriente.
1	HD-38	Sensor de humedad de suelo resistivo.
1	RTD PT100	Sensor para temperatura externa.
3	Ventiladores 12v	Actuadores principales en los sistemas de humedad y temperatura.
1	Humidificador ultrasónico	Actuador que genera la humedad que se introduce al invernadero.
4	BA-1208HD	Bombas para sistemas de riego y temperatura.

## IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL

### A. CONTROL DE TEMPERATURA

La temperatura es una de las variables físicas a controlar en el invernadero. Para controlar esta variable se realiza el análisis del sistema en lazo cerrado en la Figura 6. El controlador que se utiliza es el PLC AS228T-A de la marca *Delta electronics*, el actuador del sistema es un intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado y el sensor es el THD-DD2-C para el monitoreo de la temperatura como retroalimentación del sistema. Para la implementación del control de temperatura se utiliza el algoritmo PID, Ecs. (1) [11].

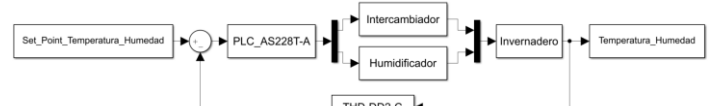


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura y humedad.

$$M = K_p \cdot \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (1)$$

En donde:

$M$  = Salida del controlador.

$K_p$  = Ganancia proporcional.

$e$  = Error

$T_i$  = Tiempo integrativo

$T_d$  = Tiempo derivativo

Se definen las ganancias para el funcionamiento del control PID, este algoritmo utiliza la temperatura leída y escalada para calcular una salida que compense el error existente, además, al mismo tiempo con dicha salida se genera un pulso PWM con el cual se varía la velocidad

de los ventiladores del intercambiador de calor. La lógica de funcionamiento del sistema de control de temperatura se muestra en la Figura 7. La sintonización de las ganancias del controlador PID del enfriamiento, calentamiento y humidificación se realiza con los siguientes pasos [12]:

1. Ajuste de  $K_p$  (Ganancia Proporcional)
  - Realizar 4 pruebas con  $K_p = 5, 10, 20, 40$  ( $K_i = 0, K_d = 0$ ).
  - Seleccionar el valor de  $K_p$  que permita a la variable llegar al *Set Point* rápido, con el menor sobre impulso.
2. Ajuste de  $K_i$  (Ganancia Integral)
  - Fijar  $K_p$  al valor definido del paso 1.
  - Realizar 4 pruebas con  $K_i = 1, 2, 4, 8$  ( $K_d = 0$ ).
  - Elegir el  $K_i$  que minimice el error en estado estacionario sin degradar la estabilidad.
3. Ajuste de  $K_d$  (Ganancia Derivativa)
  - Fijar  $K_p$  y  $K_i$  a los valores definidos en los pasos 1 y 2.
  - Realizar 4 pruebas con  $K_d = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$ .
  - Seleccionar el  $K_d$  que reduzca oscilaciones y mejore el amortiguamiento.

Dicha sintonización se realiza conforme a la guía de usuario del PLC [13] donde se indica una sintonización manual bajo los parámetros que se consideran en los pasos anteriores.

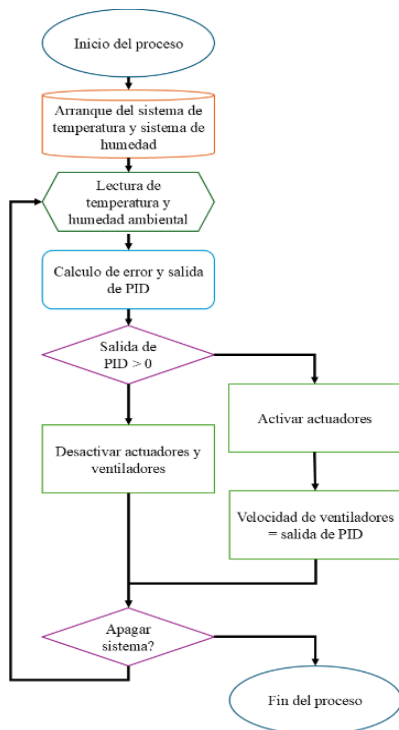


Figura 7. Diagrama de flujo del sistema de temperatura y humedad.

## B. CONTROL DE HUMEDAD

El sistema de control de humedad también tiene una estructura de un sistema en lazo cerrado como se observa en la Figura 6. Se implementa el control en el mismo PLC que lleva a cabo los cálculos relacionados al error y la salida, donde se utiliza como actuador un humidificador ultrasónico. Como retroalimentación al sistema de control de humedad se utiliza el sensor THD-DD2-C. Para este se realiza un control continuo con base al algoritmo PID de la Ec. (1).

El código del sistema de humidificación requiere que se defina un valor deseado para comenzar a funcionar. Con el sistema encendido solo es necesario configurar las ganancias del controlador PID para que este empiece a trabajar. La lectura del sensor de humedad THD-DD2-C se lleva a cabo de forma automática desde el módulo de expansión del PLC para ser enviada a un registro y posteriormente ser escalada a valores interpretables por el algoritmo de control. Cuando la salida del algoritmo PID es mayor a 0 los actuadores del sistema se activan y la velocidad del ventilador varía en base a la salida del PID calculado. La sintonización del control PID del sistema de humidificación siguió la misma metodología utilizada para subsistema de enfriamiento y calentamiento.

## C. CONTROL DE RIEGO

El control de riego se basa en un sistema de control en lazo cerrado. Se inicia al establecer el *Set Point* (valor deseado). Se implementa el control en el mismo PLC, que envía la señal de activación a los actuadores, en este caso una bomba centrífuga monofásica. Debido a que la humedad ambiente del invernadero afecta el control de la variable de humedad del suelo, se genera una perturbación que entra en una sumatoria como se muestra en la Figura 8. El sensor HD-38 mide la humedad del suelo y entra en una retroalimentación con el *Set Point*. A la salida tenemos la variable controlada, que es la humedad del suelo.

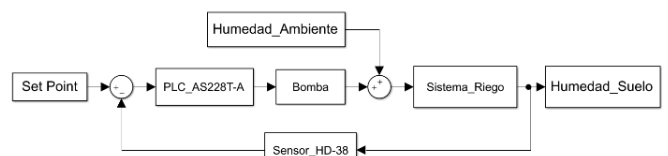


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema de humedad de suelo.

Además, se implementa un algoritmo de control *on-off* en donde se desarrolla la lógica de funcionamiento como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 9 [14]. Al iniciar el proceso se requiere seleccionar un *Set Point*, se toma la lectura del sensor y se comprueba si esta es menor al 60%. Esto se hace con el fin de tener un riego de emergencia

por baja humedad provocado por un paro prolongado del riego. A continuación, se seleccionan las histéresis superior e inferior: +7 y -2 respectivamente, y se hacen dos comprobaciones, una compara el valor actual con el límite superior establecido y la otra con el límite inferior. En caso de ser igual o menor al límite inferior, se activa el sistema de riego y en caso de ser mayor o igual al límite superior se detiene el sistema.

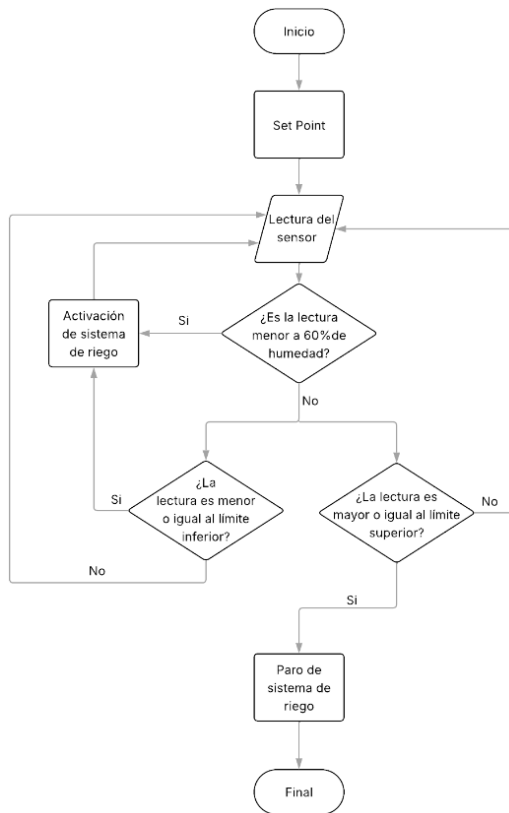


Figura 9. Diagrama de flujo del sistema de humedad de suelo.

## Resultados

### A. Control PID de temperatura y humedad

Uno de los patrones que se observan al analizar las gráficas de comportamiento de la temperatura interna del invernadero son los aumentos y disminuciones de temperatura de forma natural a lo largo del día, al tener una temperatura menor a 30 °C desde las 15:00 hasta las 21:00 horas y un aumento hasta más de 60 °C desde las 9:00 hasta las 15:00 horas en el interior del invernadero escala laboratorio. En el análisis de la humedad relativa se encontraron periodos de disminución y aumento de forma natural. Estas mediciones se realizan de manera simultánea a las de temperatura, en este caso aumentan durante la noche y disminuyen durante el día (Figura 10).

El valor deseado de temperatura es de 50 °C, el control de temperatura se lleva a cabo entre 10:00 y 14:00 horas cuando la temperatura se encuentra en un punto lo suficiente alto para que el sistema logre mantener un valor constante y en un periodo de tiempo considerable. En términos generales se puede observar en la Figura 10 (a), cómo el sistema oscila entre valores de 49 °C y 51 °C durante las horas más calientes del día. De igual forma se observa en la Figura 10 (b), que en el lapso de 9:00 hasta las 15:00 horas se activaba el control de humedad ambiental donde los valores se mantienen entre 20 % y 25 % de humedad relativa.

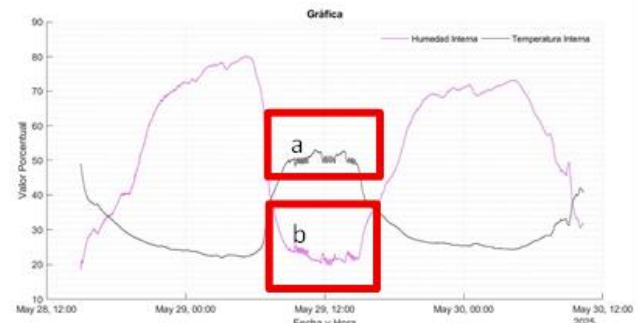


Figura 10. Gráfica de temperatura y humedad interna.

### B. Control On-Off de Humedad del Suelo

El comportamiento de humedad del suelo durante las primeras 24 horas se observa en la Figura 11. La lectura inicial de humedad del suelo es del 18 %, lo cual corresponde a un sustrato seco Figura 11 (a), el primer sobre impulso que se muestra en la Figura 11 (b) ocurre debido a la tensión superficial del agua, al entrar en contacto con el sustrato seco. Al romperse la tensión superficial, el agua humedece el sustrato conforme se drena y al encontrarse húmedo, el sobre impulso se ve disminuido en posteriores riegos Figura 11 (c). Se observa también que la activación del riego Figura 11 (d) sucede según lo programado en el algoritmo de control.

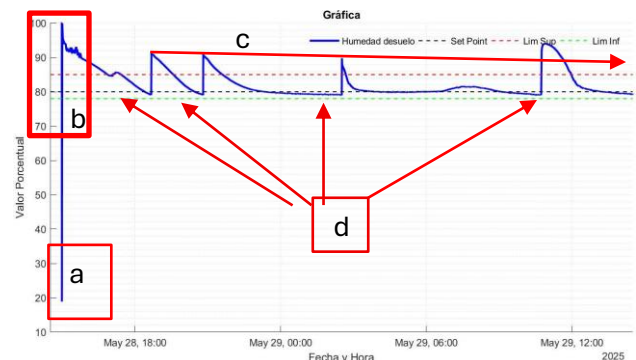


Figura 11. Gráfica de las primeras 24 horas de riego.

El comportamiento de la humedad de suelo durante 48 horas se muestra en la Figura 12. El patrón descendente en el sobre impulso de las activaciones de riego de la Figura 12 (a) se mantiene, lo que indica que el sustrato tiene un nivel de humedad homogéneo en la maceta y esto hace que la duración del riego sea menor, excepto en el punto de la Figura 12 (b). Se pueden observar ventanas de tiempo en la Figura 12 (c) donde la humedad desciende lentamente. Durante estas 48 horas se obtienen las mediciones promedio de la Tabla 2.

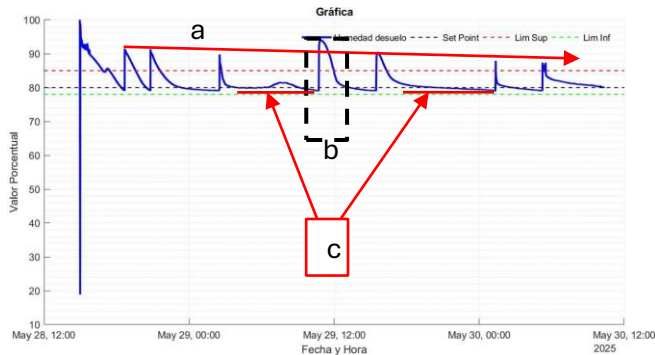


Figura 12. Gráfica de 48 horas de humedad de suelo.

Tabla 2. Humedad promedio diaria.

Día	% Humedad de suelo promedio
28 de mayo de 2025	84.67%
29 de mayo de 2025	81.09%
30 de mayo de 2025	80.64%

La disminución en la cantidad de veces que se riega durante los periodos de tiempo Figura 13 (a), corresponde con mediciones altas de humedad ambiental dentro del invernadero, por lo que se asume un nivel de drenado/evaporación alrededor de 50 % más bajo. Por otra parte, se observa el comportamiento normal de drenado/secado del sustrato en Figura 13 (c), sin embargo, en la Figura 13 (b) se observa una retención de humedad del 91 % por más tiempo.

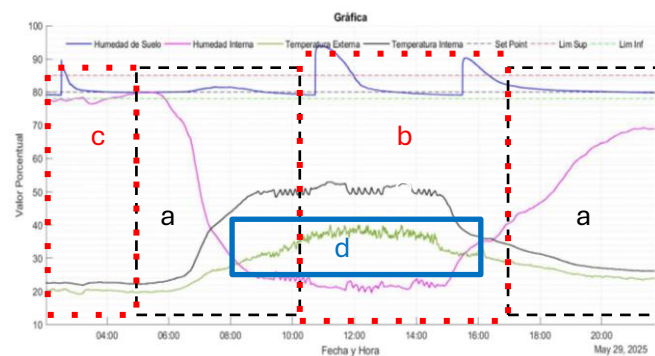


Figura 13. Gráfica de variaciones de humedad de suelo.

Estas crestas suceden durante un periodo de variación climática muy elevada (Figura 13 (d)) debido a la presencia de nubosidad y viento, por lo que se presenta una alta demanda energética de los actuadores del invernadero (Figura 13(b)) que puede afectar la lectura de los sensores.

Comparado con [6], el trabajar dentro de un invernadero de escala laboratorio, permitió que la humedad exterior no afectara de manera tan agresiva el nivel de humedad del sustrato, aunque, en ambos casos, fallas energéticas se hicieron presentes. Por otra parte, el riego por goteo permite canalizar el agua de riego directo al área de las raíces a comparación de [7] que utiliza el método de inundación de canales.

El método de control de temperatura que se utiliza en este invernadero escala laboratorio es de flujo cruzado no mezclado y el de humidificación, es la introducción de microgotas generadas por ultrasonido, lo que difiere de los métodos de control de variables descritos en [8], donde hay contacto directo de humedad y temperatura y comparado con la investigación [10], la implementación se hizo en un clima de altas temperaturas.

## Conclusiones

En este trabajo se cumple con el objetivo de implementar un sistema de control en un invernadero escala laboratorio regulando las variables de: temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Los resultados indican que la temperatura y humedad relativa se mantienen estables en un rango de 50 °C y 20 %, respectivamente, durante el intervalo de tiempo 9:00 a 15:00 horas. La humedad de suelo se mantiene en un valor superior al 78 % y se observa que el sobre impulso del 95 % que se obtiene en el primer riego, disminuye para acercarse a la histéresis propuesta. Además, se identifica cómo la humedad interna alta hace más lenta la evaporación y se reduce la frecuencia de riego.

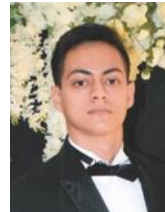
## Referencias

- [1] D. Ma, N. Carpenter, H. Maki y T. U. Rehman, «Greenhouse environment modeling and simulation for microclimate control,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 162, pp. 134-142, 2019.
- [2] A. Bhujel, J. K. Basak, F. Khan, E. Arulmozhi, M. Jaihuni, T. Sihalath, D. Lee, J. Park y H. T. Kim, «Sensor Systems for Greenhouse Microclimate Monitoring and Control: a Review,» *Journal of Biosystems Engineering*, vol. 45, pp. 341-361, 2020.

- [3] N. Georgios, N. Damianos, K. Nikolaos y K. Constantinos, «Irrigation of Greenhouse Crops,» *Horticulturae*, vol. 5, p. 7, Enero 2019.
- [4] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar y S. N. Pawar, «A review of PID control, tuning methods and applications,» *International Journal of Dynamics and Control*, 2020.
- [5] G. B. Cáceres, A. Ferramosca, P. Millán Gata y M. Pereira Martín, «Model Predictive Control Structures for Periodic ON-OFF Irrigation,» *IEEE Access*, p. 1, 2023.
- [6] C. Schugurensky y F. Capraro, «Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo».
- [7] R. Muñoz Carpena, B. H., W. Klassen, T. Dispenza y M. D. Dukes, «AUTOMATIC SOIL MOISTURE-BASED DRIP IRRIGATION,» de 2003, *Las Vegas, NV July 27-30*, St. Joseph, MI, 2003.
- [8] B. Rabbi, Z.-H. Chen y S. Sethuvenkatraman, «Protected Cropping in Warm Climates: A Review of,» *Energies*, p. 2737, Julio 2019.
- [9] G. Chaudhary, S. Kaur, B. mehta y R. Tewani, «Observer based fuzzy and PID controlled smart greenhouse,» *Journal of Statistics and Management Systems*, vol. 22, pp. 393-401, 2019.
- [10] A. Manonmani, T. Thyagarajan y S. Sutha, «ANN based modeling and control of GHS for winter climate,» *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, Enero 2017.
- [11] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010.
- [12] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Sistemas de control moderno*, Madrid: PEARSON EDUCATION, S. A., 2005.
- [13] Delta Electronics, Inc., «Chapter 6 Applied Instructions,» de *AS Series Programming Manual*, Taoyuan City, 2018, pp. 198-212.
- [14] G. Gong, R. Chiong, Q. Deng, W. Han, L. Zhang y D. Huang, «Energy-efficient production scheduling through

machine on/off control,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 104, pp. 104-359, 2021.

## Semblanza Autores



Marco Antonio Beltrán Sánchez, es estudiante de ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán. Actualmente colabora como alumno de residencias en el Laboratorio de mecatrónica y control en la división de estudios de posgrado e investigación en el tecnológico de Culiacán.



Johan Amadeus Soto Montoya, es estudiante de ingeniería eléctrica en el Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán. Actualmente colabora como alumno de residencias en el Laboratorio de Mecatrónica y Control de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.



Cesar Gerardo Parra, Ingeniero en Electrónica (2023) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.



Julio Cesar Picos Ponce, Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017).



Luis Enrique Barreto Salazar, es ingeniero electrónico con especialidad en automatización, Maestro en Ciencias de la Ingeniería en la especialidad de mecatrónica y control y Doctor en Ciencias de la Ingeniería en el área de instrumentación y control por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

# Mercado Eléctrico Mayorista en México (2013–2025): cambios regulatorios y la participación del Estado y privados en la transición hacia energías renovables.

## Wholesale Electricity Market in Mexico (2013–2025): Regulatory Changes and State and Private Sector Participation in the Transition to Renewable Energy

Jesús Daniel Paredes González, Eridani Segura Soto, Fátima Aspericueta Hernández, Carlos Ernesto Zatarain Rendón

\*Universidad Politécnica de Sinaloa, Programa Académico de Ingeniería en Energía 2022030211@upsin.edu.mx

### Resumen

Este artículo analiza la evolución del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en México desde su creación en 2014 como resultado de la Reforma Energética. Se examina el marco institucional que lo sustenta, el papel del CENACE en la operación del sistema y la participación privada en la generación eléctrica. El estudio destaca cómo las subastas de largo plazo y los contratos de cobertura promovieron la incorporación de energías renovables, principalmente solar y eólica, lo que favoreció la reducción de costos marginales y la diversificación de la matriz energética. También se identifican limitaciones relevantes: rezago en la expansión de la Red Nacional de Transmisión, concentración del mercado en determinados nodos y dependencia persistente de combustibles fósiles para garantizar confiabilidad. Asimismo, se señala que los cambios regulatorios y políticos a partir de 2018 disminuyeron la certidumbre del mercado, redujeron la confianza de inversionistas privados y ralentizaron la incorporación de nueva capacidad renovable. Se concluye que el MEM ha sido un mecanismo fundamental para modernizar el sector eléctrico mexicano y facilitar la transición energética, pero su continuidad depende de reglas claras, infraestructura de transmisión robusta y un equilibrio entre liderazgo estatal y participación privada. De lo contrario, México corre el riesgo de no alcanzar sus metas de generación limpia y comprometer los avances logrados en la última década.

**Palabras clave:** MEM, LIE, Energía, Transición, Renovables.

### Abstract

This review addresses the evolution of the Wholesale Electricity Market (MEM) in Mexico since its creation in 2014 as a result of the Energy Reform. It analyzes the institutional framework that supports it, the role of CENACE in system operation, and the role of private participation in electricity generation. The study highlights how long-term auctions and hedging contracts promoted the incorporation of renewable energies, mainly solar and wind, which contributed to reducing marginal costs and further diversifying the energy mix. The analysis also identifies important limitations: the lag in the expansion of the National Transmission Network, the concentration of the market in certain nodes, and the persistent dependence on fossil fuels to ensure supply reliability. It further notes that regulatory and political changes since 2018 have altered market certainty, reduced investor confidence, and slowed the integration of new renewable capacity. This research argues that the MEM has been a fundamental mechanism to modernize the Mexican electricity sector and facilitate the energy transition, but its continuity and effectiveness depend on maintaining clear rules, strengthening transmission infrastructure, and finding a balance between state leadership and private participation. Otherwise, Mexico risks failing to achieve its clean energy generation goals and undermining the progress made over the last decade.

**Keywords:** MEM, LIE, Energy, Transition, Renewables.

Recibido: 15/07/2025; Aceptado 06/08/2025; Publicado 25/08/2025

## Introducción

Antes de la Reforma Energética de 2013, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) comprendía tanto el servicio público —operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y productores independientes de energía (PIE)— como la energía no suministrada al servicio público (autoabasto, cogeneración, usos propios continuos, pequeña producción, importación y exportación). La cadena de valor incluía generación, transmisión en alta tensión, distribución en media y baja tensión, así como suministro a usuarios finales. Todo ello bajo una planeación centralizada por CFE y la Secretaría de Energía (SENER). Al cierre de 2011, la capacidad instalada mexicana total alcanzó 61,570 MW (–1.1 % vs. 2010). De esa cifra, 52,512 MW pertenecían al servicio público (incluida la capacidad PIE contratada por CFE) y 9,058 MW

a permisionarios (auto abasto, cogeneración, usos propios y exportación) [1].

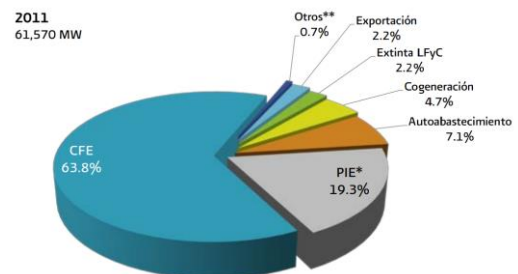


Figura 1. Capacidad efectiva instalada nacional [1].

\*\* Incluye usos propios y pequeña producción.

Por agente, la CFE aportó 63.8 % de la capacidad nacional; la extinta Luz y Fuerza del Centro (LyFC) 2.2 %; los PIE, 19.3 %; y los

permisionarios privados (auto abasto, cogeneración, exportación), 14.0 % [1]. En este sentido, es evidente que antes de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), solo existía participación privada relevante en generación bajo esquemas regulados (PIE/permisionarios), mientras la red permanecía en la órbita estatal, Figura 1, [1].

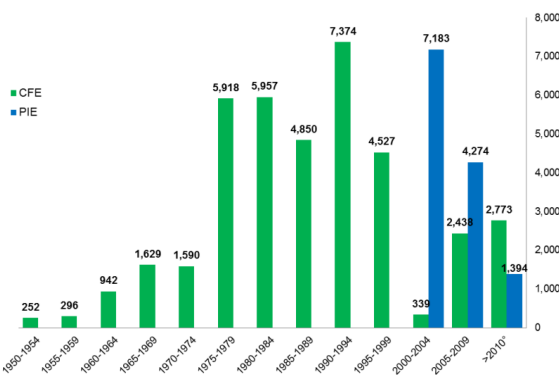
Tabla 1. Capacidad efectiva del servicio público por tipo de central, 2000-2011 [1].

Año	No fósiles				Fósiles						Total
	Hidro-eléctrica	Geotermo-eléctrica	Eolo-eléctrica	Nuclear	Carbón	Termo-eléctrica convencional	Ciclo combinado <sup>1</sup>	Turbogás	Combustión interna	Dual	
2000	9,619	855	2	1,365	2,600	14,283	3,398	2,360	116	2,100	36,697
2001	9,619	838	2	1,365	2,600	14,283	5,188	2,381	143	2,100	38,519
2002	9,608	843	2	1,365	2,600	14,283	7,343	2,890	144	2,100	41,177
2003	9,608	960	2	1,365	2,600	14,283	10,604	2,890	143	2,100	44,554
2004	10,530	960	2	1,365	2,600	13,983	12,041	2,818	153	2,100	46,552
2005	10,536	960	2	1,365	2,600	12,935	13,256	2,599	182	2,100	46,534
2006	10,566	960	2	1,365	2,600	12,895	15,590	2,509	182	2,100	48,769
2007	11,343	960	85	1,365	2,600	12,865	16,873	2,620	217	2,100	51,029
2008	11,343	965	85	1,365	2,600	12,865	16,913	2,653	216	2,100	51,105
2009	11,383	965	85	1,365	2,600	12,895	17,572	2,505	216	2,100	51,686
2010	11,503	965	85	1,365	3,278	12,876	18,022	2,537	214	2,100	52,945
2011	11,499	887	87	1,365	3,278	12,560	18,029	2,495	211	2,100	52,512
Participación	21.9%	1.7%	0.2%	2.6%	6.2%	23.9%	34.3%	4.8%	0.4%	4.0%	100.0%

<sup>1</sup> Incluye los Productores Independientes de Energía

En 2011, la capacidad instalada total alcanzó 61,570 MW: 52,512 MW en el servicio público (incluyendo PIE) y 9,058 MW en permisionarios privados. La CFE aportaba 63.8% de la capacidad nacional; LyFC, 2.2%; los PIE, 19.3%; y otros permisionarios privados, 14%. La matriz energética dependía en 73.6% de combustibles fósiles, mientras que solo 26.4% provenía de fuentes no fósiles. Predominaban los ciclos combinados y termoeléctricas convencionales, mientras que renovables no convencionales eran incipientes, como se muestra en la Tabla 1, [1].

En términos de adición de capacidad al sector eléctrico, Figura 2, [2], es clara la tendencia de los PIE y CFE a la cada vez menos adición de capacidad efectiva nacional.



<sup>1</sup> En el periodo 2010-2014 CFE adicionó 5,637 MW de nueva capacidad, pero retiró 2,865 MW, dando como resultado un incremento neto de 2,773 MW.

Figura 2. Adiciones de capacidad efectiva de CFE y PIE (MW) [2].

Este artículo busca analizar el impacto del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y la participación estatal y privada en la generación de energía en México, con énfasis en el desarrollo de energías renovables de 2013 a 2025. Se revisan la evolución del marco

regulatorio, las reformas recientes y sus efectos sobre inversión privada y proyectos renovables, así como los desafíos técnicos, económicos, regulatorios y sociales para la transición energética.

### Fundamentación Teórica

Para comprender el análisis del MEM y la participación del Estado y los privados en la generación de energía eléctrica en México, es fundamental establecer un marco teórico que abarque los siguientes aspectos:

#### Ley de la Industria Eléctrica (2013)

La LIE, promulgada en 2014, transformó el sector eléctrico al separar actividades en segmentos competitivos (generación y suministro) y monopólicos (transmisión y distribución), modificando los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución [3].

Dichos cambios introdujeron la figura de empresas productivas del Estado, otorgaron al gobierno la facultad de celebrar contratos con particulares y excluyeron de las áreas estratégicas a la generación y comercialización de electricidad, reservando al Estado únicamente la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), así como el servicio público de transmisión y distribución [4]. De este modo, la LIE reestructuró un sector hasta entonces verticalmente integrado en manos de la CFE, estableciendo un modelo híbrido en el que la generación y el suministro se abrieron a la competencia privada, mientras que las redes continuaron bajo monopolio estatal [3].

La lógica de esta apertura descansaba en separar las actividades de la industria eléctrica en segmentos competitivos y segmentos monopólicos. Mientras la generación podía realizarse por CFE o por agentes privados mediante permisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), las actividades de transmisión y distribución se mantuvieron como funciones exclusivas del Estado. En paralelo, la comercialización también se liberalizó, creando nuevas figuras como los suministradores calificados y comercializadores no suministradores. Con ello, la CFE pasó de ser un monopolio estatal a una empresa productiva del Estado, capaz de competir en generación y suministro, pero manteniendo la obligación de garantizar la operación de la red [5].

Para hacer viable este esquema, la LIE fortaleció las funciones de distintos organismos. La SENER quedó a cargo de la planeación del sistema a través del PRODESEN y del diseño de políticas para fomentar la transición hacia energías limpias [6]. El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) fue creado como operador

independiente del SEN y del nuevo MEM, encargado del despacho económico en orden de mérito de costos, de la administración de congestiones y de la provisión de servicios conexos [7]. La CRE, por su parte, adquirió un papel central en la regulación técnica y económica: expidió permisos, estableció metodologías tarifarias y supervisó el cumplimiento de los códigos de red, además de administrar los Certificados de Energías Limpias (CEL) [8].

MEM, que comenzó a operar en 2016, se convirtió en el espacio donde generadores, suministradores y usuarios calificados transan energía, potencia, servicios conexos y CEL. Este mercado se diseñó en tres capas: un mercado de corto plazo administrado por CENACE, contratos de cobertura eléctrica y subastas de largo plazo para incentivar inversiones en capacidad nueva y renovable [7]. El despacho bajo la LIE debía realizarse por mérito económico, garantizando el mínimo costo de operación compatible con la seguridad del sistema, integrando además señales para el desarrollo de proyectos de energías limpias [3].

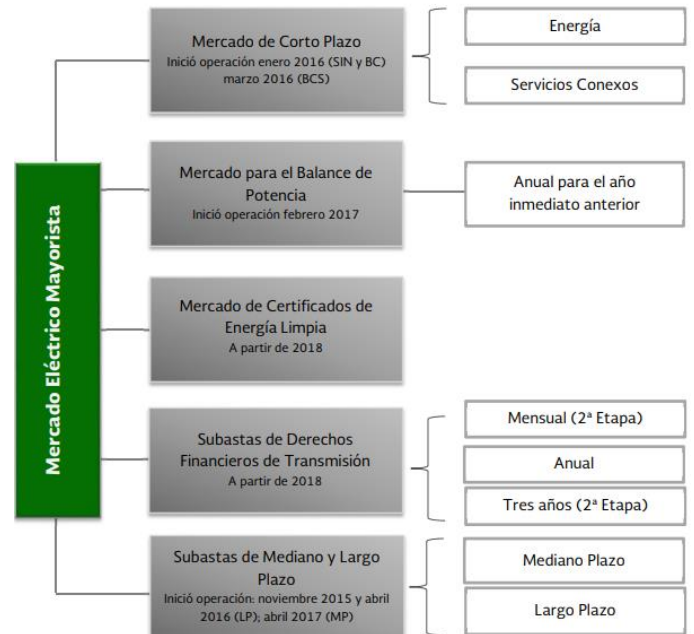
En términos la opinión política y regulatoria, en base al nuevo marco legal buscó atraer inversión privada en generación y modernizar el parque eléctrico mexicano. La LIE abrió la puerta a la inversión privada en generación bajo un esquema de competencia supervisada, pero conservó la planeación y la red bajo control estatal. Su éxito dependió de la fortaleza institucional de CENACE y CRE para asegurar condiciones de competencia efectiva. Así, la LIE representó un cambio estructural profundo: de un esquema centralizado y estatal hacia un sistema mixto, donde el Estado conserva el control de la red y de la planeación, pero abre la puerta a la competencia privada en generación y suministro como motores de modernización y diversificación tecnológica.

### **Mercado Eléctrico Mayorista**

De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica, el MEM es el mercado operado por el CENACE en el que los Participantes del Mercado pueden realizar transacciones de compraventa de energía eléctrica, Servicios Conexos, Potencia, Derechos Financieros de Transmisión, Certificados de Energías Limpias o cualquier otro producto que se requiera para el funcionamiento eficiente del Sistema Eléctrico Nacional [1], como se muestra en la Figura 3.

### **Implicaciones de la LIE**

Tras la reforma constitucional de 2013 y la promulgación de la LIE en 2014, el despacho de energía en México dejó de ser un procedimiento interno de la CFE para convertirse en un despacho económico nodal operado por el CENACE dentro del MEM.



Fuente: Elaborado por SENER, con información del Centro Nacional de Control de Energía.

Figura 3. Estructura del Mercado Eléctrico Mayorista.

Este cambio se instrumentó mediante las Bases del Mercado Eléctrico (DOF, 2015) y manuales técnicos como el Manual del Mercado de Energía de Corto Plazo (DOF, 2016), que definieron la programación de unidades (compromiso) y el despacho económico (asignación de producción) bajo criterios de mínimo costo total, sujetos a restricciones de red y de confiabilidad. En este sistema, el Precio Marginal Local (PML) refleja el costo de la última unidad despachada en cada nodo, incluyendo pérdidas y congestión, y constituye la principal señal de inversión y operación [9] - [11].

#### 1. Cambio del Despacho Eléctrico del SEN

La secuencia de despacho se organiza en dos fases. Primero, el compromiso de unidades (SCUC) determina qué centrales deben estar disponibles considerando arranques, rampas y reservas. Después, el despacho económico (SCED) asigna producción con base en las ofertas de precio de los generadores y las condiciones de la red. Este modelo permitió a tecnologías de bajo costo marginal, como la eólica e hidráulica, ser despachadas primero, desplazando a unidades fósiles más costosas. El diseño se completó con reglas para servicios conexos (regulación, reserva) y la publicación de manuales específicos por parte de SENER y CENACE [2] y [7].

Antes de la entrada en vigor de la LIE y el MEM, en 2012 el sector eléctrico mexicano tuvo precios muy elevados reflejados en cada sector, Figura 4, comparados con el año 2015, tan solo 1 año después de la

implementación del MEM y los cambios en la priorización del despacho eléctrico, Figura 5.

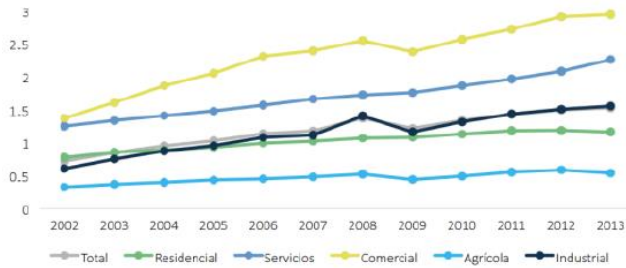


Figura 4. Precios medios de energía eléctrica por sector tarifario (pesos/kWh) [12]

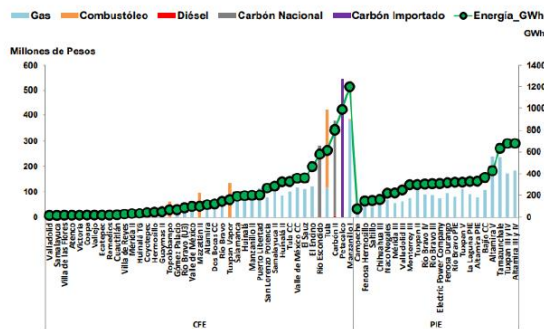


Figura 5. Costo total de energía por planta y energía despachada en 2015.

Las implicaciones de este modelo fueron significativas. En lo económico, el despacho por mérito redujo costos de operación y generó precios transparentes, pero también expuso a los agentes a la volatilidad del mercado, lo que dio origen a mecanismos de contratos de cobertura y subastas de largo plazo documentadas en el PRODESEN 2018 [13]. En lo tecnológico y ambiental, permitió una mayor integración de renovables: las centrales limpias con costos bajos entraban primero al despacho, favoreciendo la transición energética. En lo institucional, el éxito del despacho dependió de la capacidad del CENACE para operar el MEM y de la CRE para regular tarifas, acceso a red y calidad de servicio, mientras que la SENER mantuvo la planeación estratégica mediante el PRODESEN [13]. Asimismo, las implicaciones del despacho eléctrico, como se esperaba, generaron algunas consecuencias económicas en el país, mismo que se vio reflejado en el PIB mexicano, según la SENER en su Balance de Energía Nacional del 2018 es utilizado el Índice de Intensidad Energética Nacional (energía necesaria para producir un peso mexicano de PIB que es influenciado por el desarrollo económico positivo de un país o con su reducción energética de producción) y muestra que en 2018 la Intensidad energética ronda los 500 kJ/\$, el equivalente a 138.9 Wh/\$, Figura 6.

Jesús D. Paredes G., et al., Mercado Eléctrico Mayorista en México (2013–2025): cambios regulatorios y la participación del Estado y privados en la transición hacia energías renovables.

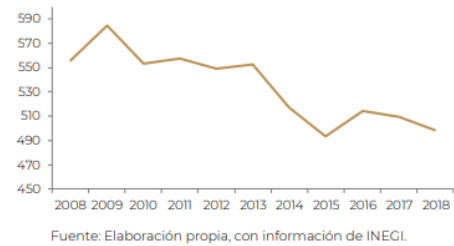


Figura 6. Intensidad Energética Nacional (kJ/\$) 2008-2018 [13].

2. Ampliación de la generación de energía limpia  
El año 2011, anterior a la LIE la generación bruta del servicio público ascendía a 259.2 TWh anuales con una participación de energía limpia del 20.8% (13.8% de generación hidroeléctrica y un 7% conformado por nucleoelectrónica, geotérmica y eoloelectrónica).

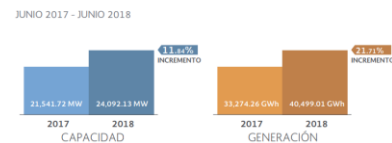
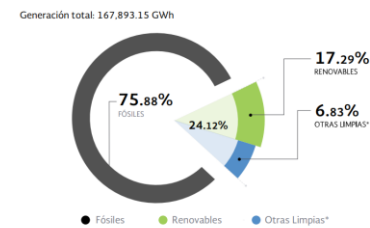


Figura 7. Intensidad Energética [14].

De la Figura 7, el 6.83 % procede de generación renovable como la biomasa, solar, y eólica, mientras que ‘otras limpias’, según el reporte de avance de energías limpias 2018, refiere a nuclear, cogeneración eficiente, frenado regenerativo y licor negro [14], donde se expresa el aumento porcentual de 11% en capacidad instalada limpia en el 2018 respecto al 2017.

### 3. Beneficios hacia la transición energética

La Ley de la Industria Eléctrica [3] abrió la generación y comercialización a la participación privada bajo el MEM, mientras conservó en la órbita pública (CFE) la transmisión y la distribución como áreas estratégicas; esta arquitectura regulatoria fue el andamiaje para los instrumentos de política de transición que llegaron en 2015 con la Ley de Transición Energética (LTE) [15]. La LTE fijó metas vinculantes de participación mínima de energías limpias en la generación eléctrica nacional de 25% para 2018, 30% para 2021 y 35% para 2024 (artículo tercero transitorio), y mandató el uso de CEL's

como instrumento principal de cumplimiento, integrando además en la evaluación sectorial las externalidades ambientales y de salud (art. 1, fracc. II–III) [15]. En paralelo, la SENER y la CRE emitieron en 2014 los Lineamientos para el otorgamiento y adquisición de CEL que definieron qué se considera “central eléctrica limpia” y las reglas del sistema de gestión y disposiciones operativas subsecuentes para dar certidumbre a los participantes del MEM.

Bajo la LTE, “energías limpias” abarcan no solo renovables (eólica, solar, hidro, geotermia, biomasa), sino también nuclear, cogeneración eficiente y otras tecnologías que reduzcan emisiones, categoría más amplia que “energías renovables” estrictas; esta distinción es crucial para evaluar metas y resultados, así como el papel de los CEL [15]. Con estos marcos, SENER, CRE y CENACE produjeron reportes anuales y de planeación (PRODESEN) para monitorear el avance. Por ejemplo, el Reporte de Avance de Energías Limpias (RAEL) documenta la evolución por tecnología y la aportación de la generación distribuida fotovoltaica y del abasto aislado al cómputo de generación limpia, alineado con las definiciones de LTE y contabilidad oficial de Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG).

En el plano institucional y de mercado, la implementación del esquema de CEL con sus obligaciones crecientes y mecanismos de diferimiento/liquidación activó señales económicas para nueva capacidad limpia y permitió monitorear el cumplimiento de los centros de carga; tanto la CRE como COFECE han analizado el desempeño competitivo del mercado de CEL y las obligaciones asociadas 2018–2024 [16][17]. El Balance Nacional de Energía (BNE), elaborado por SENER con soporte del INEGI, respalda las cifras de participación limpia en la matriz de generación y ofrece la serie histórica con metodología oficial de información de interés nacional, útil para evaluar la convergencia (o desviación) respecto de las metas de la LTE [16].

El hito normativo fue la reforma a la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) publicada el 9 de marzo de 2021 (en vigor el 10 de marzo). Entre otros puntos, la reforma introdujo la figura de “Contratos de Cobertura Eléctrica con Compromiso de Entrega Física” exclusivos para el Suministro Básico, y ordenó al CENACE despachar con prioridad la energía comprometida físicamente y la de centrales legadas, modificando en la práctica el criterio económico de menor costo que operaba bajo el diseño original del MEM. También flexibilizó la obligación de los Suministradores de Servicios Básicos de acudir a subastas de largo plazo, y estableció prioridad de uso de redes para centrales legadas con compromiso de entrega física. Estas disposiciones pueden verificarse en el decreto del DOF, en la compilación vigente de

la LIE de la Cámara de Diputados y en los dictámenes legislativos respectivos. [18]–[21]

En paralelo, el Ejecutivo y la SENER reorientaron instrumentos de política: se cancelaron las Subastas de Largo Plazo que habían viabilizado nueva capacidad renovable entre 2016–2018; CENACE confirmó la cancelación de la “Cuarta Subasta” a inicios de 2019, cerrando ese canal de contratación competitiva. Diversas notas oficiales y periodísticas especializadas documentan ese punto [22].

#### 4. Reformas recientes y re-centralización (2024–2025)

En octubre de 2024, México aprobó una reforma constitucional que modificó de manera significativa la organización del sector energético. A partir de esta reforma, Pemex y la CFE recuperaron su carácter de empresas públicas del Estado, dejando atrás la figura de “empresas productivas del Estado” establecida en 2013. Este cambio no fue únicamente semántico, sino estructural: mientras que antes operaban bajo un enfoque de rentabilidad y generación de valor económico, ahora su función principal es garantizar servicios estratégicos y seguridad energética para la población [19].

*Tabla 2. Mecanismos legales que fortalecen la posición de la CFE [22],[23].*

Mecanismo	Qué hace	Efecto práctico
Contratos de producción a largo plazo (venta exclusiva a CFE)	Generadores privados venden exclusivamente a CFE; CFE los representa en MEM.	Energía “privada” contabilizada operativamente como parte del portafolio que CFE administra; disminuye energía libre en spot.
Inversión mixta con $\geq 54\%$ CFE	Los proyectos de coconversión deben dar mayoría a CFE y derecho de preferencia.	Nuevas plantas quedan formalmente controladas por CFE; Potencia sobre oferta y despacho
Reserva de transmisión / distribución para CFE	Sólo CFE puede operar T&D; privados solo como contratistas.	Control de la “autopista” eléctrica y de decisiones de acceso / interconexión.
Criterios de confiabilidad en despacho	CNE puede imponer requisitos que condicionen despacho (respaldo, servicios conexos).	Las renovables intermitentes pueden enfrentar costos y requisitos que las hagan menos competitivas.
Mandato de “prevalencia” (54% estatal)	Meta legal de participación mínima estatal en la energía inyectada.	Marco que legitima mecanismos contractuales y regulatorios para alcanzarla.

*Fuente: Elaboración propia elaborado en Project Finance.*

Uno de los elementos centrales de esta reforma es la regla del 54 % vs. 46 %, que establece que la CFE debe generar al menos el 54 % de la electricidad inyectada a la red, mientras que el sector privado puede participar hasta en un 46 %, Tabla 2. Esta participación de la CFE

incluye tanto su propia generación como proyectos mixtos donde tenga participación mayoritaria y contratos a largo plazo bajo su representación en el Mercado Eléctrico Mayorista [20].

El diseño contempla varios mecanismos para garantizar este esquema, los cuales se muestran a continuación [22]:

- Contratos de largo plazo en los que productores privados venden exclusivamente a la CFE.
- Proyectos mixtos con participación mayoritaria estatal (mínimo 54 %), junto con derechos preferentes de compra para la CFE.
- La representación por parte de la CFE de ciertos parques privados en el Mercado Eléctrico Mayorista, consolidando así su control sobre la generación.

Según las refutaciones dadas por los defensores de la reforma el nuevo esquema fortalece la soberanía energética, reduce la dependencia de corporativos privados nacionales o extranjeros, protege tarifas sociales y permite al Estado planear de forma más coordinada la transición energética y la inversión en infraestructura. En contraste, los críticos advierten riesgos de menor competitividad, incertidumbre jurídica para contratos privados ya firmados, posibles ineficiencias en la operación de la CFE y afectaciones en costos para la industria y los usuarios [20].

En marzo de 2025 México publica la nueva Ley del Sector Eléctrico (LESE) dentro de un paquete de leyes que reconfiguran la arquitectura del sector: la CFE es ahora una empresa pública del Estado con un régimen especial y el Estado establece reglas explícitas para conservar “la prevalencia” en generación eléctrica [21]. Aunque la LESE mantiene la existencia del MEM y del operador CENACE, introduce mecanismos operativos y contractuales que, en conjunto, aumentan la influencia efectiva de la CFE sobre el despacho y la comercialización de la energía [22].

¿Qué dice la ley?

Dos ideas se repiten en la LESE y en las leyes conexas:

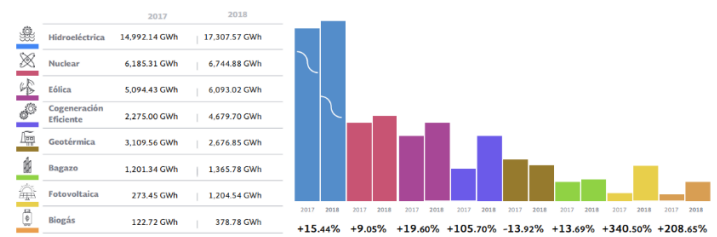
- (1) La CFE debe procurar “la justicia energética” y asegurar el suministro al menor precio posible como empresa pública del Estado;
- (2) El Estado exige que al menos el 54% del promedio anual de la energía inyectada a la red provenga del Estado.

Al mismo tiempo se preserva el CENACE como encargado del control operativo y del despacho, y la ley contiene principios de transparencia y de mercado, Tabla 2 [23].

## Resultados

En resultados ambientales, la participación de generación “limpia” (definida en la Ley de Transición Energética) se estancó por debajo de la meta de 35% para 2024. El Reporte de Avance de Energías Limpias (RAEL) de SENER y anejos estadísticos del PRODESEN 2024–2038 ubican la participación de limpias nacionales en torno a una cuarta parte del total en 2022–2023, lejos de la trayectoria meta, en un contexto de menor expansión renovable nueva al cancelarse subastas y ante mayor peso térmico por gas [24].

Debidos a los cambios hechos en este gobierno que priorizó la participación estatal en el despacho de energía, la inversión, construcción y generación de energía con fuentes limpias desaceleró notablemente, pudiendo ser vista en los RAEL, Figura 8 y 9.



Durante el primer semestre 2018 se alcanzó una generación 21.71 % mayor que en el primer semestre de 2017. Este incremento se debió principalmente a un crecimiento muy importante, que va del 9 % al 340 %, en todas las tecnologías excepto en la geotermia.

Figura 8. Evolución de energías limpias en 2017-2018 [13].

El Informe de Tecnología de Generación de Referencia de CENACE refuerza que, entre 2018 y 2021, más de 70% de la generación del SEN provino de tecnologías térmicas (principalmente gas), condicionando las emisiones del sector [25].

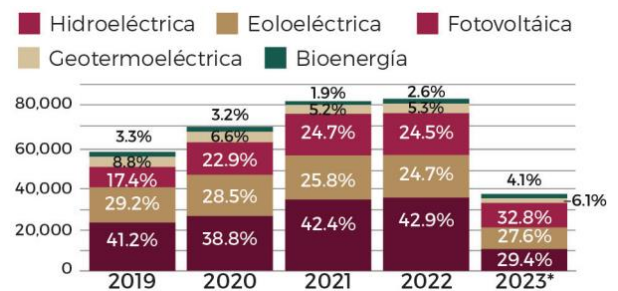


Figura 9. Evolución de energías limpia en 2019-2023 [26].

IMCO y análisis técnicos advirtieron que la prelación a centrales legadas y la preferencia por contratos con entrega física reducen la presión competitiva en el MEM, encarecen el costo esperado de abastecimiento de Suministro Básico e introducen riesgos regulatorios que frenan nueva inversión privada (incluida renovable), a la vez que incrementan pasivos contingentes por litigios [27]. Las consultas del

T-MEC añadieron incertidumbre comercial, con potenciales costos arancelarios en caso de no corregir medidas [23].

Aunque la LIE posterior a 2021 no “prohibió” la participación privada, sí reconfiguró sus incentivos:

1. Al privilegiar la energía comprometida físicamente por CFE Suministro Básico y centrales legadas en el despacho.
2. Al quitar la obligación de contratar energía para Suministro Básico vía subastas competitivas.
3. Al sujetar con mayor discrecionalidad permisos y acceso a redes. El propio decreto del DOF y la versión vigente de la LIE muestran estas modificaciones de artículos 3, 4, 53, 101 y 108 [18]–[20]. Organismos como COFECE subrayaron que tales cambios merman las condiciones de competencia abiertas por la reforma 2013–2014[28].

En febrero de 2021, el país sufrió cortes de carga por la contingencia de gas natural derivada de la tormenta invernal en Texas. CFE y CENACE documentaron públicamente que la indisponibilidad de gas y la caída de generación en el sur de EE. UU. obligaron a restricciones y a despachar centrales alternas e hidroeléctricas para sostener el sistema. El episodio alimentó debate público sobre dependencia del gas importado, resiliencia del sistema y la conveniencia de acelerar renovables firmes y almacenamiento [29]. En paralelo, usuarios y cámaras empresariales manifestaron preocupación por la incertidumbre regulatoria y litigios, recogida en posicionamientos de organismos nacionales e internacionales durante las consultas del T-MEC [27].

La situación actual de México en el sector energético en:

#### 1. Consumo de energía

Según PRODESEN 2024 [30] el consume neto de energía en el año 2023 fue 345 439 GWh y un consumo final (energía vendida a través de Suministro básico, Suministro de último recurso, Suministro calificado, usuarios calificados y abastecimiento remoto) de 298,599 GWh, lo que supone que en la última década (2014-2023) el SEN ha tenido un incremento en su consumo de energía promedio de 2.7% anual.

#### 2. Pérdidas en el SEN

Las pérdidas totales técnicas (pérdidas por efecto joule) y no técnicas (producto de toma de energía eléctrica sin medidor de forma ilícita, fallas, o daños al equipo de medición) del SEN ascienden en 2023, a 12.2% respecto al consumo neto del SEN, dicho porcentaje es ligeramente menor al 12.3% de 2022.

#### 3. Intensidad energética

La intensidad energética del SEN en 2023 fue de 14.6 Wh/\$ comparado con los 138.9 Wh/\$ del año 2018 (Figura 10).

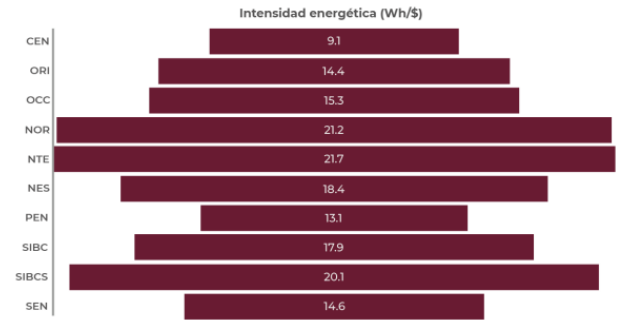


Figura 10. Índice de Intensidad energética [30].

#### 4. Incorporación de la movilidad eléctrica

Según [30] México apunta hacia una movilidad eléctrica. En 2023 se vendieron 72,52411 vehículos eléctricos e híbridos, que representaron el 5.3% del total de vehículos automotores comercializados en el país, esto significó un aumento de ventas de 21,459 unidades (42%) con respecto al 2022. Las cinco entidades federativas con mayor concentración de vehículos eléctricos son: la Ciudad de México con 15,084 unidades; el Estado de México con 5,168 unidades; seguidos por Jalisco, Nuevo León y Puebla con 3,543, 3,256 y 2,005 unidades respectivamente.

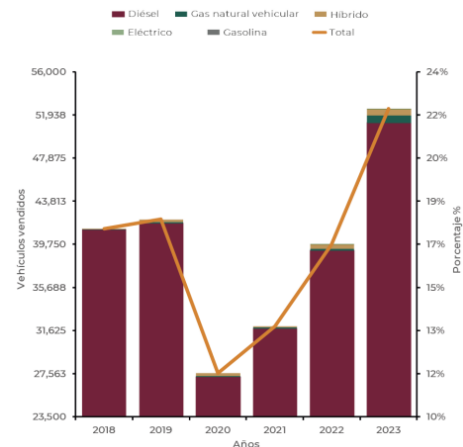


Figura 11. Evolución de ventas de automóviles en México [30].

Esta nueva incorporación al consumo eléctrico del país tiende al alza según el PRODESEN 2024, Figura 11.

#### 5. Demanda eléctrica

En 2023, la demanda máxima integrada neta del sin registró un valor de 51,406 MW, lo que equivale a un incremento de 10.2% respecto a los 46,636 MW de 2022, Figura 12.

El análisis comparativo permite verificar que el filtro implementado a través de la Interfaz VentaneoFPB ofrece un desempeño equivalente al

proporcionado por la herramienta Filter Designer, lo que valida la efectividad del diseño.

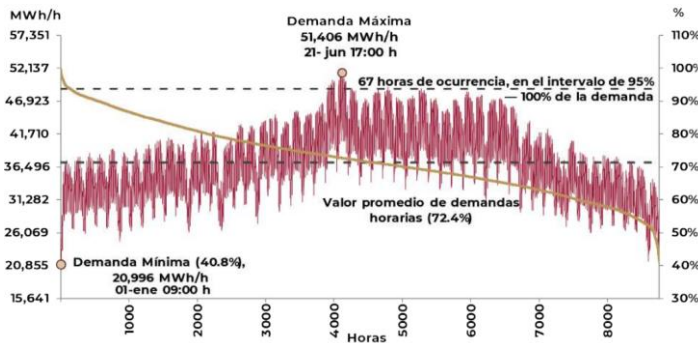


Figura 12. Curva de carga del SIN 2023 (MWh/h) [30].

Los pronósticos por parte del estado para la demanda en futuros años en 3 escenarios distintos (alto, medio y bajo) son mostrados en la Tabla 3, motivo de debate por algunas instituciones tales como el IMCO que mencionan: “Satisfacer la demanda máxima será cada vez más difícil. PRODESEN 2024-2038 estima que la tasa media de crecimiento anual de la demanda máxima del SEN será de 2.6% en el escenario de planeación, 3.0% en el escenario alto y 2.2% en el bajo. En 2024 se pronostica que la demanda máxima en el SEN (incluyendo el Sistema Interconectado Nacional, Baja California y Baja California Sur) alcanzará 55,590 MWh/h. En 2023, la demanda máxima fue de 54,530 MWh/h, es decir, registró un crecimiento anual de 1.9%. Este crecimiento puede representar un riesgo para satisfacer la demanda si se considera que en semanas recientes el sistema eléctrico entró en estado de emergencia con demandas máximas menores. Este reto es especialmente relevante en las regiones con mayor crecimiento de la demanda y poca infraestructura eléctrica como la península de Yucatán.” [31].

Tabla 3. Pronóstico de la demanda máxima integrada neta por GCR 2024-2038 [30].

SISTEMA / GCR	tmca <sup>v</sup> (%)		
	ALTO	PLANEACIÓN	BAJO
SEN <sup>2/</sup>	3.0	2.6	2.2
SIN	2.9	2.5	2.2
Central	2.7	2.3	1.9
Oriental	2.6	2.2	1.9
Occidental	3.1	2.7	2.4
Noroeste	2.8	2.4	2.0
Norte	2.6	2.3	2.0
Noreste	3.2	2.7	2.2
Peninsular	4.5	4.1	3.8
Baja California	3.5	3.2	2.9
Baja California Sur	3.5	3.3	3.3
Mulegé	2.1	2.0	1.9

## 6. Capacidad de Generación en México

Un breve análisis acerca del panorama de integración de energía renovable al país desde 2013-2024, Tabla 4 y Tabla 5, demuestra que, pese a las modificaciones hechas por la regulación actual, las energías renovables limpia (Geotermia, Fotovoltaica, Eólica e Hidroeléctrica) y siguen una tendencia al alza pese a la participación reservada del 46% para privados, esto por diversos factores, entre ellos las consideraciones de proyectos fotovoltaicos concluidos este año y propuestos tiempo atrás, como se muestra en la Figura 13 y Figura 14.

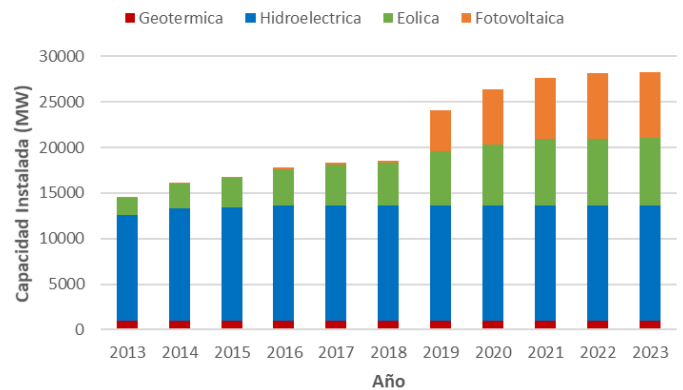


Figura 13. Capacidad instalada de energías renovables en México (2013-2023).

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAHCYT.

Para 2024, únicamente la energía solar alcanzó una contribución del 7.6 % a nivel nacional [33]. Estos resultados muestran una tendencia de crecimiento general, aunque con fluctuaciones que impidieron alcanzar plenamente las metas de 30 % en 2021 y 35 % en 2024, lo que plantea la necesidad de fortalecer políticas e inversiones en el sector renovable.

Tabla 4. Evolución anual de la capacidad de generación instalada en México por tipo [34] [35].

Año	Solar (MW)	Eólica (MW)	Hidroeléctrica (MW)	Gas Natural (MW)	Carbón (MW)	Nuclear (MW)	Otros (MW)	Capacidad Total (MW)
2013	200	1,900	12,500	27,000	5,300	1,600	1,000	49,500
2014	400	2,200	12,500	28,200	5,300	1,600	1,000	51,200
2015	700	2,600	12,600	29,000	5,300	1,600	1,100	52,900
2016	1,200	3,400	12,600	30,000	5,300	1,600	1,200	55,300
2017	2,500	4,300	12,700	31,500	5,300	1,600	1,200	59,100
2018	3,800	5,100	12,700	33,000	5,300	1,600	1,300	62,800
2019	5,000	6,200	12,700	34,500	5,300	1,600	1,400	66,700
2020	6,500	7,100	12,700	36,000	5,300	1,600	1,500	70,700
2021	7,800	7,800	12,700	37,000	5,300	1,600	1,500	73,700
2022	8,600	8,500	12,700	38,000	5,300	1,600	1,600	76,300
2023	9,200	9,000	12,700	38,500	5,300	1,600	1,700	78,000
2024	9,800	9,400	12,700	39,000	5,300	1,600	1,800	79,600

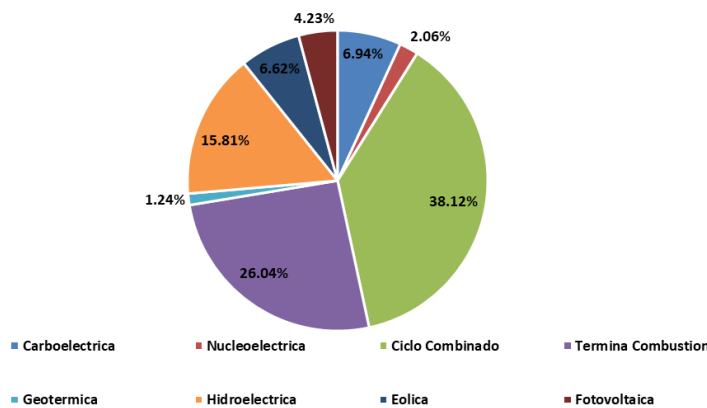
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.** Capacidad instalada en México por tipo de tecnología (2013-2024) [36].

TIPO DE TECNOLOGÍA	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2013-2014
Carboeléctrica	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	5498	6.94%
Nucleoeléctrica	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1634	1,608	2.06%
Ciclo Combinado	23720	23900	23930	26037	26944	28324	31686	34034	35540	36183	36646	35,178	38.12%
Termina Combustion	18766	19129	19872	20613	21054	21681	22186	23043	23243	23236	23276	11,300	26.04%
Geotérmica	940	940	992	992	992	992	992	992	992	992	992	976	1.24%
Hidroeléctrica	11621	12414	12417	12635	12641	12641	12641	12641	12641	12641	12641	12,612	15.81%
Eólica	1959	2655	3233	4009	4474	4677	5970	6654	7354	7354	7462	7,056	6.62%
Fotovoltaica	33	100	149	189	276	231	4478	6132	6689	7209	7211	7489	4.23%

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAHCYT.

**CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA (MW) 2013-2024**



**Figura 14.** Demostración de capacidad instalada por tecnología en %.

Fuente: Elaboración propia con información de CONAHCYT.

**Tabla 6.** Capacidad autorizada vs. Operativa [34] [35].

Periodo	Capacidad autorizada (MW)	Capacidad en operación (MW)	Brecha (MW)	Capacidad operativa sobre autorizada %
2013–2018	37,544.40	27,838.00	9,706.40	74.20%
2019–2024	11,620.10	3,148.70	8,471.40	27.10%
Total	49,164.50	30,986.70	18,177.80	63.00%

Fuente: Elaboración propia con información de IMCO.

7. Cambio en organismos reguladores participantes de la LIE  
La promulgación de la Ley del Sector Eléctrico (LSE) en marzo de 2025 reconfiguró el entramado regulatorio que operaba bajo la LIE: el texto legal crea nuevos órganos y reasigna competencias clave (por ejemplo, la creación y fortalecimiento de la Comisión Nacional de Electricidad / CNE como órgano regulador sectorizado y con atribuciones para expedir bases del mercado, tarifas y permisos), mientras consolida el CENACE como operador del sistema y mantiene a la SENER como autoridad rectora de planeación. Este cambio institucional implica que funciones que antes ejercía la CRE se ubican ahora en la CNE y en nuevas entidades previstas en el paquete reformador publicado en el DOF del 18-mar-2025 [32].

La sustitución parcial del esquema CRE–CENACE por una arquitectura donde la CNE (órgano sectorizado) tiene potestades sobre permisos, regulación tarifaria del operador y emisión de las Bases del Mercado genera efectos técnicos y políticos inmediatos. En lo técnico, concentra la facultad de fijar metodologías y criterios que definen cómo se estructuran las ofertas y la remuneración de los servicios; en lo político, introduce una nueva autoridad con mandato y diseño institucional que condicionará la predictibilidad normativa y la independencia técnica percibida por inversores. [32]

Desde la perspectiva económica, este cambio regulatorio alimenta incertidumbres de transición: la reasignación de competencias y la habilitación de modalidades contractuales (producción de largo plazo, inversión mixta) modifican las señales de mercado que recibían los inversionistas privados bajo la LIE (subastas y contratos bilaterales). Diversos análisis advierten que, si no se acompañan medidas claras de gobernanza y transparencia, la reconfiguración puede frenar inversiones privadas en generación renovable y elevar el costo del financiamiento de proyectos, pues los agentes descuentan riesgo regulatorio y posible priorización de contratos para la empresa pública. [35]

En materia de prospectiva operativa, las nuevas atribuciones de la CNE y la permanencia del CENACE como operador demandan una estrecha coordinación para resolver el principal cuello de botella técnico señalado por PRODESEN: la expansión de la Red Nacional de Transmisión (RNT) y de las Redes Generales de Distribución (RGD) necesaria para integrar mayor capacidad variable (solar y eólica). Si la CNE no articula reglas de acceso y desarrollo de la red compatibles con la planeación vinculante de SENER, la integración de renovables puede quedar restringida por limitaciones físicas y por retrasos en permisos y obras de infraestructura. [30]

Respecto a las energías renovables, la reubicación de competencias regulatorias cambia el canal por el que se incentivará la inversión limpia: si la CNE y SENER orientan la planeación a favor de proyectos integrados en esquemas mixtos con CFE y priorizan programas de transmisión, la penetración renovable puede seguir creciendo, aunque con diferente estructura de propiedad (mayor participación estatal o mixta). Pero si la transición regulatoria produce fricciones o retrasos (por recursos legales, ajustes administrativos o capacidad de ejecución), la velocidad de incorporación de PV y eólica puede reducirse respecto a la senda previa de subastas y contratos privados competitivos documentada durante 2016–2018. [30]

## REFLEXIÓN

### *Política estatal y energías renovables*

La política energética implementada en el periodo 2013–2018, enmarcada en la Reforma Energética y en la aprobación de la Ley de Transición Energética, representó un punto de inflexión en el sector eléctrico mexicano. El diseño de mecanismos como las subastas de largo plazo y los Certificados de Energía Limpia (CEL) fue fundamental para detonar proyectos de energías renovables, sobre todo solar fotovoltaica y eólica, que hasta ese momento tenían una participación marginal en la matriz energética nacional. En términos de apertura y diseño de mercado, estas políticas sí lograron promover la diversificación energética al introducir nuevos jugadores y tecnologías que favorecieron la competencia y la reducción de precios. No obstante, la efectividad real de estas medidas enfrentó barreras estructurales y de implementación. Si bien los resultados de las subastas arrojaron precios competitivos y planes ambiciosos de nueva capacidad renovable, muchos proyectos se retrasaron debido a la insuficiencia de infraestructura de transmisión, los conflictos sociales en las zonas de instalación y la incertidumbre regulatoria que comenzó a gestarse hacia el final del sexenio. Esto provocó que el crecimiento de las renovables fuera positivo pero insuficiente para transformar profundamente la matriz en el corto plazo.

En cuanto a las metas de generación limpia, el compromiso legal establecía alcanzar 30 % para 2021 y 35 % para 2024. En la práctica, el avance hacia 2018 mostró una tendencia ascendente, pero sin garantizar un cumplimiento puntual. La participación de energías limpias creció de manera constante, sin embargo, el sistema siguió dependiendo en gran medida de los ciclos combinados a gas natural, que aportaron estabilidad y confiabilidad, pero retrasaron el alcance de los porcentajes estipulados. Así, puede afirmarse que las metas se cumplieron de manera parcial o con retraso, reflejando que, aunque la política fue un paso decisivo, los objetivos planteados requerían mayor respaldo en inversión en redes eléctricas, financiamiento y coordinación institucional.

### *Apertura a Privados vs. Re-centralización*

La reforma energética de 2013 representó una apertura significativa al sector privado, buscando modernizar el sector energético mexicano e impulsar la inversión en energías renovables. Esta apertura buscaba aprovechar el potencial de nearshoring con Estados Unidos, integrando el sector energético mexicano al mercado de energía renovable más atractivo del mundo.

En contraste, la administración actual ha priorizado una re-centralización del sector energético, fortaleciendo el papel de las empresas estatales como la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX). Esta política busca asegurar la soberanía energética y fortalecer las finanzas públicas, pero ha generado tensiones con los inversionistas privados y ha suscitado preocupaciones sobre el cumplimiento de los compromisos internacionales en materia de energías renovables.

### *Riesgos y Oportunidades en la Transición Energética de México*

La política de re-centralización energética implementada desde 2018 presenta varios riesgos para el cumplimiento de las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, que busca garantizar el acceso a energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos en 2030. Estos riesgos incluyen la posible pérdida de oportunidades de inversión en energías limpias y una menor prosperidad para muchas familias mexicanas.

A pesar de estos riesgos, existen oportunidades significativas para avanzar en la transición energética. México tiene un alto potencial para generar electricidad a partir de fuentes renovables, como la solar, eólica y geotérmica. El país cuenta con un marco legal que apoya la transición energética y las condiciones ambientales para el desarrollo e implementación de energías renovables.

### *Participación del sector privado*

- Evolución del rol de los privados: subastas y Certificados de Energías Limpias (CEL)

La participación del sector privado en la generación de energía en México experimentó un crecimiento sostenido a partir de la implementación de las subastas de largo plazo organizadas entre 2015 y 2018. Dichos mecanismos permitieron que inversionistas nacionales y extranjeros financiaran proyectos de generación renovable, especialmente en energía solar fotovoltaica y eólica, con costos competitivos a nivel internacional, Tabla 7.

*Tabla 7. Evolución de la inversión privada en el sector eléctrico mexicano.*

Periodo	Mecanismo Principal	Inversión estimada (MUSD)	Participación privada en capacidad instalada
2015 - 2018	Subasta de largo plazo y CEL	9,000 +	22%
2019 - 2021	Suspensión de subastas	3,200	19%
2022 - 2024	Prioridad al despacho de CFE	< 1,500	15%

*Fuente: Elaboración propia*

Jesús D. Paredes G., et al., Mercado Eléctrico Mayorista en México (2013–2025): cambios regulatorios y la participación del Estado y privados en la transición hacia energías renovables.

Asimismo, los Certificados de Energías Limpias (CEL) representaron un incentivo regulatorio clave, al obligar a los grandes consumidores a acreditar un porcentaje de energía proveniente de fuentes limpias. Esto fomentó la instalación de centrales renovables privadas que, en su conjunto, aportaron a la diversificación de la matriz energética nacional y al cumplimiento de compromisos climáticos.

No obstante, a partir de 2020 y con mayor énfasis hacia 2024, el proceso de subastas fue suspendido, limitando el dinamismo del sector. Ello provocó un freno en la incorporación de nuevas plantas privadas, reduciendo la capacidad instalada proyectada y generando incertidumbre en los inversionistas.

- Impacto de la nueva legislación y prioridad al despacho de CFE

Las reformas legislativas recientes modificaron de manera estructural el marco de operación del mercado eléctrico. En particular, la prioridad de despacho a las plantas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) sobre las privadas afectó la certidumbre regulatoria, ya que tecnologías de generación renovable aun siendo más competitivas en costos marginales quedaron relegadas frente a las centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y de ciclo combinado de CFE.

Este cambio impactó de forma directa en la confianza empresarial, pues los inversionistas perciben un entorno con altos riesgos regulatorios, baja transparencia en las reglas de mercado y menor atractivo para el financiamiento de proyectos de gran escala. La falta de mecanismos de competencia efectiva y de políticas de estabilidad normativa ha reducido el flujo de capital privado en energías renovables, lo que podría comprometer los objetivos de transición energética a mediano plazo.

La entrada creciente de actores privados en el sector renovable transforma tanto la velocidad como la forma del despliegue energético. La participación del sector privado en el desarrollo de proyectos renovables tiene consecuencias profundas y multifacéticas, tanto a nivel nacional como internacional. En primer lugar, acelera la movilización de capital y la escala de despliegue: la entrada de inversión privada aporta recursos financieros, experiencia en gestión de proyectos y agilidad operativa que suelen traducirse en mayor ritmo de construcción y puesta en marcha de parques eólicos, solares y otras tecnologías limpias. Esto facilita el cumplimiento de metas de descarbonización en plazos más cortos y puede reducir la necesidad de gasto público directo.

En el plano institucional, la colaboración público-privada puede impulsar transferencia tecnológica y desarrollo de capacidades locales si los contratos incorporan cláusulas de contenido nacional, formación

y transferencia de know-how. Sin embargo, si no se diseñan salvaguardas, existe el riesgo de que la cadena de valor se externalice, reduciendo los beneficios industriales y empleo locales y generando dependencia de insumos o servicios extranjeros.

A nivel de mercado y gobernanza, la participación privada mejora la eficiencia y la innovación —introduciendo modelos de negocio, soluciones financieras y tecnologías avanzadas— pero también puede concentrar actores y poder de mercado, lo que demanda marcos regulatorios robustos para evitar prácticas anticompetitivas, asegurar transparencia y proteger a consumidores y pequeños productores. La presencia de operadores internacionales agrega complejidad: facilita financiamiento cruzado y proyectos transfronterizos, pero incrementa la exposición a riesgos cambiarios, litigios internacionales y presiones geopolíticas.

En términos ambientales y sociales, la inversión privada puede elevar estándares técnicos y de monitoreo si los contratos incorporan criterios ESG y condicionan desembolsos a cumplimiento ambiental. Por el contrario, sin supervisión efectiva, existe el riesgo de externalidades ambientales, conflictos con comunidades locales y un déficit en la participación ciudadana en decisiones que afectan territorios.

## Conclusiones

México cuenta con recursos renovables de clase mundial y capacidades técnicas sólidas, pero enfrenta un escenario de estancamiento por cambios regulatorios, rezagos en infraestructura y priorización estatal. Para avanzar en la transición energética, se requieren:

Aspecto técnico. La expansión enfrenta cuellos de botella en la red de transmisión, saturación de nodos y tiempos prolongados de interconexión. Persiste la ausencia de una estrategia integral de flexibilidad que incorpore almacenamiento, respuesta de la demanda, modernización del despacho y mejoras en pronósticos, lo cual restringe la integración de generación eólica y solar con niveles adecuados de confiabilidad.

Aspecto económico. Pese a que las energías renovables son competitivas en costo nivelado, la incertidumbre regulatoria incrementa el costo de capital y limita la inversión. La re-centralización reduce la competencia y debilita las señales de precio a largo plazo. En ausencia de mecanismos estandarizados de contratación (subastas, PPAs o contratos de capacidad/flexibilidad), el flujo de nuevos proyectos se ralentiza.

Aspecto regulatorio. La frecuencia de cambios normativos, la imprevisibilidad en permisos y la falta de claridad en torno a certificados de energía limpia, acceso abierto y reglas de despacho erosionan la confianza de los inversionistas. La priorización de esquemas con el Estado como contraparte única restringe la diversidad de actores y fuentes de financiamiento.

Aspecto social. Bien implementadas, las energías renovables generan empleo local y reducen costos para pymes y hogares. No obstante, la gestión social y ambiental insuficiente en fases tempranas genera resistencias comunitarias, mientras que la falta de certidumbre desalienta la consolidación de cadenas de suministro nacionales.

Aspecto ambiental. El ritmo actual no es consistente con las trayectorias requeridas de descarbonización del sector eléctrico ni con la mejora acelerada de la calidad del aire en regiones con alta dependencia termoeléctrica.

De no atender estos retos, México corre el riesgo de incumplir sus metas de transición energética y perder competitividad internacional.

## Referencias

- [1] Secretaría de Energía (SENER), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2012–2026*, México, 2012. Cap. 3 “Mercado eléctrico nacional 2000–2011”.
- [2] SENER, Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica 2016, México, 2017.
- [3] México, “Ley de la Industria Eléctrica,” *Diario Oficial de la Federación*, 11-Aug-2014.
- [4] México, “Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de energía,” *DOF*, 20-Dec-2013.
- [5] Comisión Federal de Electricidad (CFE), *Ley de la Comisión Federal de Electricidad*, México, 2014.
- [6] Secretaría de Energía (SENER), *PRODESEN 2017–2031: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*, México, 2017.
- [7] CENACE, *Manual de organización general y atribuciones del MEM*, México, 2016.
- [8] Comisión Reguladora de Energía (CRE), “Funciones y atribuciones de la CRE,” México, 2018.
- [9] México, “Bases del Mercado Eléctrico,” *Diario Oficial de la Federación*, 8-sep-2015.
- [10] SENER/CENACE, “Manual del Mercado de Energía de Corto Plazo,” *DOF*, 17-jun-2016.
- [11] SENER, Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica 2016, México, 2017.
- [12] IMCO, “Hacia la transformación del mercado eléctrico mexicano: Generación distribuida,” *Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.*, 2017.
- [13] SENER, *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018)*, México, 2018.
- [14] SENER, *Balance Nacional de Energía 2018 (metodología y participación de energías limpias)*.
- [15] México, “Ley de Transición Energética,” *Diario Oficial de la Federación*, 24-dic-2015. Disponible: [Cámara de Diputados \(texto vigente y transitorios\)](#).
- [16] SENER–INEGI, *Balance Nacional de Energía 2023 (serie más reciente y participación en matriz de generación)*.
- [17] COFECE, *Los Certificados de Energías Limpias en la industria eléctrica: evaluación de la competencia, 2020–2021*.
- [18] *DOF*, “Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley de la Industria Eléctrica,” 9-mar-2021. Disponible en: [dof.gob.mx \(consulta: ago. 2025\)](#).
- [19] *Cámara de Diputados, Ley de la Industria Eléctrica (compilación vigente, última reforma DOF 01-abr-2024)*. Disponible en: [diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec.pdf](#).
- [20] *Senado de la República, “Dictamen de comisiones unidas sobre la reforma a la LIE (2021),” 2-mar-2021*.
- [21] *Cámara de Diputados, Ley del Sector Eléctrico (LESE)*, *Diario Oficial de la Federación*, Mar. 18, 2025.
- [22] CENACE, “Cancelación de la Cuarta Subasta de Largo Plazo (2019),” *comunicados/nota periodística especializada*.
- [23] *Secretaría de Economía (México), “México recibe solicitud de consultas (T-MEC),” 20-jul-2022*.
- [24] SENER, *Reporte de Avance de Energías Limpias (RAEL), ediciones 2023–2024*.
- [25] CENACE, *Informe de Tecnología de Generación de Referencia 2024 (preliminar)*.
- [26] SENER, “Reporte de Avance de Energías Limpias 2024,” [En línea]. Disponible:
- [27] IMCO, “Estados Unidos solicita consultas con México por su política energética,” 20-jul-2022.

[28] COFECE, “Acciones contra la Política de Confiabilidad del SEN (2020–2021),” comunicados oficiales.

[29] CFE, “Conferencia 15 de febrero de 2021: afectaciones por contingencia de gas y coordinación con CENACE,” 2021.

[30] Centro Nacional de Control de Energía, “PRODESEN 2024-2038: Capítulos 1 al 6”, México, 2024.

[31] IMCO staff, “Prodesen 2024-2038: El sistema eléctrico mexicano,” Instituto Mexicano para la Competitividad, Ciudad de México, México, Jun. 6, 2024.

[32] Cámara de Diputados, Ley del Sector Eléctrico (texto vigente), DOF, 18-mar-2025. Disponible en: [diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LSE.pdf](http://diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LSE.pdf).

[33] Cámara de Diputados, LSE, artículos 42–47 sobre inversión mixta y producción de largo plazo.

[34] IMCO, “Es necesario acelerar las inversiones en el sector eléctrico”, mayo 2025.

[35] Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), Infraestructura para un sistema eléctrico competitivo (2025–2030), mayo 2025.

[36] “Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad,” Plataforma Nacional De Energía, Ambiente Y Sociedad.



Fátima Aspericueta Hernández. Estudiante de noveno cuatrimestre en Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa.

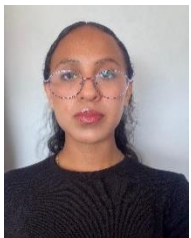


Carlos Ernesto Zatarain Rendón. Estudiante de noveno cuatrimestre en Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa.

## Semblanza Autores



Jesús Daniel Paredes González. Estudiante de noveno cuatrimestre en Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa.



Eridani Segura Soto. Estudiante de noveno cuatrimestre en Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa.



**GEOVOLTAICA**  
Revista de Energía y Sostenibilidad