



**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 1. Enero-Abril 2025, es una publicación cuatrimestral, editada por el Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Coto 12 Número 4902, Real del Valle, 82124 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 En trámite, ISSN: En trámite. Ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Néstor Galán. Real del Valle, Coto 12, Núm 4902. Código Postal 82124. Fecha de última Actualización 07 de Marzo 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"*

En el escenario actual, donde los desafíos energéticos y ambientales demandan soluciones innovadoras y sostenibles, nace Geovoltaica, una publicación dedicada a explorar y analizar las intersecciones entre energía, sostenibilidad y desarrollo tecnológico. Este primer número marca el inicio de un espacio de diálogo y reflexión sobre temas de importancia para el sector académico, profesional y público en general. La crisis climática ha dejado de ser una advertencia para convertirse en una realidad que exige acciones inmediatas y efectivas. El incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, junto con el agotamiento de recursos naturales, nos urge a repensar nuestros modelos de producción y consumo energético. En este contexto, las energías renovables son alternativas viables para la supervivencia y el desarrollo sostenible.

Geovoltaica se propone como una plataforma para explorar investigaciones e innovaciones en tecnologías limpias, desde los avances en energía solar fotovoltaica y eólica hasta las prometedoras aplicaciones del hidrógeno verde. Nuestro compromiso es presentar investigaciones rigurosas, análisis técnicos y casos de estudio que demuestren la viabilidad y eficiencia de estas soluciones. La calidad y eficiencia energética ocupan un lugar central en nuestra agenda editorial. Entendemos que la transición hacia un futuro sostenible requiere no solo de nuevas fuentes de energía, sino también de una gestión más inteligente y eficiente de los recursos existentes. Las Smart Grids, el almacenamiento energético y las tecnologías de gestión de la demanda son temas que requieren análisis en profundidad.

El cambio climático, como fenómeno global, exige respuestas coordinadas y multidisciplinarias. Por ello, nuestras páginas darán cabida a voces expertas de diversos campos: ingeniería, ciencias ambientales, economía y política energética. Esta aproximación holística nos permitirá abordar la complejidad de los retos actuales desde múltiples perspectivas. Geovoltaica nace con la convicción de que el conocimiento y la difusión de información técnica especializada son fundamentales para impulsar la transición energética. Invitamos a investigadores, profesionales y expertos del sector a contribuir con sus conocimientos y experiencias en los próximos números.

En este primer número, presentamos una selección de artículos que abordan desde innovaciones en tecnología fotovoltaica para alumbrado público, hasta estrategias de control y eficiencia energética en entornos rurales con mecanismos de automatización. Cada texto ha sido cuidadosamente seleccionado y se ha adoptado el sistema de arbitraje doble ciego para ofrecer información relevante y actualizada, manteniendo el rigor técnico que caracterizará a nuestra publicación.

En un mundo donde la sostenibilidad energética se ha convertido en un imperativo global, Geovoltaica se compromete a ser un referente en la difusión de conocimiento técnico y científico sobre energías limpias y desarrollo sostenible. A quienes investigan, desarrollan y cuestionan los paradigmas actuales: esta es su plataforma. Porque cada hallazgo, cada modelo y cada solución aplicada nos acercan a un mundo más eficiente, resiliente y equitativo.

Esperamos que este primer número sea el inicio de un diálogo productivo y constructivo sobre el futuro energético.

**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. José Adán Hernández Nolasco**  
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- **Dr. Jorge Alberto Pérez Mendoza**  
Instituto Politécnico Nacional, México.
- **Dr. Denis Javier Aranguri Cayetano**  
Universidad del Santa, Perú
- **Dr. José Gregorio Marcano**  
Universidad de Carabobo, Venezuela.
  
- **Gestión de Medios**  
Ing. Jean Carlos Velarde Meza
  
- **Dirección de asuntos legales.**  
Roberto Nila Higuera



# CONTENIDO

- 7**    **Diseño de control y monitoreo para sistema de riego en invernadero escala piloto.**
- 12**    **Viabilidad sostenible de sistemas de alumbrado público y videovigilancia alimentados con energía solar fotovoltaica en las Islas Galápagos.**
- 21**    **Transición Energética para un Mundo más Sostenible: Análisis de Percepciones y Desafíos Actuales.**
- 31**    **Desarrollo de un Sistema de Gestión Térmica para Paneles Solares en una Estación de Carga para Vehículos Eléctricos.**
- 42**    **Modelado e implementación de sistema mecánico masa-resorte-amortiguador: Una revisión.**
- 51**    **Algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para un Convertidor Elevador de un Sistema Fotovoltaico vía Control Predictivo basado en Modelos.**

# Diseño de control y monitoreo para sistema de riego en invernadero escala piloto

## Design of control and monitoring for irrigation system in a pilot scale greenhouse

Cesar Gerardo Parra<sup>1</sup>, Roel Urquidez López<sup>1</sup>, David Ríos Torres<sup>1</sup>, David E. Castro Palazuelos<sup>1</sup>, Julio C. Picos Ponce<sup>1</sup>, Guillermo J. Rubio Astorga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, guillermo.ra@culiacan.tecnm.mx

### Resumen

El control y monitoreo de sistemas agrícolas es parte de la agricultura 4.0. La industria muestra una tendencia creciente al uso de estos sistemas, ya que resuelven problemas clave que afectan a la producción, la optimización de recursos y la seguridad. En este proyecto, se diseña e implementa, un sistema de control y monitoreo en un invernadero escala piloto. Para realizar este proyecto, se diseña un algoritmo de control con base al modelado de la bomba de riego, mediante el software de simulación MATLAB. El controlador, usa como retroalimentación un sensor de humedad de suelo. También, se diseña un sistema de comunicación para el monitoreo de los parámetros del invernadero en tiempo real, con el uso de un ruteador industrial y una plataforma digital. Esta permite almacenar los datos en la nube y configurar los parámetros del sistema de riego. Los resultados demuestran la posibilidad de mejorar la gestión de invernaderos y resolver las necesidades que enfrenta la agricultura, ante la alta demanda de productos agrícolas y los fenómenos climatológicos.

**Palabras clave:** Control, Monitoreo, Invernadero

### Abstract

Control and monitoring of agricultural systems are integral parts of Agriculture 4.0. The industry shows a growing trend toward the use of these systems as they address key challenges affecting production, resource optimization, and safety. In this project, a control and monitoring system is designed and implemented in a pilot-scale greenhouse. To accomplish this, a control algorithm is developed based on the modeling of the irrigation pump using MATLAB simulation software. The controller uses a soil moisture sensor as feedback. Additionally, a communication system is designed for real-time monitoring of greenhouse parameters using an industrial router and a digital platform. This platform enables data storage in the cloud and allows the configuration of irrigation system parameters. The results demonstrate the potential to improve greenhouse management and address the challenges faced by agriculture, including the high demand for agricultural products and climate phenomena.

**Keywords:** Control, Monitoring, Greenhouse

Recibido: 04/12/2024; Aceptado 14/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introducción

En México el sector agrícola consume el 76% del agua que se utiliza anualmente [1], sin embargo, alrededor del 50% se desperdicia [2]. Esto debido al uso de sistemas y técnicas de riego tradicionales como el riego por inundación, los cuales son poco eficientes en el uso del agua, por lo que tecnificar el sector agrícola es clave para reducir el desperdicio y aumentar la eficiencia [3].

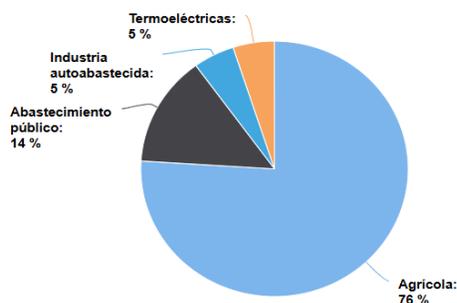


Figura 1. CONAGUA, estadísticas del agua en México 2018.

Satisfacer las necesidades de nutrición y riego de un cultivo es importante en la agricultura. Esto puede lograrse mediante la tecnificación de los sistemas de riego, lo cual no solo mejora en el uso del agua, sino que también contribuye a incrementar la producción y generar mayores beneficios económicos [4].

El monitoreo de las condiciones ambientales y de riego son fundamentales para mejorar la productividad y sostenibilidad de la agricultura [5]. Estas tecnologías pueden ser complementadas con el uso de la agricultura protegida, estas estructuras ofrecen protección y mejoran el desarrollo de los cultivos frente al cambio climático. Además, permiten ajustar las condiciones ambientales para satisfacer las necesidades específicas de los cultivos [6].

Los sistemas de riego tradicionales se aplican, en su mayoría, a partir de modelos de evapotranspiración [7], los cuales calculan la cantidad de agua necesaria para reponer las pérdidas ocasionadas por la evaporación y la transpiración de las plantas. Estos modelos están influenciados por factores climáticos como la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento [8].

La humedad del suelo es una variable de importancia para el desarrollo de los cultivos. Implementar sistemas de riego tecnificados para mantener niveles óptimos de humedad en un sistema de riego permite reducir el consumo de agua [9]. La aplicación de los algoritmos de control aplicados en la humedad de suelo en los sistemas de riego permite mantener esta variable en niveles adecuados para los cultivos, esto genera un crecimiento óptimo y disminuye el consumo hídrico [10].

En este trabajo, se realiza el diseño de control y monitoreo para un sistema de riego en invernadero escala piloto, con el uso de

componentes industriales como los controladores lógicos programables, enrutadores inalámbricos y conmutadores.

### Fundamentación Teórica

La agricultura 4.0 surge como una analogía a la industria 4.0, también llamada cuarta revolución industrial, que se basa en un conjunto de tecnologías relacionadas con el manejo de información en tiempo real, especialmente en la cadena de producción [11]. En el caso de la agricultura consiste en la conectividad de la red interna y externa de las operaciones agrícolas, integrando la información en una misma plataforma que permite la toma de decisiones en tiempo real [12].

La agricultura de precisión se basa en el uso de información y herramientas de decisión que buscan mejorar la productividad y rentabilidad de los cultivos [13]. La agricultura 4.0, ha demostrado que la implementación de dichas tecnologías también mejora el desarrollo sustentable, al disminuir el desperdicio de insumos y al incrementar la producción [14].

El invernadero es una estructura con la forma de una casa, que se cubre con un material semitransparente para mantener un microclima artificial, con el control de flujo de agua y de temperatura para el crecimiento óptimo de las plantas [15]. El uso de invernaderos para la agricultura sustentable se fundamenta en el menor consumo de recursos, la mejora en calidad de cultivos, el control de enfermedades y plagas, lo que mejoran la reutilización de recursos y reduce la contaminación [16].

El control es de gran relevancia en la industria debido a sus aplicaciones y resultados positivos. La ingeniería y la ciencia busca crear algoritmos precisos y robustos ante las perturbaciones. Para su diseño se requiere modelar la dinámica del sistema o el desarrollo de un modelo matemático, ya que este permite evaluar y seleccionar el algoritmo de control más adecuado [17].

El control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es uno de los algoritmos más aplicados en la industria. Su relevancia aumentó en 1942, cuando Ziegler y Nichols desarrollaron un método de sintonización. Desde entonces, han surgido diversas variantes, no obstante, la configuración más utilizada en su forma original es la de tipo paralelo [18].

### Metodología

Se realiza el diseño de una red para el sistema de monitoreo de un invernadero, con el uso de "routers" y "switches" industriales. Estos se utilizan para crear una red local, donde se conectan los dispositivos de adquisición de datos. Para este caso se utiliza un ruteador de conectividad 3G modelo DX-2100, para establecer la comunicación

con la nube mediante la red celular, este enrutador obtiene información de las variables del controlador lógico programable (PLC) AS218-TX, además se utiliza una pantalla HMI (*Human Machine Interface*) para el monitoreo físico del invernadero y la extracción de datos.

Las variables de interés se obtienen mediante sensores, como los de humedad de suelo (ECH20 EA-10), este sensor requiere un voltaje de 7 a 32 VCD con una salida analógica de 4-20 mA y una precisión de medición de  $\pm 2\%$ . También, se utiliza un sensor de humedad y temperatura ambiente (THD100), requiere 24 VCD de alimentación, su salida es de 4-20 mA, su precisión para la temperatura es de  $\pm 1\%$  y  $\pm 2\%$  para la humedad relativa y el rango de medición de la temperatura es de  $-20$  a  $60$  °C. por último, se utiliza un sensor de caudal de efecto hall (YF-S201), el voltaje de alimentación de este sensor es de 5 a 24 VCD, el rango de medición es de 1-30 L/min y tiene una precisión de  $\pm 10\%$ .

Una vez se registran los valores de las variables del invernadero, se pasan al ruteador, este los envía mediante la red celular 3g y los almacena en la plataforma digital DIACloud de la nube. En la figura 2 se muestra el diagrama de red para la adquisición de estos datos. Lo primero es obtener los datos de los sensores y actuadores mediante el PLC, este a su vez envía los datos al conmutador para que los reciba el enrutador y la pantalla HMI, una vez los datos son recibidos por el enrutador, los transfiere de forma inalámbrica a las torres de comunicación celular para que lleguen los datos a la nube.

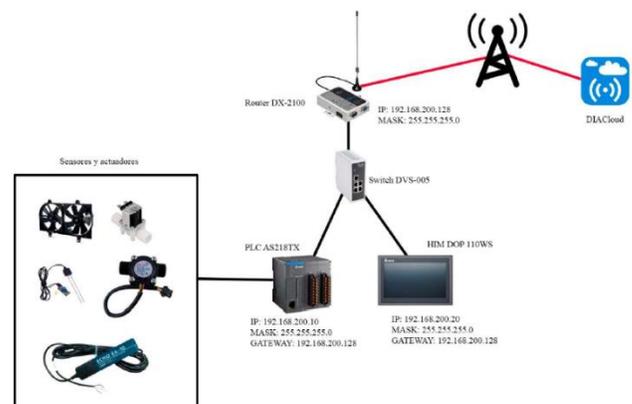


Figura 2. Diagrama de red para adquisición de datos en invernadero

Para realizar el algoritmo de control aplicado un sistema de riego es necesario considerar el modelado de la bomba de riego, gracias a que la bomba tiene un motor en su interior se toma el modelo del motor de CD de imanes permanentes. A continuación, se describe la ecuación del comportamiento de este motor.

$$\frac{K_m}{(L_a * J)s^2 + (L_a * b + R_a * J)s + (R_a * b + K_m * K_b)} \quad (1)$$

Donde,

$K_m$  = Constante de torque del motor.

$L_a$  = Inductancia del devanado del motor.

$J$  = Momento de inercia del rotor.

$b$  = Coeficiente de fricción viscosa.

$R_a$  = Resistencia del devanado del rotor.

$K_b$  = Constante de voltaje.

Para realizar la simulación del modelo, se utiliza el *software* Simulink, donde se diseña el controlador PID que permite tener un control del flujo de agua de la bomba. En la figura 3, se muestra el diagrama del modelado de la bomba de la ecuación (1) y su bloque correspondiente de control PID, además de compararlo con un PID de sintonización propia.

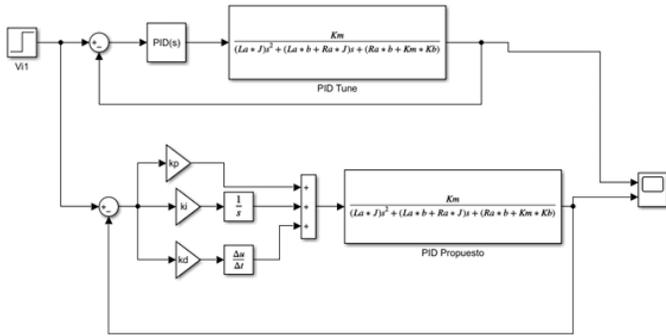


Figura 3. Diagrama en lazo cerrado del motor con PID.

Los valores de las constantes sintonizadas del controlador PID se obtienen mediante el comando *autotuning* de Simulink, además se incluyen los valores de sintonización de la propuesta propia. Estos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de ganancia del controlador PID.

	Kp	Ki	Kd
Valor de la ganancia <i>autotuning</i>	0.25701453	1.23307502	0.01156649
Valor de la ganancia Propuesto	8.2865	1.1189	0.0781

## Resultados

El diseño realizado para el monitoreo y control de las variables físicas del sistema riego de invernadero muestra la información obtenida en el invernadero mediante los sensores y el PLC. Esto permite analizar la

información de manera gráfica y tabular como se observa en la figura 4 y 5 respectivamente.

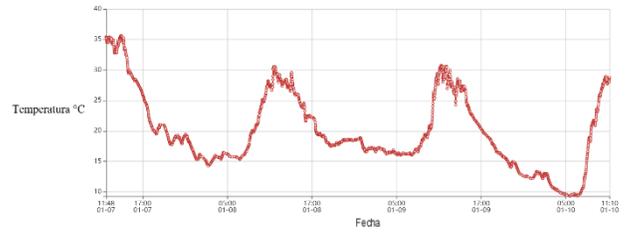


Figura 4. Gráfica de temperatura mediante sistema de monitoreo

Time	Value
2024-12-10 11:56:53.5	55000
2024-12-10 12:03:25.5	70000
2024-12-10 12:03:32.5	75000
2024-12-10 12:03:35.5	70000
2024-12-10 12:03:38.5	55000
2024-12-10 12:03:41.5	75000
2024-12-10 12:03:45.5	50000
2024-12-10 12:03:48.5	75000
2024-12-10 12:03:54.5	55000
2024-12-10 12:03:57.5	75000
2024-12-10 12:04:00.5	70000
2024-12-10 12:04:04.5	75000
2024-12-10 12:04:07.5	55000
2024-12-10 12:04:13.5	75000
2024-12-10 12:04:16.5	55000

Figura 5. Datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo.

En el sistema se pueden modificar los parámetros de las variables mediante la plataforma digital, lo que permite realizar cambios y correcciones de forma inmediata remotamente, como se observa en las figuras 6 y 7, donde se modifica la variable "Setpoint", esta cuenta con un valor de 0 y al realizar el cambio en la plataforma, es posible modificar el valor en el PLC sin la necesidad de estar físicamente en el invernadero.

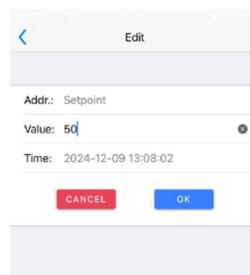


Figura 6. Configuración de parámetros mediante plataforma digital



Figura 7. Cambio de parámetros reflejado en el sistema de control.

Otro beneficio de un sistema de monitoreo remoto en invernaderos es el GPS, que al utilizar esta ventaja podemos tener distintos invernaderos y saber cuál de ellos es el que se está monitoreando. Esto se puede observar en la figura 8

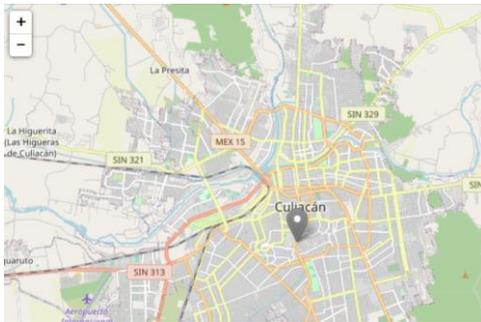


Figura 8. Localización del invernadero mediante GPS.

En la figura 9 se puede observar los resultados de la implementación de los controladores PID. Se puede observar que el controlador PID propuesto (rojo) no tiene un sobre impulso y el PID con *autotuning* presenta un sobre impulso del 18.125%. El controlador propuesto tiene una mayor aplicabilidad, al no tener sobre impulso, se puede implementar sin riesgos y temor a un daño futuro en las bombas de riego.

También, se mide el tiempo con el que se llega a la referencia, donde el controlador PID *autotuning* llega a la referencia en 0.0338s y el controlador propuesto llega en 0.0346s, sin embargo, PID propuesto alcanza la estabilidad en un tiempo de 0.059s, mientras que el otro controlado se estabiliza en 0.57s. El PID propuesto se muestra como una alternativa más estable, segura y eficiente, lo que lo hace ideal para sistemas donde la estabilidad y la vida útil de los componentes son importantes.

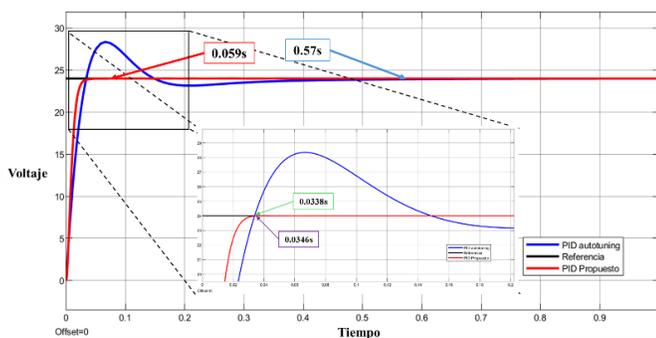


Figura 9. Respuesta a 24 volts, del PID tune y del PID propuesto.

## Conclusiones

El diseño e implementación del sistema de monitoreo y control en el invernadero permite supervisar las variables de interés, esto facilita ajustes remotos mediante una plataforma DIACloud. El añadir un controlador PID propuesto a la bomba de riego, demuestra una mejora en la estabilidad del sistema de riego en comparación con el controlador *autotuning*.

Los resultados muestran que el controlador PID propuesto elimina el sobre impulso, a diferencia del PID *autotuning*, que presenta un sobre impulso del 18.125%, lo que puede generar daños en las bombas de riego. Además, aunque el PID *autotuning* llega a la referencia más rápido (0.0338s frente a 0.0346s del propuesto), su estabilización ocurre después (0.57s), mientras que el PID propuesto se estabiliza de en un tiempo menor (0.059s).

Esta mejora en la estabilidad permite reducir el desgaste de los actuadores y aumenta su vida útil. También disminuye costos de mantenimiento. El controlador PID propuesto es una solución segura y confiable para aplicaciones en los sistemas de riego, donde la precisión y la estabilidad son factores fundamentales.

## Referencias

- [1] 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)
- [2] SEMARNAT, “Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional Hídrico 2020-2024,” 2020. Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/pnh/PNH\\_2020\\_2024.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/pnh/PNH_2020_2024.pdf)
- [3] B. Bringas Burgos, I. Mendoza Muñoz, C. Navarro González, Á. González Ángeles, and G. Jacobo Galicia, “Análisis de sistemas de riego por gravedad y goteo subsuperficial basada en una encuesta de muestra de conveniencia en el valle de Mexicali,,” Revista Vínculos, vol. 5, no. 3, pp. 13–32, 2020, doi: 10.24133/vinculospe.v5i3.1725.
- [4] M. Olvera-Salgado, G. Bahena-Delgado, Ó. Alpuche-Garcés, and F. García-Matías, “La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México,,” Ambiente Y Desarrollo, vol. 18, no. 35, pp. 23–36, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea>.
- [5] 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, Jan. 2017, doi: 10.17151/vect.2017.12.6.
- [6] L. E. Barreto-Salazar, J. J. Rochín-Medina, G. J. Rubio-Astorga, D. U. Santos-Ballardo, and J. C. Picos-Ponce, “Evaluation of Serrano Pepper Crops Growth under Controlled Conditions of Vapor Pressure Deficit in a

## Semblanza Autores

Pilot-Scale Hydroponic Greenhouse,” *Processes*, vol. 11, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/pr11123408.

[7] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, “Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),” 1998.

[8] M. Azua Barron, R. Arteaga-Ramírez, M. A. Vázquez-Peña, and A. Quevedo-Nolasco, “Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos,” *Rev Mex De Cienc Agric*, vol. 11, no. 1, pp. 125–137, Feb. 2020, doi: 10.29312/remexca.v11i1.1906.

[9] L. Patroo, K. Thacooree, and A. Mungur, “A Smart Precision Irrigation and Monitoring System,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer Verlag, 2019, pp. 105–114. doi: 10.1007/978-3-030-18240-3\_10.

[10] Á. León Mejía, N. Orrala Borbor, M. Arzube Mayorga, and A. Drouet Candell, “Efecto del riego deficitario controlado en el cultivo de pimiento (*Capsicum annum L.*) Utilizando la tina de evaporación clase a, en Río Verde, Santa Elena, Ecuador,” *Revista Ciencia e Investigación*, vol. 5, no. 1, pp. 114–124, 2020, doi: 10.5281/zenodo.3599163.

[11] J. R. Valenzuela-García, B. E. De la Peña-Casas, and T. Gaytán-Muñiz, “Agricultura 4.0,” *Revista Agraria*, no. SE1, p. 3, May 2023, doi: 10.59741/agraria.v19iSE1.4.

[12] F. C. Lisbinski, D. D. Mühl, L. De Oliveira, and D. A. Coronel, “Perspectivas e desafios da Agricultura 4.0 para o setor agrícola,” VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio, p. 10, Nov. 2020.

[13] D. K. Shannon, D. E. Clay, and N. R. Kitchen, *Precision Agriculture Basics*. in ASA, CSSA, and SSSA Books. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2018. doi: 10.2134/precisionagbasics.

[14] I. Zambon, M. Cecchini, G. Egidi, M. G. Saporito, and A. Colantoni, “Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs,” *Processes*, vol. 7, no. 1, p. 36, Jan. 2019, doi: 10.3390/pr7010036.

[15] L. E. Barreto Salazar, “Desarrollo Del Control De DPV Para Cultivo Hidropónico En Un Microclima Artificial,” *Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacan, Sinaloa*, 2023.

[16] S. Pallavi, J. D. Mallapur, and K. Y. Bendigeri, “Remote sensing and controlling of greenhouse agriculture parameters based on IoT,” in 2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIG), IEEE, Dec. 2017, pp. 44–48. doi: 10.1109/BID.2017.8336571.

[17] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2010.

[18] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, “A review of PID control, tuning methods and applications,” *Int J Dyn Control*, vol. 9, no. 2, pp. 818–827, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.



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



Roel Urquidez Lopez, Estudiante Ing. Electrónica, Tecnológico Nacional De México, Campus Culiacán.



Rios Torres David, Estudiante Ing. Electrónica, 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).



Julio Cesar Picos Ponce Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV del 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 CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara.

# Viabilidad sostenible de sistemas de alumbrado público y videovigilancia alimentados con energía solar fotovoltaica en las Islas Galápagos

## Sustainable viability of public lighting and video surveillance systems powered by photovoltaic solar energy in the Galapagos Islands

Daniel Icaza Álvarez<sup>1</sup>, Fernando González-Ladrón-de-Guevara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Cuenca, Centro de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica, Cuenca, Ecuador, dicazaa@cacue.edu.ec

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

### Resumen

El interés por sistemas de alumbrado público y videovigilancia en sitios específicos de las Islas Galápagos asistidos por energía solar fotovoltaica es reconocido como una solución efectiva y un aporte a los procesos de transición energética que lleva adelante el Archipiélago. Este estudio evalúa y compara la viabilidad económica de dos tipos de sistemas: conectados a la red y aislados para la operación de sistemas de alumbrado público y video vigilancia en las Islas Galápagos. Se evalúan dos sistemas de paneles solares con y sin conexión a la red en un período de un año calendario. Se desarrolla un modelo de simulación del sistema para su funcionamiento en diferentes condiciones ambientales. Los resultados muestran que, para sistemas de alumbrado público y videovigilancia donde se utilizan paneles solares fotovoltaicos de silicio monocristalino, estos presentan una operación normal gracias a la posible generación eléctrica, logrando menores emisiones y mayor desempeño ambiental. Se han considerado 150 emplazamientos en los que se pueden implantar estos pequeños sistemas en una primera fase. Se incluye el uso de energía solar fotovoltaica por ser renovable y acogida por los gobiernos locales del Archipiélago de Galápagos.

**Palabras clave:** Energía solar fotovoltaica, Transición energética, Alumbrado público, Videovigilancia, Energías renovables, Galápagos.

### Abstract

The interest in public lighting and video surveillance systems in specific sites of the Galapagos Islands assisted by solar photovoltaic energy is recognized as an effective solution and contribution to the energy transition processes carried out by the Archipelago. This study evaluates and compares the economic viability of two types of systems: connected to the grid and isolated for the operation of public lighting and video surveillance systems in the Galapagos Islands. Two solar panel systems with and without connection to the grid are evaluated in a period of one calendar year. A simulation model of the system is developed for operation in different environmental conditions. The results show that, for public lighting and video surveillance systems where monocrystalline silicon photovoltaic solar panels are used, these present a normal operation thanks to the possible electrical generation, achieving lower emissions and greater environmental performance. 150 sites were considered where these small systems can be implemented for a first stage. The use of photovoltaic solar energy is included as it is renewable and welcomed by local governments of the Galapagos Archipelago.

**Keywords:** Photovoltaic solar energy, Energy transition, Public lighting, video surveillance, Renewable energy, Galapagos

Recibido: 10/01/2025; Aceptado 21/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introduction

### General Context

Renewable energies are energy sources that are gaining popularity due to the level of development and the solutions they continue to provide to society [1]. Their defining characteristic is their ability to regenerate naturally without depletion [2]. They are considered fundamental and transcendental during the energy transition that aims to abandon fossil fuels, thus counteracting global warming [3].

According to reference [4], globally in 2021, fossil fuels accounted for 83%, renewable energy, mainly hydroelectric, wind and solar, accounted for 12.6%, and nuclear energy accounted for 4.4% of total energy consumption in 2020. In the case of Galapagos, around 83.6% of the energy supply depends on the use of fossil fuels, which pollute the air, land and sea, so local and national initiatives are required to transform its energy matrix into a much more sustainable one [5]. They are considered clean energies that protect the environment and human health [6].

### Photovoltaic Solar Energy

Among renewable energy technologies, solar energy systems have experienced significant advancements [7]. Solar panels have become a suitable option for making the best use of solar radiation during the day and converting it into energy [8]. The challenge for researchers is always to achieve greater performance through increasingly sophisticated materials and internal arrangements that operate effectively [9]. Photovoltaic solar energy production systems have achieved a significant level of maturity in recent years and are still far from reaching their maximum ceiling; they continue to develop and be applied at the same time [10]. The energy market increasingly relies on this renewable source, and it is the hope of many countries, regions, and communities to carry out their energy transition processes [11].

### Application in Galapagos

Currently, countless applications integrate photovoltaic (PV) solar systems, including those for public lighting, video surveillance systems, applications at the home level, land and sea transport, etc. [12]. Several systems operate connected to the grid or autonomously, depending

greatly on the geographic location of the sites of interest [13]. In the case of studies that integrate photovoltaic systems into heritage sites, the legal regulations that govern these sites must be fully considered, considering that it is possible to protect the environment while protecting the built or natural heritage [14]. The case of the Galapagos Islands is considered a highlight as it is a World Heritage Site and must be protected as it is one of the most sensitive sites of high global interest [15]. In this archipelago, unique on the planet due to its wealth of flora and fauna, it is essential to identify effective strategies to reduce dependency on fossil fuels and harness one of its most abundant resources, such as solar radiation [16].

Regarding public lighting, the defined sites of interest must remain illuminated to provide better service to tourists and native people of the place [17]. Implementing public lighting systems massively is impossible due to their effect on the species; thorough studies are required. It is necessary to maintain appropriate rest without light sources that, in many cases, are confused with the moon, as is the case with turtles [18]. Likewise, the color of the emitted light also plays an important role [19]. This is the subject of further research, and one of the researchers, Santiago Pulla Galindo, is focused on and constantly researching visible light [20].



(a)



(b)

**Figura 1.** Solar energy systems for Galapagos. (a) Public lighting systems using solar panels. (b) New video surveillance systems using solar PV systems.

Additionally, comprehensive video surveillance systems are being deployed throughout the Galapagos Islands. These systems serve a dual purpose: protecting the Archipelago's resources and monitoring tourist activities to ensure compliance with legal regulations while providing security against potential adverse weather events [21].

Galapagos, despite having an important resource such as solar radiation, only uses 4.9% to supply energy through solar panels, this implies the need for planning to make better use of this resource [22]. One of the alternatives is to use the roofs of homes and buildings to generate their own energy and inject the surplus into the public network.

Figure 1a shows an example of a public lighting system with solar panels in the Galapagos Islands. Figure 1b shows the installation of a video surveillance system on the beaches of San Cristobal Island in the Galapagos.

### Study Objectives

This research aims to:

- Evaluate and compare the economic viability of two types of photovoltaic systems in the Galapagos Islands: grid-connected and isolated systems.
- Analyze the performance of these systems for public lighting and video surveillance operations.
- Determine, through simulation models and year-long data collection, the optimal configuration for sustainable energy solutions.
- Provide recommendations that respect the unique environmental requirements of this World Heritage site while ensuring reliable power supply.

The findings of this study will contribute to the ongoing energy transition efforts in the Galapagos Islands while establishing a framework for similar implementations in other protected areas worldwide.

### Review of previous work

The generation of energy from distributed photovoltaic systems is carried out on a small and large scale [23], [24]. On a small scale, they are used directly to supply the load for specific applications such as those presented in this study [25]. On a large scale, their territorial reach is wide, so they can supply regions [26], countries [27], islands [28] or communities [29]. Several authors discuss how these systems can be best used and have developed several techno-economic analyses and long-term designs. Among the techno-economic analyses: Muhammad Shahzad Javed et al. [30] performed a techno-economic evaluation of a stand-alone solar-wind-battery hybrid system for a

remote island using a genetic algorithm. The performance, effects of loss of power supply probability (LPSP), load variation and renewable energy resources, and the system costs involved were analyzed. Mohd Bin Mohd Azlan et al. [31] analyzed the feasibility of an integrated renewable energy system composed of PV-wind-hydro-biogas using the HOMER optimization tool. The current net cost of the PV-W-H-B configuration was RM 130k and that of the highest PV-W-H was RM 231k. Abdulla Al Wahedi and Yusuf Bicer [32] performed a techno-economic optimization of new stand-alone electric vehicle charging stations based on renewable energy in Qatar. The net present cost of the optimal cases ranges from \$2.53 million to \$2.92 million, and the cost of electricity ranges from \$0.285 to \$0.329 per kWh. Mohan L. Kolhe et al. [33] performed a technical-economic sizing of an off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka. This system was able to supply electricity at an approximate levelized cost of 0.3 \$/kWh.

Regarding large-scale studies, Vasilis Fthenakis et al. [34] raised in their study the technical, geographic, and economic feasibility of solar energy to supply the energy needs of the US. Based on the expected improvements of PV technologies, the authors showed that with this technology it is possible to supply 69% of the total electricity needs and 35% of the total energy needs of the US by 2050. Amrita Sen et al. [35] in their recent study consider it important to design roadmaps for the transition towards value chains with net zero emissions, focusing on the chemical industry. Steven Chu et al. [36] outlined the path towards sustainable energy, in their study they emphasize that research in materials science is contributing to progress towards a sustainable future. Nian Liu et al. [37] identified rice husks as a sustainable source of nanostructured silicon for high-performance lithium-ion battery anodes, proving useful for renewable energy backup systems. Alla Toktarova et al. [38] performed a high-resolution long-term load projection for all countries in the world. They identified in their model that the sum of several sine functions can be used to project and calibrate electricity demand for any country in any year of a given period. Jun-Ki Choi and Vasilis Fthenakis [39] considered it relevant to carry out crystalline silicon photovoltaic recycling, so they consider planning from now on from the macro and micro perspectives.

## Methodology

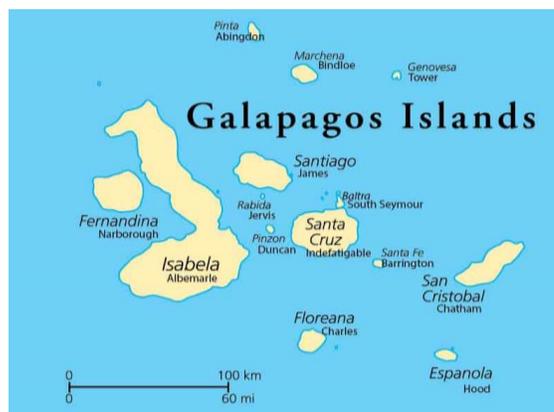
### Process

In this study, computer-based renewable energy simulation tools were used, with previously obtained meteorological data. The Ecowitt EasyWeather-WIFI3B45 station was previously installed on San Cristóbal Island, and its data are recorded in the Laboratorio de

Energías Renovables y de Simulación en Tiempo Real (ENERSIM) of the Universidad Católica de Cuenca. The data were subsequently analyzed and typical solar irradiation and ambient temperature profiles that influence the production of electrical energy were obtained. Finally, the simulated results are presented in terms of power. With these results, the deployment options for these small photovoltaic solar energy infrastructures that are useful for public lighting and electricity supply for video surveillance systems in the Galapagos Islands can be analyzed.

### Research location

The Galapagos Islands, also named as the Galapagos Islands and officially known as the Archipelago of Colón or the Galapagos Archipelago. They were declared a World Heritage Site by UNESCO and a Biosphere Reserve. In Ecuador, they are a true living laboratory; it is the second largest marine reserve on the planet. It is said that the Islands themselves are a visible paradise. Those who are willing to explore the coasts of the islands and enter aquatic sites are amazed and recognize that the best is under water, where countless species that have never been seen before can be seen. The Galapagos National Park was created in 1959 and covers 97% of the surface of the archipelago. The remaining 3% of the surface is inhabited on the 4 islands, Santa Cruz, San Cristóbal, Isabela and Floreana. Figure. 2 shows the conformation of the Galapagos Archipelago.



*Figura 2. Galapagos Islands of Ecuador.*

### Mathematical Model

In the mathematical model of the solar panel shown below in figure 3, the most representative parameters that will affect the production of electrical energy by taking advantage of solar radiation are considered. This process involves determining the meteorological aspects of the Galapagos Islands that will directly influence the production of energy for both the lighting systems and the video surveillance systems.

### Photovoltaic System

The union of several cells or solar cells forms the photovoltaic solar panel. For the analysis of energy production as other systems are modeled such as transmission lines, electrical machines and other equipment, it is possible to easily evaluate their operation. For this reason, an equivalent circuit is available that represents the solar cells as shown in figure 3.

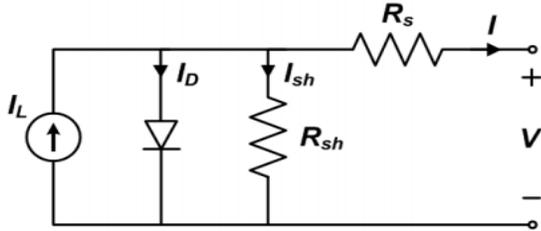


Figura 3. Mathematical model of the solar photovoltaic module.

Equations (1)-(4) are those that represent the mathematical model expressed above regarding the behavior of photovoltaic cells.

$$I = I_{Scr} + \frac{K_i(T-298)G}{1000} \quad (1)$$

$$I_D = I_{Scr} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 * e^{\frac{qV_{oc}}{Bk} * \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)} \quad (2)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{Scr}}{e^{\frac{qV_{oc}}{N_s k A T}} - 1} \quad (3)$$

$$I = N_p I_L - N_p I_D * \left( e^{\frac{q(V_{PV} + I_{PV} R_s)}{N_s A k T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Where:

- K: Boltzman constant.
- Ns, Np: Number of solar cells in series and parallel.
- q: Charge of the electron.
- Rs : Series resistor
- T: Working temperature of the solar panel in °C.
- Rp : Parallel resistance.
- ID: Inverse saturation current of the diode.
- IL: Short-circuit current Isc.
- Voc: Open circuit voltage.

The energy absorbed by the photovoltaic system as a function of solar radiation is expressed by Equation 5;

$$P_{pv} = \eta_p * A * G_1 \quad (5)$$

Where;

- $\eta_p$  = Solar collector efficiency.
- A = Solar collector area (m2)
- $G_1$  = Solar irradiation (W/m2).
- $\eta_{pv}$  = Photovoltaic system performance.

### Battery charging

During the charging period, the voltage-current relationship can be described [9, 10];

$$V = V_1 + \frac{i \left( \frac{0.189}{(1.142 - soc) + R_i} \right)}{AH} + (soc - 0.9) \ln \left( 300 \frac{i}{AH} + 1.0 \right) \quad (6)$$

$$V_1(V) = 2.094[1.0 - 0.001(T - 25^\circ C)]$$

$R_i$  : Internal resistance of the cell.

$T$ : Ambient temperature.

$AH$ : Ampere hour rating of the battery.

$$P = V I_{OUT} \quad (7)$$

Where  $I_{OUT}$  represent the total output current in DC.

### System and component configuration

Public lighting systems or video surveillance systems are supplied by photovoltaic solar energy. In figure 4(a) the system connected to the public electricity grid is presented, in this case ELECGALAPAGOS EP is the supplier and the other is the system presented in figure 4(b) completely isolated, which are basically the video surveillance systems that are in remote areas and far from the public grid, there are also specific points or riverbanks where isolated public lighting is important for specific tourism. The grid-connected system presented in figure 4(a) has a direct current photovoltaic solar panel, a DC battery as an electricity storage system, as well as an inverter that converts electricity from DC to AC.

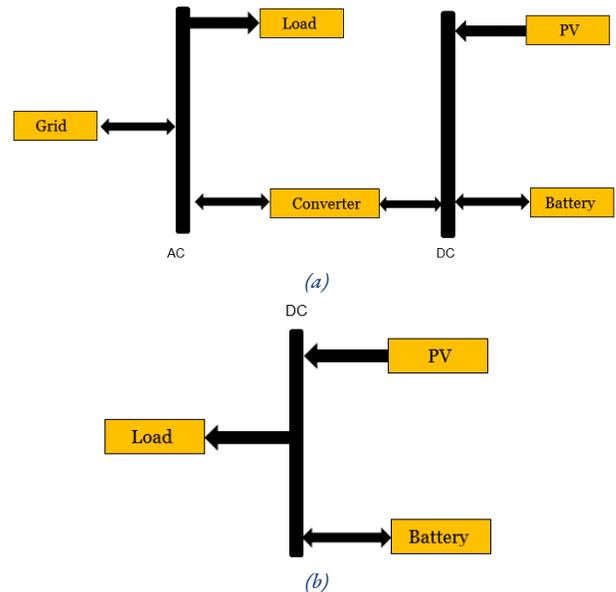
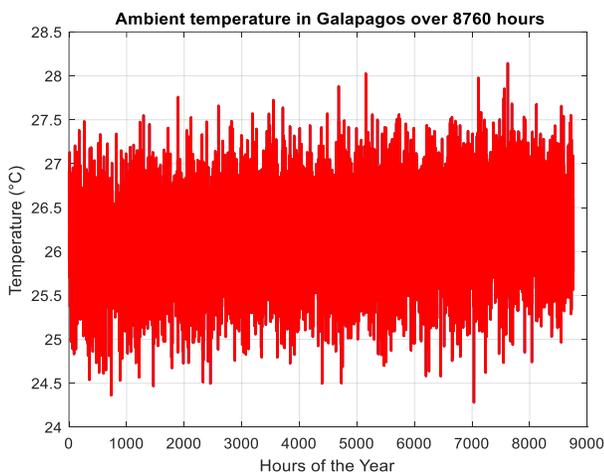


Figura 4. System Settings. (a) On grid connected photovoltaic system. (b) Off-grid photovoltaic system.

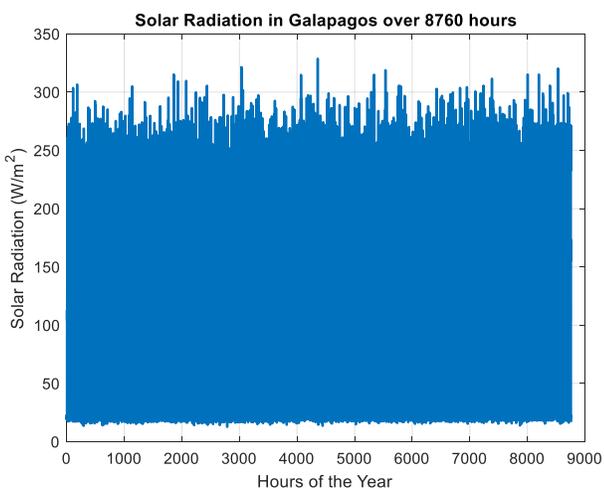
The configuration of the isolated system is much simpler than the one connected to the public grid, as presented in figure 4(b), it has a solar panel and a storage system.

**Data input**

Below are the data recorded by measurements made in the Galapagos Islands using the Ecowitt EasyWeather-WIFI3B45 meteorological station, which records, among other parameters, ambient temperature and solar radiation. Although there are data for a longer period of time, the data were taken in a single calendar year (8760 h) from January 1, 2024 to December 31, 2024. Figure 5(a) shows the ambient temperature profile, which generally ranges between 24.5°C and 27.5°C. figure 5(b) shows the solar radiation profile.



(a)



(b)

Figura 5. Meteorological profiles in the Galapagos Islands. (a) Ambient temperature. (b) Solar radiation.

Subsequently, based on a priority analysis according to the places frequented by tourists where the flora and fauna are not affected, the

public lighting points were projected, which in their majority must be replaced by the current systems based on incandescent bulbs but maintaining the appropriate colorimetry and lighting levels. The video surveillance systems were also projected to maintain the order and security of the visitors and original inhabitants of the islands. These systems also have the possibility of alerting through loudspeakers in case of any natural or other threat, situations that fortunately are not common on the islands but may arise in the future. Figure 6 shows the 150 specific points (blue) where these small systems are beginning to be installed, considered for a first stage.

By bringing the operating voltage closer to the highest power point, we are implementing the MPPT for variable weather conditions.



Figura 6. Specific sites where it is recommended to continue replacing photovoltaic systems for public lighting and to continue installing video surveillance systems.

The operation of the solar cells depends fundamentally on the levels of solar radiation available in the archipelago. The ambient temperature is important when designing a system for better use of the equipment. The solar panel is integrated with a DC-DC converter and a control algorithm to permanently track the maximum power.

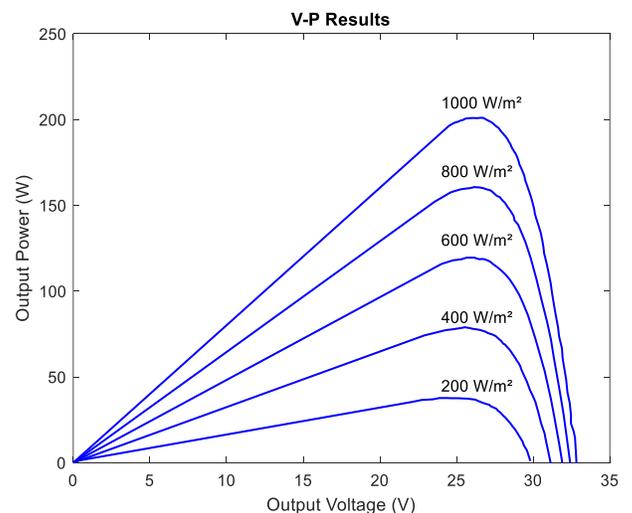


Figura 7. V-P results of a solar panel at different levels of solar radiation.

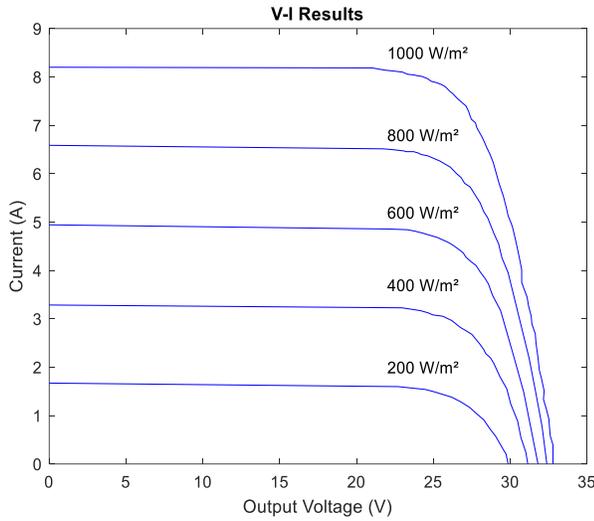


Figura 8. V-I results of a solar panel at different levels of solar radiation.

The MPPT provides the constant voltage to the required load. The photovoltaic arrays are evaluated using the P-V and V-I graphs under different solar radiation conditions. The desirable value is a higher solar radiation value, of course, this no longer depends on the installed system, but rather on the environmental conditions of the place. The curves drawn are not linear, as can be seen in figure 7 and figure 8.

## Results

The results are expressed in power values, charge and discharge levels of the storage system. The power generated by the solar panel is calculated based on the irradiance and efficiency of the panel. The power is limited to 300 W due to the maximum power of the panel. The load is 180 W, a maximum of 20% variability in the load is considered. The SOC is updated every hour considering the power generated by the solar panel and the energy consumed by the load. The SOC never falls below 40%. The variation of the SOC (dSOC) is calculated as the difference between the current SOC and the previous SOC. Four graphs are presented in figure 9 as general results over the span of 8760 hours of the year. The first graph shows the power generated by the solar panel throughout the year. The second graph shows the SOC of the battery during the year. The third graph shows the variation of the SOC (dSOC), which indicates how the SOC changes hour by hour. The fourth graph shows the variable charging power consumed during the year. The power generated by the solar panel will follow a daily pattern, with peaks during the day and zero at night.

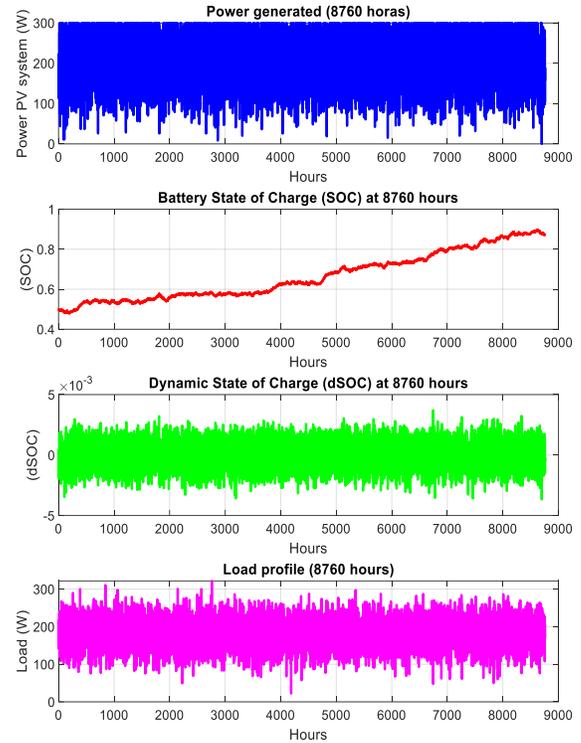


Figura 9. General results of the off-grid PV solar system for the Galapagos Islands evaluated for a calendar year.

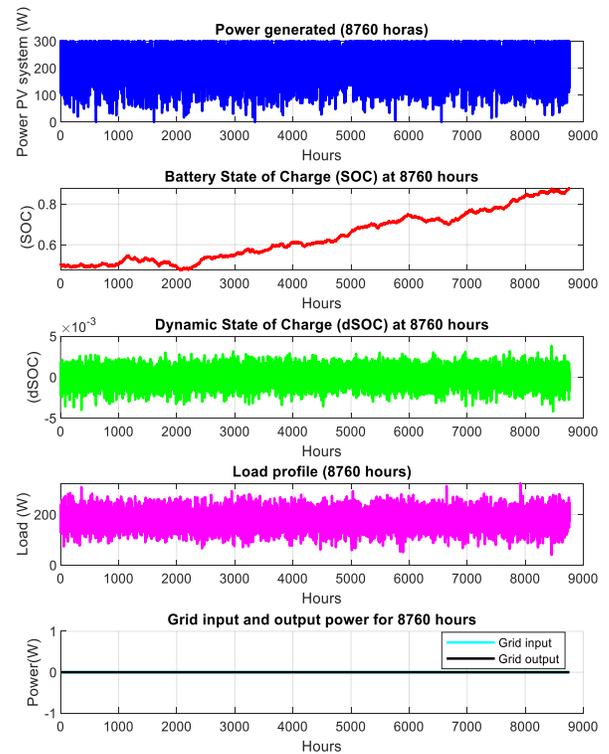


Figura 10. General results of the on-grid PV solar system for the Galapagos Islands evaluated for a calendar year.

Figure 10, presents the results obtained from the simulation for a calendar year (8760 hours) of the on-grid system. The same parameters of the previously analyzed system are considered, now the connection is to the public electrical grid. Given the importance of these systems and the need to guarantee the continuity of the service, a battery system was included, as well as the possibility of maintaining connection to the grid for events that may occur such as scheduled maintenance or untimely outages. It can be seen in the last graph of figure 10 that throughout the year no energy would be absorbed from the grid. However, in reality it is possible that in short periods of time it may be necessary to take energy from the grid for the reasons explained above.

## Conclusions

Small photovoltaic solar energy systems represent an important alternative to solve everyday problems that arise. Lighting services in strategic sites of the Galapagos Islands are unavoidable and must be attended to in the most appropriate and prompt way possible. In the same way, security is a duty of the Ecuadorian state towards citizens, both national and foreign, so it must be channeled in the best possible way. The systems proposed here are sustainable alternatives and do not affect the environment; on the contrary, they promote the energy transition processes necessary for sites as important to humanity as Galapagos. These infrastructures are easy to implement, they require adequate profiles and do not generate anomalous visual effects. On the contrary, they are safe and sufficient to support the weight of the panels and complementary equipment that go in a box at a considerable height, while the batteries would be at an average height of 1.20 m from the floor. The Galapagos Islands are considered a special regime of Ecuador, they are regulated in relation to human settlements and require adequate services such as electricity and security.

As future work, it is planned to evaluate the solar photovoltaic component within the general energy mix. A long-term energy transition process is being proposed and solar photovoltaic systems will play a leading role in the future. Solar panel farms are also planned at specific points to reduce the use of fossil fuels, which is the objective of the Ecuadorian state. Currently, there are light pollution measurement systems to monitor the starry vault of the entire Puerto Baquerizo Moreno and identify to what extent the lighting systems are creating reflections towards the outside of the islands.

## References

- [1] M. Rambabu, R. S. S Nuvvula, P. P. Kumar, K. Mounich, M. E. Looor-Cevallos, and M. Gupta, "Integrating Renewable Energy and Computer Science: Innovations and Challenges in a Sustainable Future," in 2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Aug. 2023, pp. 472–479. doi: 10.1109/ICRERA59003.2023.10269392.
- [2] S. Gawusu et al., "Renewable energy sources from the perspective of blockchain integration: From theory to application," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 52, p. 102108, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102108.
- [3] J. Sanz Cedrón, "Measuring transition risk in the energy sector: evidence of a green factor influence on stock returns," 2023, Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/78738>
- [4] J. L. Holechek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, and R. Valdez, "A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?," *Sustainability*, vol. 14, no. 8, p. 4792, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14084792.
- [5] A. Barreto-Cuesta, A. Zakaria, V. Herrera-Perez, and S. Z. Djokic, "Transition to a 100 % renewable power supply in galapagos islands: Long-term and short-term analysis for optimal operation and sizing of grid upgrades," *Renew. Energy*, vol. 234, p. 121207, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121207.
- [6] M. Yadav, R. Aneja, and W. Ahmed, "Do clean energy transition, environment degradation, and energy efficiency influence health expenditure: Empirical evidence from emerging countries," *J. Clean. Prod.*, vol. 428, p. 139355, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139355.
- [7] A. C. Lazaroiu, M. Gmal Osman, C.-V. Strejoiu, and G. Lazaroiu, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, p. 16297, Jan. 2023, doi: 10.3390/su152316297.
- [8] A. Shufian, Md. Z. Hossain, S. Mazumder, S. Kabir, M. S. Rashid Mahin, and N. Mohammad, "Investigating Clean Energy Generation from Unoccupied Roof-top Space in University Premises," in 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM), May 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236170.
- [9] R. Dallaev, T. Pisarenko, N. Papež, and V. Holcman, "Overview of the Current State of Flexible Solar Panels and Photovoltaic Materials," *Materials*, vol. 16, no. 17, p. 5839, Jan. 2023, doi: 10.3390/ma16175839.
- [10] T. Rehman et al., "Global perspectives on advancing photovoltaic system performance—A state-of-the-art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 207, p. 114889, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.114889.
- [11] F. J. M. M. Nijssse et al., "The momentum of the solar energy transition," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 6542, Oct. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41971-7.
- [12] B. Singh and C. Kaunert, "Photovoltaic (PV) Glass for Smart City and Sustainability: Solar Energy Integration Tumbling Impacts on Human Healthcare and Environment," in *Explainable Artificial Intelligence and Solar*

- Energy Integration, IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 227–252. doi: 10.4018/979-8-3693-7822-9.ch008.
- [13] J. Rodríguez and P. Cortes, “Model Predictive Control,” in *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*, IEEE, 2012, pp. 31–39. doi: 10.1002/9781119941446.ch3.
- [14] E. Lucchi, “Chapter 8 - Active solar design principles for natural and architectural heritage,” in *Solar Energy Technologies in Cultural Heritage*, E. Lucchi, Ed., Elsevier, 2025, pp. 215–259. doi: 10.1016/B978-0-443-23989-2.00008-2.
- [15] J. Ayala-Pico, D. Arcos-Aviles, A. Ibarra, C. Fernandez, F. Guinjoan, and W. Martinez, “Current development of electricity generation systems in the Galapagos Islands – Ecuador,” *Renew. Energy Focus*, vol. 46, pp. 88–102, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ref.2023.06.003.
- [16] P. A. Vega-Mariño, I. A. Jimenez, T. Villacres, and E. L. Houck, “Review of One Health in the Galápagos Islands (Part 2): climate change, anthropogenic activities, and socioeconomic sustainability,” *Front. Conserv. Sci.*, vol. 5, Oct. 2024, doi: 10.3389/fcosc.2024.1351716.
- [17] C. Mateus et al., “Anthropogenic emission inventory and spatial analysis of greenhouse gases and primary pollutants for the Galapagos Islands,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 26, pp. 68900–68918, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26816-6.
- [18] A. K. Jägerbrand and C. A. Bouroussis, “Ecological Impact of Artificial Light at Night: Effective Strategies and Measures to Deal with Protected Species and Habitats,” *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 5991, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13115991.
- [19] J. Lin et al., “Several biological benefits of the low color temperature light-emitting diodes based normal indoor lighting source,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 7560, May 2019, doi: 10.1038/s41598-019-43864-6.
- [20] S. P. Galindo, D. Borge-Diez, and D. Icaza, “Special Regime - Galapagos islands’ analysis of the electricity and public lighting service: Current status,” *Energy Strategy Rev.*, vol. 54, p. 101452, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101452.
- [21] L. Mai, “Navigating transformations: Climate change and international law,” *Leiden J. Int. Law*, vol. 37, no. 3, pp. 535–556, Sep. 2024, doi: 10.1017/S0922156524000062.
- [22] F. Vega, “¿Quién se beneficia de la Energía subsidiada en Galápagos?” *Bitácora Ambiental*. Accessed: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.bitacoraecc.com/post/copia-de-quié-n-se-beneficia-de-la-energía-subsidiada-en-galápagos>
- [23] M. R. Tur, İ. Colak, and R. Bayındır, “Effect of Faults in Solar Panels on Production Rate and Efficiency,” in *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Dec. 2018, pp. 287–293. doi: 10.1109/ISGWCP.2018.8634509.
- [24] R. Cossent, T. Gómez, and L. Olmos, “Large-scale integration of renewable and distributed generation of electricity in Spain: Current situation and future needs,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 12, pp. 8078–8087, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.069.
- [25] R. Panigrahi, S. K. Mishra, S. C. Srivastava, A. K. Srivastava, and N. N. Schulz, “Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network—A Review,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 3178–3195, May 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2979789.
- [26] D. Icaza-Alvarez, F. Jurado, and M. Tostado-Véliz, “Smart energy planning for the decarbonization of Latin America and the Caribbean in 2050,” *Energy Rep.*, vol. 11, pp. 6160–6185, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.05.067.
- [27] F. Cucchiella, A. Conde, M. Rotilio, and V. Annibaldi, “Energy Transitions in Western European Countries: Regulation Comparative Analysis,” *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 3940, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14133940.
- [28] A. S. Sánchez, E. P. Junior, B. M. Gontijo, P. de Jong, and I. B. dos Reis Nogueira, “Replacing fossil fuels with renewable energy in islands of high ecological value: The cases of Galápagos, Fernando de Noronha, and Príncipe,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 183, p. 113527, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113527.
- [29] F. Envall, D. Andersson, and J. Wangel, “Gridlocked: Sociomaterial configurations of sustainable energy transitions in Swedish solar energy communities,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 102, p. 103200, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103200.
- [30] M. S. Javed, A. Song, and T. Ma, “Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm,” *Energy*, vol. 176, pp. 704–717, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.131.
- [31] M. A. Mohd. Azlan, Z. Ab Muis, W. S. Ho, and L. K. Lim, “Feasibility of an integrated renewable energy system (PV-wind-hydro-biogas) by HOMER optimization,” presented at the 2nd Process Systems Engineering and Safety Symposium 2021, ProSES 2021, Pahang, Malaysia - Virtual, Online, Sep. 2023, p. NA-NA. Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0148587>
- [32] A. Al Wahedi and Y. Bicer, “Techno-economic optimization of novel stand-alone renewables-based electric vehicle charging stations in Qatar,” *Energy*, vol. 243, p. 123008, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.123008.
- [33] M. L. Kolhe, K. M. I. U. Ranaweera, and A. G. B. S. Gunawardana, “Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 11, pp. 53–64, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.seta.2015.03.008.
- [34] V. Fthenakis, J. E. Mason, and K. Zweibel, “The technical, geographical, and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 387–399, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.08.011.
- [35] A. Sen, V. Thakker, G. Stephanopoulos, and B. R. Bakshi, “Designing roadmaps for transitioning to value chains with net-zero emissions: Case of the chemical industry,” in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 52, A. C. Kokossis, M. C. Georgiadis, and E. Pistikopoulos, Eds., in *33 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, vol. 52, Elsevier, 2023, pp. 2483–2488. doi: 10.1016/B978-0-443-15274-0.50395-4.
- [36] S. Chu, Y. Cui, and N. Liu, “The path towards sustainable energy,” *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 16–22, Jan. 2017, doi: 10.1038/nmat4834.

- [37] N. Liu, K. Huo, M. T. McDowell, J. Zhao, and Y. Cui, “Rice husks as a sustainable source of nanostructured silicon for high performance Li-ion battery anodes,” *Sci. Rep.*, vol. 3, no. 1, p. 1919, May 2013, doi: 10.1038/srep01919.
- [38] A. Toktarova, L. Gruber, M. Hlusiak, D. Bogdanov, and C. Breyer, “Long term load projection in high resolution for all countries globally,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 111, pp. 160–181, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.055.
- [39] J.-K. Choi and V. Fthenakis, “Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 443–449, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.022.

## Author Biographies



Daniel Icaza Álvarez, Coordinador del Centro de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica, Laboratorio de Energías Renovables y Simulación en Tiempo Real (ENERSIM), Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.



Fernando González Ladrón de Guevara, Profesor a Tiempo Completo en la Universitat Politècnica de València, Valencia, España

# Transición Energética para un Mundo más Sostenible: Análisis de Percepciones y Desafíos Actuales

## Energy Transition for a More Sustainable World: Analysis of Current Perceptions and Challenges

Samantha C. Ramos Tirado<sup>1</sup>, Hugo A. Vargas Tirado<sup>1</sup>, Isaac K. Fernández Pérez<sup>1</sup>, Marco A. Núñez Martínez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Sinaloa, Programa Académico de Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible. 2024030012@upsin.edu.mx

### Resumen

La transición energética ha tomado poder en los últimos años, gracias a las preocupaciones medioambientales debido a las emisiones de GEI, el agotamiento de los recursos no renovables como el petróleo y el desarrollo de nuevas tecnologías, aunado a ello las políticas y acuerdos entre naciones para llegar a un mundo más sostenible, entendiendo como sostenibilidad al desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente, ha ayudado a acelerar dicho proceso de transformación. Sin dejar atrás los inmensos avances que se han tenido para desarrollar tecnologías que permitan reducir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de GEI (tecnología fotovoltaica, eólica, geotérmica, etc.). Expertos en el tema han expresado su preocupación, no solo por el posible agotamiento de los combustibles fósiles, sino también por la exhaustiva explotación desde los años 70's a los recursos no renovables, produciendo graves alteraciones naturales que necesitan ser frenadas antes de llegar al 2050. Los resultados obtenidos de un sondeo mostraron que uno de los principales retos ante una transición energética es la percepción y opinión de la sociedad sobre esta, evaluadas en este mismo documento. Además, la perspectiva pública sobre temas en materia de energía se puede ver sesgada por la falta de información y educación en el tema. Tomando como referencia los resultados obtenidos de la indagación explicaremos y analizaremos las perspectivas del público destino del sondeo digital realizado

**Palabras clave:** Transición energética, sustentabilidad, energías renovables, percepción pública.

### Abstract

The energy transition has taken power in recent years, thanks to environmental concerns due to GHG emissions, the depletion of non-renewable resources such as oil and the development of new technologies, coupled with the policies and agreements between nations to reach a more sustainable world, understanding sustainability as economic and social development that respects the environment, has helped to accelerate this transformation process. Without leaving behind the immense advances that have been made to develop technologies to reduce the use of fossil fuels and GHG emissions (photovoltaic, wind, geometric, etc.). Experts on the subject have expressed their concern, not only because of the possible depletion of fossil fuels, but also because of the exhaustive exploitation of non-renewable resources since the 1970s, producing serious natural alterations that need to be halted before 2050. The results obtained from a survey showed that one of the main challenges before an energy transition is the perception and opinion of society about it, evaluated in this same document. In addition, the public perspective on energy issues can be biased by the lack of information and education on the subject. Taking as a reference the results obtained from the research, we will explain and analyze the perspectives of the target public of the digital survey carried out.

**Keywords:** Energy transition, sustainability, renewable energies, public perception.

Recibido: 12/12/2024; Aceptado 14/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introducción

### Contexto Global.

El mercado de la energía a nivel global es dominado por los combustibles fósiles, aunque cada día su producción y extracción resultan ser más costosos. Aunado a ello, las reservas de estos sufren de agotamiento, debido a que son fuentes no renovables, lo que significa que una vez agotadas ya no existirán [8].

Para el año 2022 según la Agencia Internacional de Energía (AIE) se dio la primera crisis energética de magnitudes sin precedentes, esto gracias a antecedentes bélicos y de salubridad como la pandemia, que tensó los mercados energéticos y provocó un análisis de las políticas en materia de energía internacionalmente [7]. Además de ello, hubo un alza en la demanda energética mundial de 1.3% [7].

Día a día resulta más urgente la necesidad de completar una transición energética hacia fuentes limpias y renovables, que nos permitan prescindir de una energía generada por combustibles fósiles.

La transición energética impulsada por la preocupación medioambiental debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es un proceso complejo, esto gracias a la desmedida y despreocupada época industrial que se vivió en 1850, emitiendo grandes cantidades de GEI sin saber lo que esto ocasiona en el futuro o, en su defecto, en la actualidad ignorando dichas consecuencias por un bien económico mayor. Desde 1850, gracias a la desmesurada actividad humana, se han emitido 2.351 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>(GtCO<sub>2</sub>) [1]. Lo que equivale a 4,702,000 edificios Burj Khalifa (el edificio más grande del mundo). Tan solo el sector energético es responsable del 65% de estas emisiones a nivel global [4].



Figura 1. Matriz de generación de energía eléctrica en México 2023. Fuente: SENER.

Únicamente en México, se depende 75.67% de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica [7] tal como se muestra en la figura 1. Lo que conlleva un gran número de emisiones hacia la atmósfera.

Gracias a la sobreexplotación de los combustibles fósiles desde los años 70' se está dando el agotamiento del principal campo petrolífero del país, Catarell [6].

Hoy en día, desde que la amenaza del cambio climático se ha situado como un problema de prioridad internacional, en especial desde la firma del Acuerdo de París en 2015, el mundo se encuentra en un proceso de transición hacia una economía global neutra en emisiones de carbono [5].

Para alcanzar una transición energética es necesario llevar a cabo y discutir una serie de políticas y acuerdos entre naciones, interna y externamente, ejemplo de ello son las ODS de la Agenda 2030. Esta es una oportunidad para que los países unidos a la sociedad lleguen a un mundo más sostenible, pensando cómo sostenibilidad en el desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente, es decir, desarrollo soportable en lo ecológico, viable en lo económico, y equitativo en lo social [9].



Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Fuente: ONU.

Y aunque los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) parecen tener un buen fin, la realidad es que el 50% de las metas tienen avances insuficientes, 30% han presentado estancamientos o han retrocedido, siendo las más perjudicadas las metas como pobreza, el hambre y el clima [3].

Ciertamente es imposible trazar un solo camino para todos los países hacia una transición energética prospera, lo que es certero decir es que se necesita un gran compromiso por parte de las naciones para cumplir con los acuerdos y agendas establecidas nacional e internacionalmente. Quizá el motivo fundamental que impulsa la transición energética actual es la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. Este cambio climático es básicamente un aumento de la temperatura global del planeta, que a su

vez conlleva una serie de cambios en los regímenes de precipitación y la disponibilidad de agua dulce, el nivel del mar, la biodiversidad, la producción de alimentos, los vectores de enfermedades, etc. [2].

La transición energética resulta inevitable si queremos tener un mundo habitable para 2050. Según expertos en el tema, si se continúa con la cantidad y ritmo de emisiones, nos quedan 28 años para lograr reducir la elevación de la temperatura a 2°C, y tan solo 9 años para llegar a 1,5°C [1].

Sin embargo, resulta ser imposible prescindir de las energías fósiles de un momento a otro. Debido a que de estas depende gran parte de la economía de sinfines de países. No obstante, se tienen soluciones para una transición paulatina, en la que jugarán un importante rol las regiones ricas en minerales como el litio, cobre o níquel, al igual que las regiones y/o países cuyas reservas de gas sean optimistas y les permitan abandonar gradualmente, y sin representar un riesgo económico, las emisiones sin dejar a un lado los fósiles [1].

Lo que pretende hacer una transición energética es pasar de tecnologías y energías fósiles de altas emisiones a fuentes de energías renovables y limpias, intentando satisfacer las demandas y no afectar la economía de los países [1].

Aunque las preocupaciones ambientales fueron las propulsoras para el inicio de la transición energética, la tecnología también juega un gran papel para el desarrollo de esta. Reflejo de ello es la implementación de tecnologías para la generación de energías renovables, que ha permitido la rebaja de precios [1].

Costo Nivelado de Generación Eléctrica (USD/MWh)

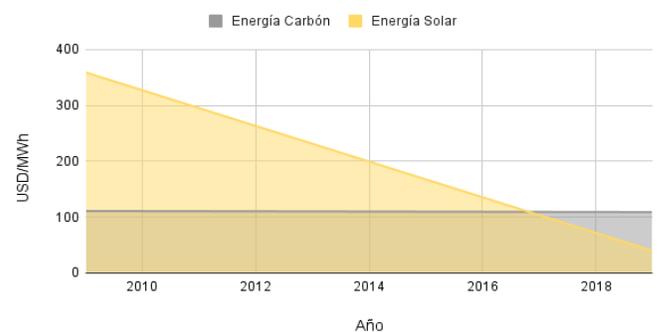


Figura 3. Costo nivelado de Generación Eléctrica de la energía solar y energía proveniente de plantas eléctricas basadas en carbón del año 2009-2019, dólar por Mega Watt por hora.

En 2009, el costo nivelado de la generación de electricidad a partir de paneles solares era de 359 dólares (USD) por megavatio por hora (MWh); en contraste, el de una planta eléctrica basada en el carbón era de USD 111 por MWh. Diez años más tarde, los números son de USD 40 y USD 109 respectivamente [1]. Siendo esto un motor impulsor para la implementación de energías renovables, principalmente la solar, no solo por sus beneficios ambientales, sino también económicos.

A lo largo de este documento no solo se pretende analizar la situación actual de la transición energética nacional e internacionalmente, sino que también se pretende llegar a una comprensión de la opinión y percepción pública que se tiene sobre el tema por medio de un sondeo haciendo uso de herramientas digitales. Aunado a esto, se espera llegar a una asimilación sobre el conocimiento en la materia de la población destino del sondeo.

### Fundamentos de la transición energética.

Puede definirse una transición energética como un cambio significativo en el sistema energético de un país, de una región, incluso, a nivel global [4].

Los modelos de transición energética buscan cambiar progresivamente el sistema energético del país hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la eficiencia energética y diversificar la matriz energética. Algunos de los modelos son:

#### 1. Modelo de Energía Limpia y Descarbonización.

Promueve la transición hacia energías limpias (eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica y biomasa) con el objetivo de descarbonizar la generación de electricidad [7].

#### 2. Modelo de Eficiencia Energética.

Reduce el consumo de energía en sectores clave (industria, transporte, residencial) mediante tecnologías y prácticas de eficiencia energética [15].

#### 3. Modelo de Redes Inteligentes.

Modernizar y digitalizar la red de transmisión y distribución de electricidad para gestionar mejor la generación de energía intermitente proveniente de fuentes renovables y mejorar la eficiencia operativa [7].

#### 4. Modelo de Descentralización Energética.

Su enfoque es facilitar la generación distribuida mediante el uso de pequeñas instalaciones de energías renovables a nivel local (por ejemplo, paneles solares en techos) que reduzcan la dependencia de la red nacional [16].

#### 5. Modelo de Financiamiento Verde y Fondos para la Transición Energética.

Utiliza mecanismos financieros innovadores, como bonos verdes y fondos de inversión sostenible, para canalizar recursos hacia proyectos de energía limpia y eficiencia energética [7].

#### 6. Modelo de Movilidad Sostenible.

Se enfoca en reducir las emisiones del sector transporte, que es uno de los principales consumidores de combustibles fósiles, promoviendo la electrificación y el uso de biocombustibles [7].

#### 7. Modelo de Participación Público-Privada.

Impulsa la transición energética mediante alianzas entre el gobierno y el sector privado, lo que permite un mayor flujo de inversión y la implementación de tecnología avanzada en proyectos de energía limpia.

#### 8. Modelo de Investigación y Desarrollo (I+D) en Tecnologías Limpias.

Impulsa la innovación en tecnologías de energías renovables y eficiencia energética para reducir los costos y mejorar la efectividad de las soluciones energéticas [16].

En la última década y media se ha observado una clara tendencia a la integración energética dentro del proceso de globalización, como es el caso de la Unión Europea (UE), al desarrollo de nuevos mercados globales de energía (especialmente los mercados de gas natural regionales y el mercado global de gas natural licuado).

Estos procesos han tenido lugar gracias al desarrollo de sistemas de redes energéticas con mayor cobertura geográfica, a mejores interconexiones entre sistemas energéticos, a un mallado más profundo y a la creciente integración entre distintos tipos de energía y vectores energéticos (electricidad, gas natural, calor, hidrógeno) [5].

En la Unión Europea, claro ejemplo de una experiencia exitosa, el núcleo de la política energética está formado por una serie de medidas encaminadas a lograr un mercado energético integrando acciones como:

- Garantizar el funcionamiento de un mercado interior de la energía plenamente integrado, fomentando el flujo de energía a través de infraestructuras adecuadas y sin barreras técnicas ni regulatorias.
- Mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de las importaciones de energía, reducir las emisiones e impulsar el empleo y el crecimiento.
- Promover la investigación en tecnologías de energías limpias con bajas emisiones de carbono y priorizar la investigación.
- Opciones para mitigar los altos precios de la energía [10].

### Dimensiones de la transición.

La transición energética se basa en numerosas tecnologías que permiten la generación, almacenamiento y distribución de energías renovables. Estas tecnologías tienen como objetivo aumentar la eficiencia, disminuir las emisiones y electrificar la energía con el fin de lograr que más personas puedan acceder a este bien mediante medios más sostenibles. algunas de las principales tecnologías en la transición energética son: energía solar fotovoltaica y termosolar, energía eólica onshore y offshore, baterías de almacenamiento y almacenamiento de

energía, hidrógeno verde, redes inteligentes (smart grids), captura y almacenamiento de carbono, tecnologías de biogás y bioenergía, energía oceánica y electrificación de vehículos, y movilidad sostenible.

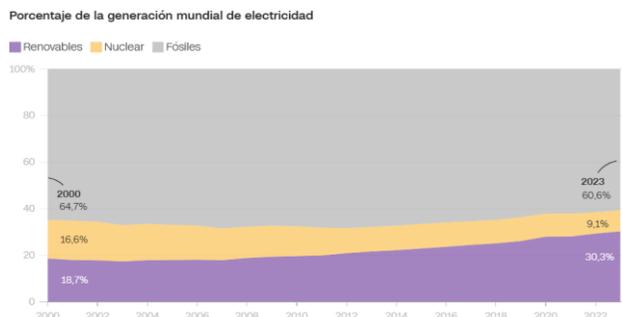


Figura 4. Porcentaje de la generación mundial de electricidad, exponiendo la energía nuclear, fósil y renovable. Fuente: Ember.

La incorporación de estrategias para la integración y alineación de los diferentes sectores económicos con una vinculación eficiente con las organizaciones alineados a programas que promuevan la gestión estratégica para el uso de recursos económicos públicos y privados para el desarrollo de proyectos sustentables y la aplicación de tecnologías renovables, que tengan un impacto positivo en la reducción de la huella de carbono y la ecología, para el transición energética y desarrollo sostenible, un ejemplo es la integración de políticas públicas, en países como Estados Unidos de América, es un paradigma emergente y está en el centro del debate energético, adopta una visión holística de los sectores de electricidad, gas y calefacción para ofrecer un sistema de energía limpia, confiable y asequible [10].

En el contexto de la transición hacia una economía con cero emisiones netas y medioambientalmente sostenible, las redes energéticas se convierten en plataformas imprescindibles para la descarbonización de la economía y el despliegue de tecnologías limpias debido a que tienen un rol protagonista en el ámbito del desarrollo tecnoindustrial y de la innovación. Además, la necesidad de proteger estos activos es cada vez más crítica [5].

#### Marco regulatorio.

Las políticas internacionales buscan coordinar esfuerzos globales para reducir las emisiones de carbono, fomentar el uso de energías renovables y alcanzar los objetivos de sostenibilidad. Estas políticas se articulan a través de acuerdos multilaterales, financiamiento, regulaciones y cooperación entre países. Algunas de esas políticas en las que participa México son:

1. Acuerdo de París (2015).

Objetivo: Limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C, preferiblemente a 1,5 °C, en comparación con niveles preindustriales. Cada país establece sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs) para reducir emisiones, aumentar el uso de energías renovables y mejorar la eficiencia energética [17].

2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (2015).

ODS 7: Energía asequible y no contaminante, con metas para garantizar el acceso universal a servicios energéticos modernos, aumentar la proporción de renovables y duplicar la tasa de mejora en eficiencia energética [3].

ODS 13: Acción por el clima, que apoya las políticas de mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones y la transición energética [3].

3. Acuerdo de Glasgow sobre Emisiones de Metano.

Objetivo: Reducir las emisiones globales de metano en al menos un 30% para 2030, en comparación con los niveles de 2020.

4. Misión Innovación (Mission Innovation).

Objetivo: Impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías de energía limpia con financiamiento público y privado.

5. Alianza Internacional de Energía Solar (ISA).

Objetivo: Promover el desarrollo y despliegue de energía solar, especialmente en países con alta radiación solar, para asegurar acceso a energía limpia y asequible [7].

México cuenta con un conjunto de marcos normativos nacionales que sustentan su compromiso con la transición energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos marcos normativos establecen los lineamientos, las metas y las políticas para promover el uso de energías renovables, mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental del sector energético. Algunos de esos marcos normativos son:

1. Ley de Transición Energética (LTE).

Objetivo: regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos [11].

2. Ley General de Cambio Climático (LGCC).

Objetivo: Regular en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico [12].

3. Ley de la Industria Eléctrica (LIE).

Objetivo: Promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes [13].

4. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE).

Objetivo: Regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética [14].

5. Programa Especial de Transición Energética (PETE).

Objetivo: Planificar las acciones necesarias para cumplir con los objetivos de la Ley de Transición Energética y las metas de reducción de emisiones establecidas en la LGCC.

6. Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

Objetivo: Establecer criterios técnicos y requisitos mínimos de eficiencia energética y sostenibilidad en productos, instalaciones y procesos.

7. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN).

Objetivo: Establecer un plan de desarrollo a 15 años para la infraestructura de generación, transmisión y distribución de electricidad en México.

8. Estrategia Nacional de Energía (ENE).

Objetivo: Definir una política energética a largo plazo para garantizar el abastecimiento de energía y promover el desarrollo sostenible del sector.

9. Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC).

Objetivo: Establecer una ruta para alcanzar las metas de reducción de emisiones y adaptación al cambio climático.

10. Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

Objetivo: Financiar proyectos y programas que apoyen la transición energética y promuevan la eficiencia energética.

México cuenta con una variedad de incentivos y mecanismos de apoyo para promover la transición energética, tanto a nivel nacional como regional, los cuales buscan incentivar el desarrollo y adopción de energías limpias, mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. algunas de ellos son:

1. Certificados de Energías Limpias (CELs).

Emitidos por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para incentivar la generación de electricidad a partir de fuentes limpias.

2. Exenciones fiscales y deducciones aceleradas.

3. Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

4. Subsidios para el uso de energía solar en hogares y pequeñas empresas.

5. Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE).

Ofrece financiamiento para proyectos de eficiencia energética en el sector industrial, comercial y residencial.

6. Financiamiento de la Banca de Desarrollo para Energía Limpia.

7. Incentivos para la movilidad sustentable.

Promover el uso de vehículos eléctricos e híbridos, como exenciones del impuesto de tenencia y placas, descuentos en el pago de peajes y acceso a estacionamientos preferentes.

8. Programa Nacional para el Uso Eficiente de Energía (PRONASE).

Promueve la eficiencia energética en distintos sectores, especialmente en el industrial y el residencial.

9. Apoyo para el desarrollo de infraestructura en redes inteligentes.

10. Incentivos locales y estatales para la transición energética.

Algunos estados de México, como Jalisco y Baja California, ofrecen sus propios incentivos para la instalación de energías renovables y la eficiencia energética, en colaboración con instituciones como el FIDE.

11. Programa de Eco-créditos y financiamiento para pymes.

Programas como los "Eco-créditos" apoyan a las pequeñas y medianas empresas (pymes) para que inviertan en energías limpias y eficiencia energética.

12. Subsidios para biocombustibles y energías alternativas.

Aunque aún en desarrollo, el gobierno de México ha ofrecido incentivos para la producción y uso de biocombustibles y otras fuentes alternativas, como el biogás y el biodiesel, especialmente en el sector agropecuario.

## Metodología

En esta investigación se implementó un enfoque mixto, donde se combinan métodos cuantitativos y cualitativos. Esta es una estrategia de investigación que busca aprovechar las fortalezas de estos dos tipos de enfoques para obtener una comprensión más completa y enriquecida del tema de estudio. Este enfoque es ideal cuando se quiere abordar tanto las características medibles de un fenómeno como sus aspectos subjetivos, profundizando en el contexto y en las percepciones de los participantes.

Para el enfoque cuantitativo se realizó una encuesta para recabar información sobre el conocimiento de la población de Mazatlán,

Sinaloa acerca del potencial energético en México durante los días 24 a 31 de octubre de 2024.

Para el cualitativo se realizó una investigación de forma documental en una serie de artículos y páginas oficiales de gobierno relacionadas con el tema.

### Encuesta de percepción pública.

La encuesta se diseñó con el objetivo de llegar a un público general y que cada pregunta fuera concreta y de fácil comprensión para todo el que la contestara, de tal manera que con 19 preguntas de opción múltiple se pudo obtener la suficiente información para analizar y evaluar el conocimiento de la población sobre las energías renovables, su disposición al cambio, los factores socioeconómicos que intervienen en el proceso de transición energética y las barreras percibidas.

### Análisis de datos.

Para el análisis de la información obtenida se utilizaron gráficas circulares y gráficas de barras donde se reflejan los resultados totales de cada pregunta de la encuesta, al igual que los porcentajes en proporción de las respuestas individuales.

## Resultados

### Análisis demográfico.

En este apartado se encuestaron a individuos con diferentes contextos sociales y profesionales, entre ellos maestros ajenos al tópico, estudiantes de otras carreras, grados escolares como bachilleratos, incluso de la misma carrera, además de población general y ciudadanos ordinarios (no especializados en el tema). Profundizando en el análisis demográfico, se encuestaron habitantes de la región noroeste de México, específicamente en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa. En lo que respecta al perfil de los encuestados hubo gran variedad de individuos, diferenciándose por su edad, profesión, ocupación, contexto social y laboral, ajenos y cercanos al tema tratado.

Rango de edad  
134 respuestas

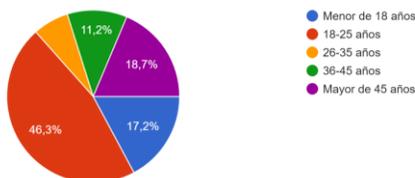


Figura 5. Gráfica de respuestas al cuestionamiento "Rango de edad".

¿Qué es la transición energética?

128 de 134 respuestas correctas

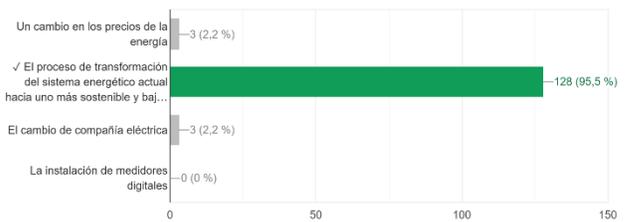


Figura 6. Gráfica de respuestas al cuestionamiento "¿Qué es transición energética?, donde la mayoría de los encuestados respondió: "El proceso de transformación del sistema energético actual hacia uno más sostenible y bajo en carbono".

Estos mayormente por pertenecer a la misma carrera, lo que también ocasiona una inclinación algo insignificante pero presente hacia un promedio más alto en el que las personas reflejan un conocimiento firme y sustancial del tema, al menos de media en dicha encuesta.

### Percepciones sobre transición energética.

En base a la encuesta realizada, se pudo observar que la población en general tiene una idea acercada a la realidad de las energías renovables y la transición energética en general, incluso del contexto energético de México, esto se ve reflejado con una mayoría notoria en el gráfico resultante:

¿Es México un país con alto potencial para energías renovables?

117 de 134 respuestas correctas

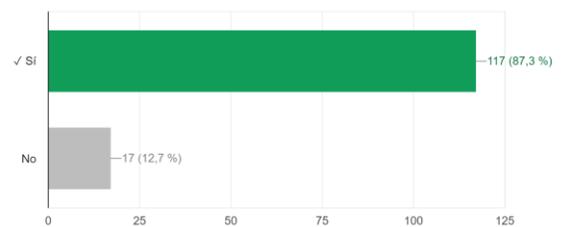


Figura 7. Gráfica de respuestas al cuestionamiento "¿Es México un país con alto potencial para energías renovables?", donde la mayoría de los encuestados respondió: "Sí".

¿Cuál de estas NO es una energía renovable?

113 de 134 respuestas correctas

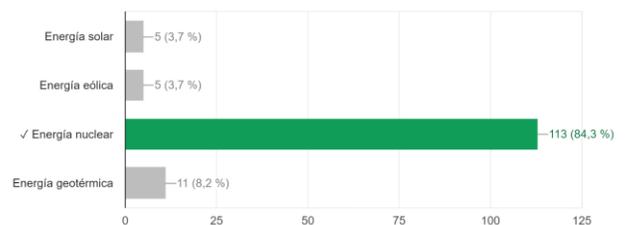


Figura 8. Gráfica de respuestas al cuestionamiento "¿Cuál de estas NO es una energía renovable?", donde la mayoría de los encuestados respondió "Energía Nuclear".

¿Cuál es el principal gas de efecto invernadero generado por el sector energético?

115 de 134 respuestas correctas

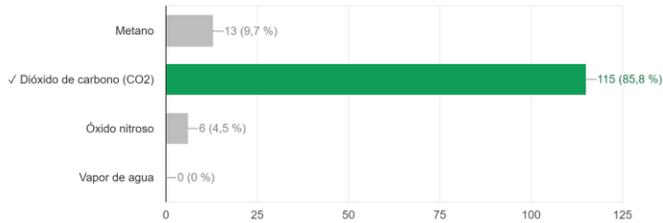


Figura 9. Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Cuál es el principal gas de efecto invernadero generado por el sector energético?”.

La energía solar fotovoltaica funciona:

111 de 134 respuestas correctas

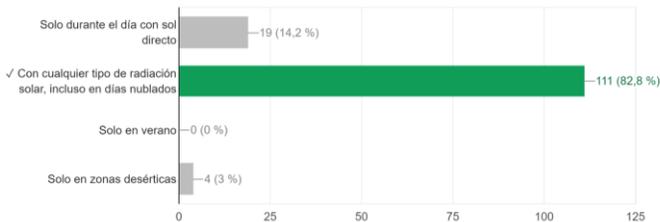


Figura 10. Gráfica de respuestas al cuestionamiento “Funcionamiento de la energía solar fotovoltaica.”.

Distribución de las puntuaciones totales

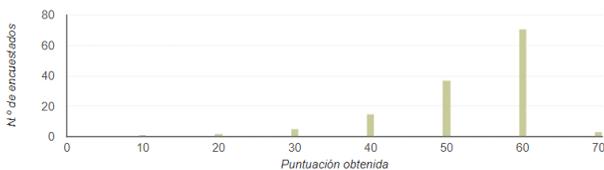


Figura 11. Gráfica de promedio de puntaje total de los encuestados.

Análisis de correlaciones.

Se observan dos principales variables que van directamente relacionadas al nivel de conocimiento que la población general puede llegar a tener sobre estas energías renovables y la transición energética en general:

1. Falta de difusión informativa: A conocimiento general se sabe que la información que se publica de rigor gubernamental para el público general existe y siempre ha existido, vive en constante cambio y actualizaciones de lo que sucede en el país, aun así, no se brinda la suficiente difusión de este tipo de documentación o cómo se puede encontrar fácilmente. Al usuario le resulta extraño una información con la cual no está familiarizado porque nunca se les ha mostrado y educado sobre su existencia y uso.

¿Qué tipo de energía renovable consideras más viable para México?

134 respuestas

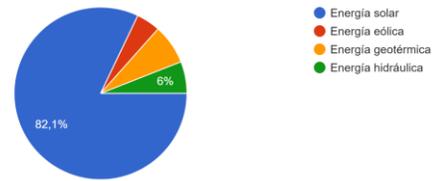


Figura 12. Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Qué tipo de energía consideras más viable para México?”, predominando la energía solar.

¿Cuál consideras que es el principal obstáculo para la transición energética en México?

134 respuestas

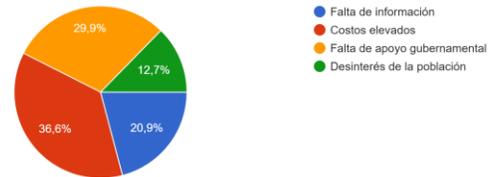


Figura 13. Gráfica de respuestas al cuestionamiento. “¿Cuál consideras que es el principal obstáculo para la transición energética en México?”.

¿Crees que México cumplirá sus compromisos internacionales de reducción de emisiones?

134 respuestas

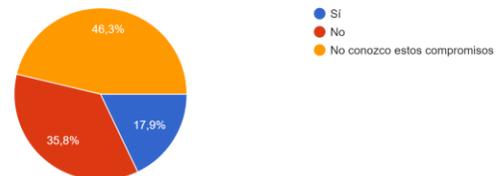


Figura 14. Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Crees que México cumplirá sus compromisos internacionales de reducción de emisiones?”.

Esto incluye también a la educación que se brinda por parte de instituciones educativas a las nuevas generaciones que también formarán parte de la sociedad como ciudadanos, por ende, es importante hacer hincapié en la introducción de este tipo de información desde los primeros grados escolares.

¿Qué tan importante consideras que es la educación sobre temas energéticos?

133 respuestas

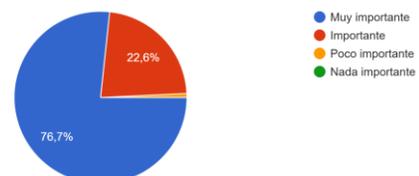
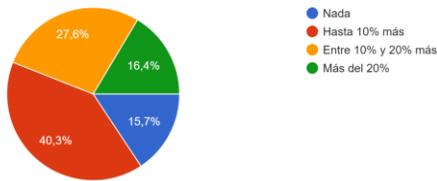


Figura 15. Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Qué tan importante consideras que es la educación sobre temas energéticos?”.

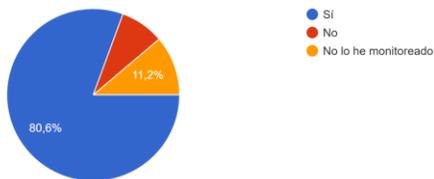
¿Cuánto más estarías dispuesto a pagar por energía 100% renovable?  
134 respuestas



**Figura 16.** Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Cuánto más estarías dispuesto a pagar por energía 100% renovable?”.

2. Contexto socioeconómico: Las condiciones laborales, sociales y económicas en las que vive la población o gran parte de la población mexicana no fomenta una cultura en la que se priorice el informarse de temas relevantes para la comunidad, lo que a su vez impide reflexionar sobre los mismos.

¿Has notado un aumento en tu recibo de luz en los últimos años?  
134 respuestas



**Figura 17.** Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Has notado un aumento en tu recibo de luz en los últimos años?”. Donde el 80.6% afirma haber percibido dicho aumento.

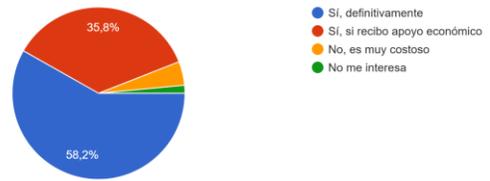
Estas dos variables incrementan enormemente la desinformación a la que se expone la población, eso sin tomar en cuenta otras problemáticas como fake news, las cuales alteran la percepción de la realidad de la población, muchas veces también nubla el criterio por noticias amarillistas y fuera de lugar.

### Propuestas de implementación.

Se propone, para erradicar la falta de difusión, un financiamiento más sólido y consistente para la difusión en redes sociales y en espacios publicitarios convencionales, ya no solo acerca de energías renovables, sino también del acceso a la información que las personas tienen y desconocen por la misma falta de difusión.

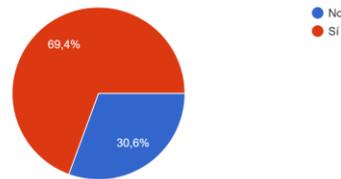
Aunque no hay una cifra exacta la cual especifique cuánto presupuesto destina el gobierno mexicano a la difusión de energías renovables, por lo que se ve en práctica, esta difusión no termina siendo suficiente para llegar a una mayor parte de la población.

¿Estarías dispuesto/a a instalar paneles solares en tu hogar?  
134 respuestas



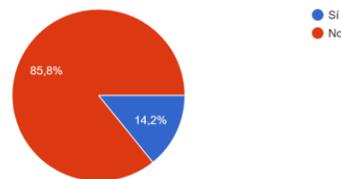
**Figura 18.** Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Estarías dispuesto/a a instalar paneles solares en tu hogar?”.

¿Has tomado alguna medida para reducir tu consumo energético?  
134 respuestas



**Figura 19.** Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Has tomado alguna medida para reducir tu consumo energético?”.

¿Conoces los programas gubernamentales de apoyo para la instalación de energías renovables?  
134 respuestas



**Figura 20.** Gráfica de respuestas al cuestionamiento “¿Conoces los programas gubernamentales de apoyo para la instalación de energías renovables?”.

## Conclusiones

### Hallazgos principales.

A base de esta investigación se encontró que los principales problemas para un progreso en esta parte del sector energético ha sido el mismo que en varios sectores distintos en los que no se ha visto un progreso, iniciativa económica y social por parte del gobierno mexicano, la burocracia apunta siempre a un muro el cual impide un progreso significativo y reduce las oportunidades para la misma sociedad.

### Recomendaciones.

Tratar de hacer conciencia de manera individual e invitar a más personas a informarse sobre las problemáticas nacionales actuales, a falta de un apoyo gubernamental significativo, el ser solidarios en este aspecto es lo mejor que podemos hacer para ir introduciendo de poco a poco mayores niveles de conciencia de media en la población participe.

Desgraciadamente mucha de la acción que se puede tomar como población es sin algún tipo de apoyo de tipo gubernamental, debido a esto, el trabajo puede requerir una mayor carga para una comunidad que se encarga en todos los aspectos. Aun así tiene un gran valor y tendrá una gran repercusión las acciones que la comunidad tome en conjunto para impulsar este tipo de iniciativas.

#### Futuras líneas de investigación.

- Electrificación y energías renovables (para sector industrial y de transporte). La electrificación de los sectores industriales y de transporte, combinada con el incremento de fuentes renovables como la solar, eólica y geotérmica, es una de las áreas clave. La International Renewable Energy Agency (IRENA) sugiere que más del 90% de las soluciones de transición energética dependerán de estas tecnologías renovables y de su expansión a través de políticas de apoyo y mejoras en almacenamiento energético. [18], [19].
- Innovaciones en eficiencia energética. Las mejoras en eficiencia son esenciales para reducir el consumo total de energía y las emisiones. Esto incluye optimización de procesos en industrias, edificios y redes de distribución, además de una mejor gestión de la demanda energética mediante tecnologías inteligentes y análisis de datos. [18], [21].
- Modelos socioeconómicos y políticas justas. Finalmente, para asegurar que la transición sea inclusiva, es crucial investigar cómo las políticas energéticas pueden ser equitativas y beneficiosas para todas las comunidades. Esto incluye estudiar el impacto de la transición en la creación de empleos, distribución de beneficios económicos y mitigación de efectos negativos en sectores dependientes de los combustibles fósiles. [19].
- Desarrollo de Combustibles Sostenibles. El uso de biocombustibles avanzados y combustibles sintéticos (por ejemplo, amoníaco y metanol) es vital para sectores difíciles de electrificar, como la aviación y el transporte pesado por carretera. La demanda de estos combustibles podría crecer significativamente en los próximos años debido a sus beneficios en la reducción de gases de efecto invernadero. [18].
- Hidrógeno Verde. Este combustible emerge como una opción prometedora para descarbonizar sectores que no pueden depender únicamente de la electricidad. El hidrógeno verde, producido mediante fuentes renovables, es

especialmente atractivo para la industria pesada y el transporte de larga distancia. [19], [20].

#### **Referencias**

- [1] CAF-banco de desarrollo de América Latina y el Caribe. Reporte de economía y desarrollo (RED) 2024 Energía renovadas: una transición energética justa para el desarrollo sostenible. Disponible en: <https://www.caf.com>
- [2] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2018). Hacia un turismo sostenible: Retos y oportunidades. *Ambienta: La revista del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*, (125), 20-31
- [3] ONU, 2023. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial Por un plan de rescate para las personas y el planeta. Disponible en: <https://unstats.un.org/>
- [4] Pedro, L. (2018). La transición energética. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/>
- [5] Fernández, J., Menéndez J. (2024). Redes energéticas, geopolítica y transición sostenible. Capítulo cuarto. *Energía y Geoestrategia 2024*.
- [6] Rodríguez-Mendoza, H. (2016). La transición energética mundial del siglo XXI, un recurso energético y ambiental para México. Disponible en: [http://132.248.9.195/ptb2011/septiembre/0673125/0673125\\_A1.pdf](http://132.248.9.195/ptb2011/septiembre/0673125/0673125_A1.pdf)
- [7] SENER, (2023). Balance Nacional de Energía Preliminar 2023. Disponible en: <https://www.gob.mx/>
- [8] Ferrari, L. (2023). Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México. Disponible en: [https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/publicaciones\\_conacyt/libros/Ferrari\\_Transicion\\_energetica\\_justa\\_9786071684004.pdf](https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/publicaciones_conacyt/libros/Ferrari_Transicion_energetica_justa_9786071684004.pdf)
- [9] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2018). Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat>
- [10] María Eliazar Raygoza-Limón, Gestión de políticas públicas y fiscales para la transición energética y el desarrollo sustentable en México, (6 de octubre de 2023), <https://www.scielo.org.mx/pdf>
- [11] Congreso Nacional de los Estados Unidos Mexicanos (2015). Ley de Transición Energética. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/>
- [12] Congreso Nacional de los Estados Unidos Mexicanos (2024). Ley General del Cambio Climático. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/>
- [13] Congreso Nacional de los Estados Unidos Mexicanos (2015). Ley de Transición Energética. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/>
- [14] Congreso Nacional de los Estados Unidos Mexicanos (2013). Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. <https://www.diputados.gob.mx/>
- [15] Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE) - CONUEE. <https://www.gob.mx/conuee>

- [16] Modelo de Investigación y Desarrollo (I+D) en Tecnologías Limpias. <https://www.gob.mx>
- [17] AQUAE Fundación. Acuerdo de París: las claves más importantes del Acuerdo de París. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/>
- [18] International Renewable Energy Agency (IRENA), Perspectiva global de las transiciones energéticas 2023: Camino hacia 1.5°C - Resumen ejecutivo. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/publications>.
- [19] IRENA, Perspectivas de la transición energética mundial: camino de 1.5 °C. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/publications>.
- [20] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), El mundo necesita una rápida transición a la energía sostenible. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int>.
- [21] McKinsey & Company, Trazando el panorama energético mundial hasta 2050: Los combustibles sostenibles. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-resources>

## Semblanza Autores



Samantha Carolina Ramos Tirado. Estudiante de segundo cuatrimestre en Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica de Sinaloa.



Vargas Tirado Hugo Alejandro. Estudiante de segundo cuatrimestre en Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica de Sinaloa.



Isaac Kleber Fernández Pérez. Estudiante de segundo cuatrimestre en Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica de Sinaloa.



Marco Antonio Núñez Martínez. Estudiante de segundo cuatrimestre en Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica de Sinaloa.

# Desarrollo de un Sistema de Gestión Térmica para Paneles Solares en una Estación de Carga para Vehículos Eléctricos

## Development of a Thermal Management System for Solar Panels in a Charging Station for Electric Vehicles

Diego M. Almazo Pérez<sup>1</sup>, Delfino Cornejo Monroy<sup>1</sup>, Luis E. Argueta Ramírez<sup>1</sup>, Carlos A. Gómez Álvarez<sup>1</sup>, Roberto Romero López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. diego.almazo@uacj.mx

### Resumen

La eficiencia de las celdas solares se ve afectada por el incremento de su temperatura durante la operación, especialmente en zonas de climas cálidos como Ciudad Juárez, Chihuahua. Este fenómeno disminuye el rendimiento eléctrico de los sistemas fotovoltaicos, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de gestión térmica para optimizar su desempeño. Este trabajo propone un sistema de refrigeración basado en disipadores de calor rectangulares para celdas solares, diseñado específicamente para reducir las temperaturas en zonas críticas de los módulos fotovoltaicos. Los objetivos principales incluyen evaluar el rendimiento eléctrico derivado de la disipación térmica, crear un registro detallado de temperaturas en el sistema fotovoltaico y su entorno climático, y proponer una solución sostenible y replicable que permita mejorar la eficiencia energética de las celdas. Para ello, se llevaron a cabo cálculos teóricos sobre la transferencia de calor en disipadores, simulaciones en Abaqus CAE para analizar los contornos térmicos, y experimentos prácticos con mediciones de temperatura, voltaje y corriente. Los resultados confirmaron que el uso de disipadores permite reducir la temperatura de las celdas solares hasta 10.97 °C, lo que incrementa su voltaje en 0.24 V por celda y mejora la eficiencia en un 10.025 % en comparación con celdas sin disipador. Este estudio demuestra que el uso de disipadores de calor es una estrategia efectiva para aumentar el rendimiento eléctrico de los sistemas fotovoltaicos en entornos cálidos, ofreciendo una solución práctica para maximizar la generación de energía solar en estas condiciones.

**Palabras clave:** Vehículos eléctricos, Estación de Carga, Sistema Fotovoltaico, Sistema de gestión térmica. Thermal management system.

### Abstract

The efficiency of solar cells is affected by the increase in their temperature during the operation, especially in areas of warm climates such as Ciudad Juárez, Chihuahua. This phenomenon decreases the electrical performance of photovoltaic systems, which highlights the need to implement thermal management strategies to optimize their performance. This work proposes a cooling system based on rectangular heat sinks for solar cells, specifically designed to reduce temperatures in critical areas of photovoltaic modules. The main objectives include evaluating the electrical performance derived from thermal dissipation, creating a detailed record of temperatures in the photovoltaic system and its climatic environment, and proposing a sustainable and replicable solution. That allows to improve the energy efficiency of the cells. For this, theoretical calculations were carried out on heat transfer in heat sinks, simulations in Abaqus CAE to analyze thermal contours, and practical experiments with temperature, voltage and current measurements. The results confirmed that the use of heatsinks allows the temperature of solar cells to reduce to 10.97 °C, which increases their voltage by 0.24 V per cell and improves efficiency by 10.025% compared to cells without a heatsink. This study shows that the use of heat sinks is an effective strategy to increase the electrical performance of photovoltaic systems in warm environments, offering a practical solution to maximize solar energy generation in these conditions.

**Keywords:** Electric Vehicles, EV Charger, Photovoltaic systems.

Recibido: 02/12/2024; Aceptado 14/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introducción

Desde la revolución industrial, el aprovechamiento de la energía ha sido fundamental para el desarrollo y crecimiento de la sociedad. Se han desarrollado distintas formas para aprovechar las características de distintas fuentes energéticas tomando en cuenta factores como cantidad de energía extraída y precio de esta. Estos avances han contribuido al crecimiento y desarrollo de la sociedad humana, pero también han traído consecuencias al medio ambiente. Es por ello por lo que se ha trabajado en desarrollar tecnologías que permitan aprovechar la energía de la naturaleza y al mismo tiempo contribuir a la conservación del ambiente. Una de las principales maneras de extraer energía del ambiente es por medio de la quema de combustibles fósiles y carbón. Esta forma ofrece grandes ventajas por el alto contenido energético de los combustibles, pero también es una de las formas que más daña al medio ambiente por medio de las emisiones de gases de

efecto invernadero. La acción ante estas consecuencias ha sido la implementación del aprovechamiento de las energías renovables, por medio de turbinas eólicas, placas solares, plantas hidroeléctricas y nuevos sistemas que han ido desarrollándose con la finalidad de aprovechar nuevas maneras de obtener energía de una forma continua y viable sin contaminar el ambiente [1].

Las tecnologías con base en energías renovables se han implementado de manera exitosa de muchas formas, un reto que se presenta en la sociedad moderna es implementar estas tecnologías a la movilidad, ya que la mayoría de las formas en las que el ser humano se desplaza es altamente dependiente de los combustibles fósiles. Siendo esto un problema para el objetivo de no contribuir al cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente se ha impulsado arduamente el uso de vehículos eléctricos como lo son los automóviles, motocicletas, patines, e incluso trenes. La gran disyuntiva se presenta cuando las fuentes de energía para alimentar a

estos vehículos eléctricos siguen siendo por medio de la quema de combustibles fósiles, emitiendo la misma o mayor cantidad de gases nocivos al ambiente. Es por ello por lo que es importante trabajar en integrar las formas de extracción de energía renovable del ambiente a la movilidad diaria de los humanos [2]

Se propone investigar técnicas de refrigeración activa o pasiva, sistema de circulación de aire, y materiales de revestimiento para controlar la temperatura y evitar el sobrecalentamiento. Se llevará a cabo un análisis de zona en Ciudad Juárez Chihuahua, México donde se pretende obtener datos de las temperaturas y las velocidades de los vientos en sus condiciones máximas, de esta forma se busca proponer un sistema de enfriamiento pasivo o activo adecuado para la estación de carga fotovoltaica. Se cree que, al integrar sistema de control de temperatura en los paneles solares, se tendrá un aumento de eficiencia, se alargará la vida útil de los paneles y se obtendrán valores de voltaje y corrientes más estables.

El proyecto aportaría información de alta relevancia para el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías de movilidad eléctrica urbana y contribuiría a la acelerada transición de fuentes de energía en el rubro vehicular.

El objetivo del proyecto es conocer el comportamiento del sistema fotovoltaico (SF) en condiciones climáticas de Ciudad Juárez y como objetivos secundarios se pretende proponer un sistema de enfriamiento para las celdas solares, también se pretende recopilar información del sistema.

### Fundamentación Teórica

La convección es un mecanismo de transferencia de calor en el cual se involucra un fluido. Puede ser sólido-fluido o fluido-fluido. El fluido puede estar en movimiento o estático, dependiendo de la aplicación y el contexto en el que se aplique. Se puede presentar de dos principales maneras: como convección natural (convección libre) y convección forzada [3].

La convección natural o libre se da por medios, como establece su nombre, naturales. Por otra parte, la convección forzada se da por medios que direccionan el fluido por medios externos que adicionan energía al sistema [4]

Asimismo, se establece la relación entre la transferencia de calor por convección con la ley de Newton como indica la ecuación (1):

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) , [W] \quad (1)$$

Donde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$   
 $A_s$  = área superficial de transferencia de calor,  $m^2$   
 $T_s$  = temperatura de la superficie,  $^\circ C$   
 $T_\infty$  = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie,  $^\circ C$

El coeficiente de transferencia de calor por convección determina la capacidad de un fluido de conducir calor con un medio sólido y viceversa.

La conducción de calor se da de la siguiente forma en la ecuación (2):

$$\dot{q}_{conv} = -k_{fluido} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2)$$

En este caso,  $T$  es la temperatura en el fluido, y la expresión  $\frac{\partial T}{\partial y}$  ilustra el gradiente de temperatura formado por la condición de no-deslizamiento. Con todo esto podemos crear la relación para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección de la siguiente manera en la ecuación (3):

$$h = \frac{-k_{fluido} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_s - T_\infty}, [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (3)$$

El número de Nusselt es un número adimensional que define una relación entre la tasa de transferencia de calor por conducción y por convección en una capa límite térmica. Se expresa de la siguiente forma matemática en la ecuación (4):

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (4)$$

Donde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección  
 $L_c$  = longitud característica del sistema  
 $k$  = conductividad térmica del fluido

La ecuación de Dittus-Boelter es una correlación que combina tres coeficientes presentes en los fluidos a la hora de estar en movimiento. Toma en cuenta el número de Reynolds presente y el número de Prandtl y se expresa en la ecuación (5) para enfriamiento [5]:

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (5)$$

Donde:

$Re$  = número de Reynolds  
 $Pr$  = número de Prandtl

En 1884, Boltzmann demuestra teóricamente los trabajos experimentales de Stephan, teniendo así la ecuación de poder de emisión de cuerpo negro, que determina la capacidad de emisividad en condiciones máximas e ideales de un cuerpo, se expresa en la ecuación (6):

$$E_b(T) = \sigma T^4, [W/m^2] \quad (6)$$

Donde:

$\sigma = 5.670 \times 10^{-8}$ , representa la constante de Boltzmann, con unidades de  $W/m^2 \cdot K^4$ .  
 $T$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Es el proceso mediante el cual se transfiere energía entre dos medios sólidos o estáticos. Apoyándose de la ley de Fourier, se plantea que la fórmula de la tasa de transferencia de calor se expresa de la siguiente forma en la ecuación (7):

$$\dot{q}_{cond} = -kA_s \frac{dT}{dx}, [W] \quad (7)$$

Donde:

- $\dot{q}_{cond}$  es la tasa de transferencia de calor por conducción.
- $k$  es la conductividad térmica del material.
- $A$  es el área en la cual ocurre el proceso de transferencia de calor.
- $\frac{dT}{dx}$  es el gradiente de temperatura en dirección a la transferencia de calor.

Las aletas son dispositivos que ocasionan un aumento de superficie entre la superficie y un fluido (generalmente aire). Esto permite que haya mayor transferencia de calor entre los dos medios, ocurre por conducción y convección.

El número de Grashof es una unidad adimensional que relaciona las fuerzas de flotación y viscosidad en un fluido. En la ecuación (8) se expresa de la siguiente forma:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (8)$$

Donde:

- $g$  es la aceleración gravitacional.
- $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica.
- $T_s$  es la temperatura en la superficie.
- $T_\infty$  es la temperatura ambiental.
- $L$  es la longitud característica de la superficie.
- $\nu$  es la viscosidad del fluido.

El número de Prandtl es una medida adimensional que relaciona la viscosidad del fluido con la difusividad térmica. Se utiliza para definir el flujo de calor en un evento de transferencia de calor, así como el comportamiento térmico del fluido [6].

El número de Prandtl se define en la ecuación (9):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (9)$$

Siendo:

- $\nu$ , la viscosidad cinemática del fluido.
- $\alpha$ , la difusividad térmica.
- $c_p$ , el calor específico a presión constante.
- $\mu$ , la viscosidad dinámica.
- $k$ , la conductividad térmica del fluido.

Es importante conocer y utilizar el número de Prandtl ya que permite conocer la velocidad de difusión de calor y cambio de viscosidad en el fluido. En el aire, fluido con el que se trabajará, el número de Prandtl es cercano a 1 [7].

El número de Rayleigh relaciona la viscosidad y flotabilidad con la relación entre la difusividad de cantidad de movimiento y térmica. Es

un número importante para el estudio de la convección térmica, se expresa como indica la ecuación (10):

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (10)$$

Donde:

- $g$  es la aceleración gravitacional.
- $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica.
- $T_s$  es la temperatura en la superficie.
- $T_\infty$  es la temperatura ambiental.
- $L$  es la longitud característica de la superficie.
- $\nu$  es la viscosidad del fluido.
- $\alpha$ , la difusividad térmica.

Una superficie que cuenta con aletas para transferir calor al ambiente por convección se le conoce como "sumidero de calor", figura 1. Los sumideros usualmente son de materiales como cobre o aluminio. Una desventaja de los sumideros pasivos es que, al depender del movimiento del aire, pueden llegar a calentarse y afectar en la confiabilidad del sistema [8].

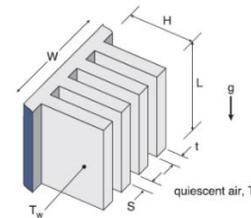


Figura 1. Dimensiones de diseño de una aleta.

El número de aletas y el espacio entre ellas puede variar dependiendo de las dimensiones de la placa en la que se colocan. Asimismo, hay dos principales formas de ajustar las variables desde el número de Rayleigh: por medio del espaciamiento (S) y por medio de la longitud de las aletas (L), en la ecuación (11) se expresan en función de sus parámetros [7]:

$$Ra_S = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)S^3}{\nu\alpha} Pr, Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} Pr \quad (11)$$

Respecto al espaciado de los sumideros de calor, se busca que haya el mejor coeficiente de transferencia de calor al mismo tiempo que la mayor área superficial. Es por ello por lo que por medio de experimentación se llegó a la fórmula de espaciado óptimo mostrada en la fórmula (12):

$$S_{opt} = 2.714 \left( \frac{S^3 L}{Ra_S} \right)^{0.25} \quad (12)$$

Tomando en cuenta que es a temperatura constante. En la figura 2.2 se ilustran los parámetros a considerar para la caracterización de aletas a partir de una placa. Con todo esto siendo considerado, la

transferencia de calor por mecanismo de convección natural en las aletas se constituye en la ecuación (13) [9]:

$$\dot{Q} = h(2nLH)(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

Definiendo variables nuevas:

- $n$ , es el número de aletas en el sumidero (definido por el ancho dividido entre la suma del espaciado entre aletas y ancho de aletas).
- $H$ , es la altura de las aletas.
- $L$ , es la longitud de las aletas.

Primero se necesita considerar el área transversal, la ecuación (14) la define como:

$$A_c = \text{ancho} \times \text{grosor} \quad (14)$$

En los arreglos para calcular el área de la base también se toma en cuenta la cantidad de aletas involucradas en el disipador, por lo que se multiplican por el número total de aletas. Posteriormente en la ecuación (15) se calcula el parámetro de la aleta  $m$ :

$$m = \sqrt{\frac{h \times P}{k \times A_c}} \quad (15)$$

Donde:

- $m$  es el parámetro de la aleta.
- $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido.
- $P$  es el perímetro de las aletas.
- $k$  es la conductividad térmica del material.
- $A_c$  es el área de sección transversal de las aletas.

Una vez conocido el parámetro de la aleta, se busca conocer la eficiencia de éstas, por ello también se muestra la ecuación (16):

$$\eta = \frac{\tanh(m \times L)}{m \times L} \quad (16)$$

Donde:

- $\eta$  es la eficiencia de la aleta.
- $m$  es el parámetro de la aleta.
- $L$  es la longitud de la aleta.

Con esto conocido se puede obtener el calor disipado por las aletas por medio de la ecuación (17):

$$Q_{aleta} = \eta_{aleta} \times A_{aleta} \times (T_{base} - T_{ambiente}) \quad (17)$$

Donde:

- $\eta_{aleta}$  es la eficiencia de la aleta.
- $A_{aleta}$  es el área expuesta al aire de la aleta.
- $T_{base}$  es la temperatura en la base de la aleta.
- $T_{ambiente}$  es la temperatura en el ambiente.

Para conocer la temperatura de la aleta a cierta distancia se toman en cuenta lo establecido anteriormente y se ajusta a la distancia requerida, de modo que en la ecuación (18) se obtiene:

$$T(x) = T_\infty + (T_{base} - T_\infty) \times \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)} \quad (18)$$

donde:

- $T(x)$  es la temperatura en el punto  $x$  a lo largo de la aleta.
- $T_\infty$  es la temperatura del aire ambiente.
- $T_{base}$  es la temperatura de la base de la aleta.
- $L$  es la longitud de la aleta.
- $m$  es el parámetro de la aleta.

Las tecnologías fotovoltaicas han sido una alternativa sustentable a los combustibles fósiles que se utilizan para la extracción de energía. La recolección de energía solar ocurre por medio de energía eléctrica obtenida directamente de celdas fotovoltaicas que absorben energía de luz solar.

Los paneles solares se componen de capas de celdas solares que cuando el sol interactúa con ellas, ocurre una reacción iónica que libera energía por medio de corriente eléctrica [10].

La energía eléctrica generada en sistemas de respaldo o autónomos se almacena en baterías, usualmente de iones de litio. Las configuraciones químicas principales son de litio-cobalto, litio-manganeso, NMC y litio-aluminio.

El modelo equivalente de una placa solar [11], toma en cuenta los efectos de la placa solar como fuente de corriente (proporcional a la irradiación solar), corriente asociada al diodo equivalente, voltaje térmico, coeficiente de idealidad, y el voltaje obtenido con pérdidas. Se considera la suma de todas las resistencias en serie, así como la suma de todas las resistencias en paralelo. Con esto tendríamos el circuito ilustrado en la figura 2.

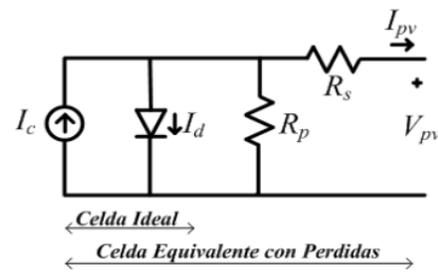


Figura 2. Circuito equivalente de una placa solar.

La ecuación (19) del circuito de un diodo es:

$$I_{pv} = I_c - I_o \left[ e^{\left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \alpha} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (19)$$

Donde:

- $I_{pv}$  representa la corriente de salida con pérdidas.
- $I_c$  representa la corriente de la fuente.
- $I_o$  representa la corriente inicial.
- $R_s$  representa el equivalente a la suma de las resistencias en serie.
- $R_p$  representa el equivalente a la suma de las resistencias en paralelo.
- $V_t$  representa el voltaje térmico.
- $\alpha$  representa el coeficiente de idealidad.

La irradiancia solar se define como la tasa a la que la energía de radiación incide en una superficie por unidad de área [12]. Se utilizan dos principales herramientas para la medición de la irradiancia solar: el pirheliómetro y el piranómetro.

Los dos instrumentos previamente mencionados pueden ser conectados a un sistema de adquisición de datos (DAQ) para colección automática de datos y registro. La inclinación en la que se colocan los instrumentos para hacer las mediciones es de alta importancia para hacer mediciones correctas. En la figura 3 se muestran zonas de potencial fotovoltaico de México por medio de equipo de medición [13].



Figura 3. Atlas de recurso solar en México.

Con la información recaudada, se registró en enero 16 del 2024 la temperatura más baja promedio en Ciudad Juárez, siendo esta -6.1 °C. Por otra parte, la temperatura más alta registrada en 2024 para Ciudad Juárez fue el 13 de junio con 42.8 °C, promedio 18.5. En las figuras 4 y 5 se muestran los datos históricos de la ciudad [14].

En estas fechas, se registró un tiempo de luz solar aproximadamente 10 horas y media el 16 de enero, por otra parte, el 13 de junio se registraron 13 horas de luz natural, algo muy similar a las horas de luz natural durante el solsticio de verano [14].

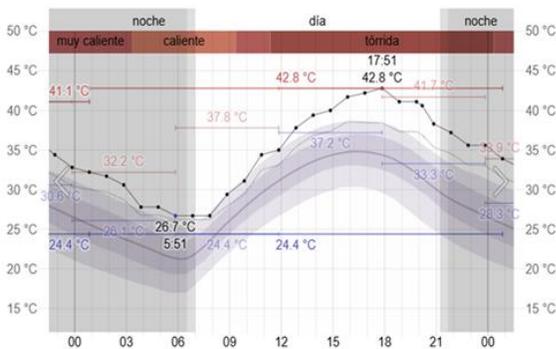


Figura 4. Temperatura el 16 de enero del 2024.

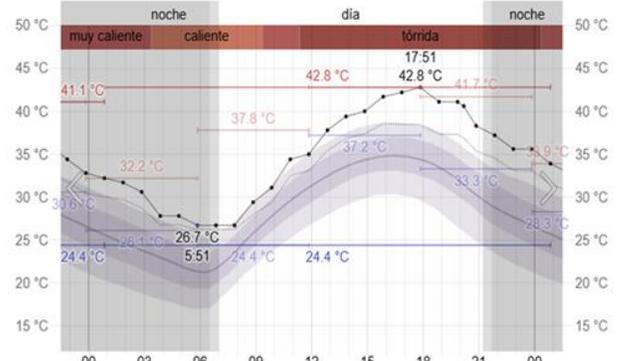


Figura 5. Temperatura el 13 de junio del 2024.

Se define a la eficiencia térmica de una placa solar como la relación entre la energía que proporciona el sol por medio de irradiancia, con la energía que entrega el sistema fotovoltaico [15]. Se expresa como porcentaje con la ecuación (20):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

$\eta$  Representa la eficiencia energética de la placa.

$P_{out}$  Es la potencia eléctrica proporcionada por la placa solar.

$P_{in}$  Representa la potencia eléctrica proporcionada por el sol.

Para determinar el ángulo de inclinación de la instalación de una placa solar se necesita conocer la latitud de la zona en la que está siendo instalada y la estación del año en la que se encuentra. Ciudad Juárez se encuentra en una zona entre las latitudes 31° 07' N - 31° 48' N. Debido al ángulo de inclinación de la tierra y su efecto en las horas de sol y el acimut de este, en verano se recomienda reducir el ángulo de 10° a 25° y en invierno se recomienda aumentar el ángulo de 10° a 25° [16]. Por lo que se recomienda que las instalaciones de placas solares se coloquen en 32° en promedio en caso de ser estaciones estáticas. Para estaciones estáticas ajustables se recomienda un ángulo de 42° a 57° en verano y un ángulo de 22° a 7°.

## Metodología

Se tiene la intención de seguir la siguiente metodología para llevar a cabo el proyecto: análisis de zona, cotizaciones y adquisición de material, diseño de la propuesta, construcción de sistema, medición y caracterización de variables, análisis de resultados, compilación de resultados y propuesta de mejora. En la figura 6 se ilustra el procedimiento a seguir.

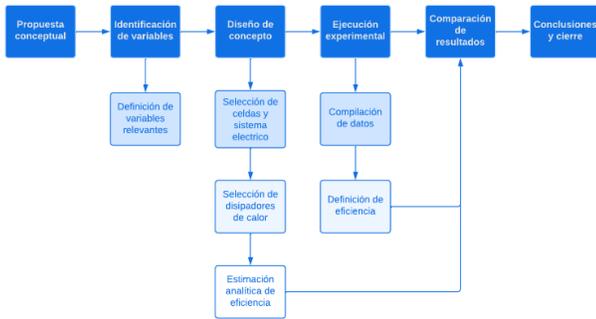


Figura 6. Diagrama de flujo del proyecto.

La propuesta conceptual se basa de la teoría para proponer un mecanismo de disipación de calor en los paneles solares. Posteriormente se identifican y clasifican las variables que importan para el proyecto a realizar, tales como radiación solar, ángulo de inclinación de las placas solares, voltaje de celdas, dimensiones, tipos y distribución de sumideros de calor.

Para el diseño del concepto se seleccionan los tipos de celda solar, la elaboración de la fixtura para mantener el ángulo óptimo en la estación solar, se seleccionan los disipadores de calor y se lleva a cabo una estimación analítica de la eficiencia. En la ejecución experimental se definen indicadores de resultados como eficiencia y estabilidad. En la fase de medición y caracterización de variables se tendrá el sistema funcionando y por medio de dispositivos de medición se obtendrán datos para ser registrados por medio de software adecuado al sistema y posteriormente analizados. Se hace compilación de resultados se hace revisión de las mediciones obtenidas y se registran en el documento.

### Propuesta conceptual.

Para considerar un material se tomaron en cuenta dos factores: su conductividad térmica, su resistencia a la exposición al ambiente y su costo. Los principales candidatos fueron:

- Aluminio 6061-T4 ( $k = 154 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).
  - Precio unitario: \$17.24 dlls (granel).
- Cobre trabajado en frío ( $k = 385 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).
  - Precio unitario: \$35.51 dlls (granel).

Se contemplaron dos geometrías principales: disipadores con aletas cilíndricas y disipadores con aletas rectangulares.

Los disipadores de calor a seleccionar fueron dos modelos del mismo material y dimensión en la base. Los modelos fueron contemplados por dimensiones, costo, geometría y material.

El experimento se llevó a cabo en Ciudad Juárez en las coordenadas  $31^{\circ}44'03.9''\text{N}$   $106^{\circ}25'41.6''\text{E}$ . El experimento fue llevado a cabo entre los meses de agosto y septiembre del año 2024. Las temperaturas registradas en esas fechas fueron de  $16.7^{\circ}\text{C}$  a  $36.7^{\circ}\text{C}$ . Se presentaron

cielos despejados y 13 horas de luz solar aproximadamente, así como precipitación nula e irradiación solar promedio de  $2,811.6 \text{ kWh/m}^2$ . Para obtener resultados comparables entre un sistema sin disipadores y uno con disipadores, se tomaron en cuenta variables medibles dentro del sistema. Se tomaron en cuenta variables térmicas y eléctricas, ya que son las principales fuentes de energía medibles en un sistema fotovoltaico. Considerando variables eléctricas como valores de salida, y variables térmicas como valores de entrada, también como valores de salida residual.

### Diseño de concepto.

Considerando la geometría y dimensionado de una celda solar comercial, se propuso un arreglo de disipadores de calor con aletas de 3 mm de ancho, 1 mm de espesor y 20 mm de longitud. Con esto, se calcularon las temperaturas en la base, la parte media y en la punta de las aletas para asegurar su correcta funcionalidad. Por medio de las fórmulas de disipación de calor de sumideros de calor. Se consideraron propiedades térmicas del aluminio y del aire.

Las temperaturas fueron obtenidas por medio de mediciones a materiales expuestos al sol, asimismo, se tomó en cuenta la temperatura promedio de la ciudad.

Se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Ancho de la aleta = 0.003 m.
- Espesor de la aleta = 0.001 m.
- Longitud de la aleta = 0.02 m.
- Temperatura en la base =  $47.5^{\circ}\text{C}$ .
- Temperatura ambiente =  $18.5^{\circ}\text{C}$ .
- Coefficiente de transferencia de calor por convección  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Conductividad térmica  $k = 167 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Primero se calculó el parámetro de la aleta  $m$ :

Para ello se necesitan obtener valores de perímetro y área de sección transversal de las aletas con el uso de la ecuación (21):

$$P = 2 \times (\text{ancho} \times \text{espesor}) \quad (21)$$

$$P = 2 \times (0.003 \text{ m} \times 0.001 \text{ m})$$

$$P = 0.008 \text{ m}$$

El área de sección transversal será la dada en la ecuación (22):

$$A_c = \text{ancho} \times \text{espesor} \quad (22)$$

$$A_c = 0.003 \text{ m} \times 0.001 \text{ m}$$

Con los datos faltantes calculados se obtuvo el parámetro de la aleta:

$$m = \sqrt{\frac{200 \times 0.008}{167 \times (3 \times 10^{-6})}}$$

$$m = 56.51 \text{ m}^{-1}$$

Posteriormente, se calcula la temperatura en distintos puntos de las aletas por medio de la ecuación de temperatura en base a distancia de la aleta, ecuación (23):

$$T(x) = T_{\infty} + (T_{base} - T_{\infty}) \times \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)} \quad (23)$$

Teniendo así, por cada distancia las ecuaciones (24) a (26):

- En la base de la aleta:

$$T(0) = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C} + (47.5 \text{ }^{\circ}\text{C} - 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times \frac{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1}(0.02 \text{ m} - 0 \text{ m}))}{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1} \times 0.02 \text{ m})} \quad (24)$$

- En la parte media de la aleta:

$$T\left(\frac{L}{2}\right) = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C} + (47.5 \text{ }^{\circ}\text{C} - 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times \frac{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1}(0.02 \text{ m} - 0.01 \text{ m}))}{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1} \times 0.02 \text{ m})} \quad (25)$$

- En la punta de la aleta:

$$T(L) = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C} + (47.5 \text{ }^{\circ}\text{C} - 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times \frac{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1}(0.02 \text{ m} - 0.02 \text{ m}))}{\cosh(56.51 \text{ m}^{-1} \times 0.02 \text{ m})} \quad (26)$$

Se buscó un modelo que se adaptara a las dimensiones de una celda solar comercial, esto con el propósito de ampliar su rango de aplicabilidad en posteriores aplicaciones. Para validar su correcto funcionamiento, se usarán las fórmulas de disipación de calor de sumideros de calor, tomando su temperatura en la base, en la parte media y en la punta de la aleta a escoger. Una vez terminados los cálculos analíticos se escogerá un modelo comercial de disipador de calor y se llevará a cabo una simulación.

Para determinar el tipo de disipador de calor a usar en el experimento físico se hizo una simulación por medio de Abaqus. Se buscó que el modelo disipe calor, al mismo tiempo que sea ligero y permita el flujo del aire a través de las superficies de trabajo. Se consideró que los disipadores de calor deben cubrir 80% de la parte posterior del panel para ser considerados efectivos.

Para la simulación de resultados se llevó a cabo un análisis en estado estático para determinar el desempeño de la celda con la adaptación de disipadores de calor en su parte posterior. Se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas y térmicas de los componentes. Una vez llevada a cabo la simulación se hizo una convergencia de mallados para obtener un error menor del 2%.

## Resultados

Por medio de la simulación de método de elemento finito en el software Abaqus CAE, se lleva a cabo una simulación considerando los tres principales elementos en el sistema: la celda solar, el material de interfaz térmica y el disipador de calor. Se elaboraron las geometrías en el software Siemens NX.

En la figura 7 se tiene la celda solar, en la figura 8 se tiene el material de interfaz térmica y en la figura 9 se tiene el disipador de calor:

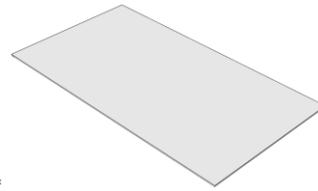


Figura 7. Modelo en CAD de la celda monocristalina.

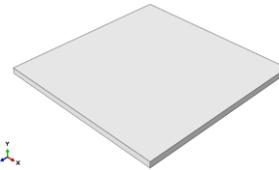


Figura 8. Modelo en CAD de material de interfaz térmica.

Se utilizaron geometrías con valores iguales a las de una celda real comercial, incluyendo curvaturas y grosor total, asimismo, se consideró el espacio destinado a las conexiones eléctricas.

El arreglo de 8 columnas y 7 filas de aletas rectangulares a lo largo y ancho del base, figura 9, basado con un seccionado entre base y aletas permite el correcto funcionamiento de la simulación.

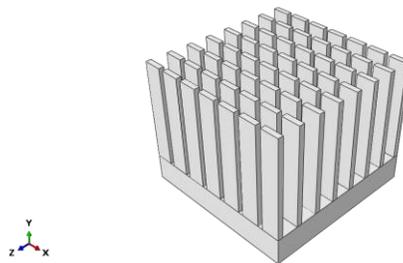


Figura 9. Modelo CAD de disipador de calor.

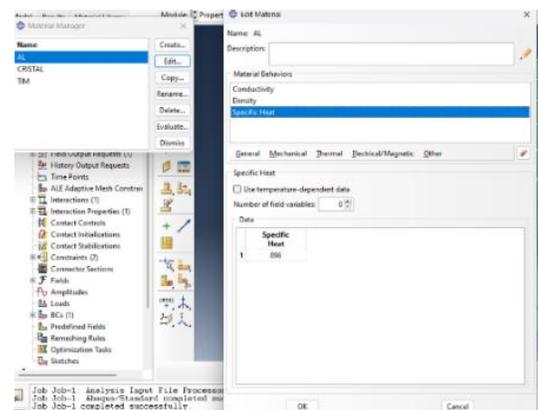


Figura 10. Conductividad del aluminio.

Posteriormente, para cada elemento se definieron propiedades de densidad, conductividad y calor específico. Se definieron las propiedades de los componentes de acuerdo con su ficha técnica. En la figura 10 se define la conductividad del Aluminio en  $167 \text{ W/mK}$ . Del mismo modo, en la figura 11, se define su densidad como  $2,700 \text{ kg/m}^3$  correspondiente al aluminio en este caso.

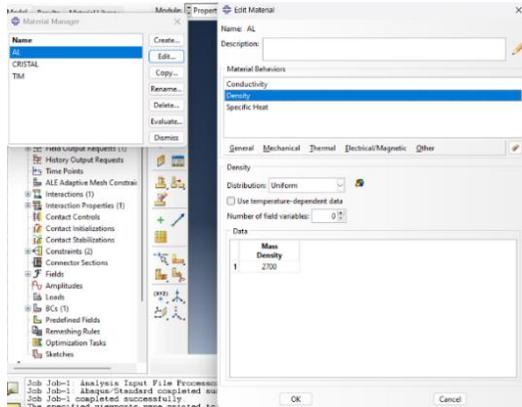


Figura 11. Densidad del aluminio.

El calor específico se muestra en la figura 12, como  $896 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ .

Los valores para la placa solar son definidos por medio del mismo procedimiento, teniendo así la conductividad de la celda como  $140 \text{ W/mK}$ , su densidad como  $2,800 \text{ kg/m}^3$ , y su calor específico como  $1,500 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ .

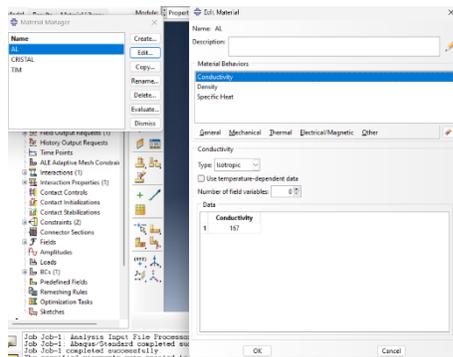


Figura 12. Calor específico del aluminio.

Asimismo, los valores de las propiedades del material de interfaz térmica se definieron del mismo modo con su conductividad térmica como  $2.5 \text{ W/m-K}$ , su densidad como  $2,800 \text{ kg/m}^3$ , y su calor específico como  $1,500 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ .

Posteriormente se generan secciones con el material indicado y se asignan a cada componente para que se tengan en cuenta como elementos con material definido, en la figura 13 se muestra el seccionado y definición de material por componente:

Una vez definidos los materiales de cada elemento, se posicionaron los elementos de forma en la que hubo contacto entre ellos con la función de rotate y translate instance.

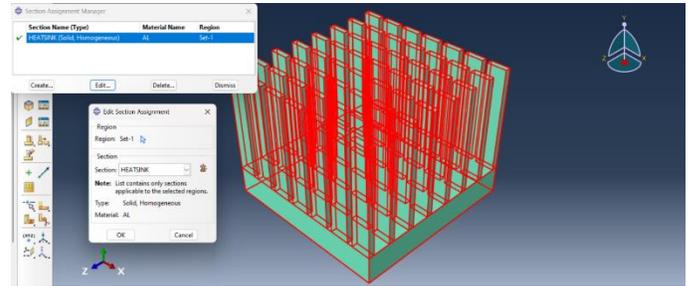


Figura 13. Selección de geometría para determinar material.

Posteriormente, en la sección de “step” se define el estudio a realizar, en este caso se decidió hacer un análisis en estado no transitorio para revisar el comportamiento de la temperatura y transferencia de calor en la celda, la figura 14 muestra la interfaz y como se definió.

Una parte muy importante para que la simulación funcione es la sección de interacción. En esta instancia se define cómo es que los elementos interactúan entre sí, influyendo en sus formas de transferencia de energías. En la figura 15 se expone el coeficiente de película del aire, se consideró de  $40 \text{ W/m}^2\text{K}$  y temperatura de  $30^\circ\text{C}$  por las condiciones climáticas capturadas en la ciudad.

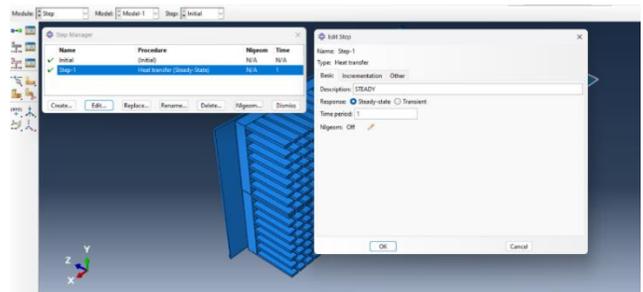


Figura 14. Definición de step (steady-state).

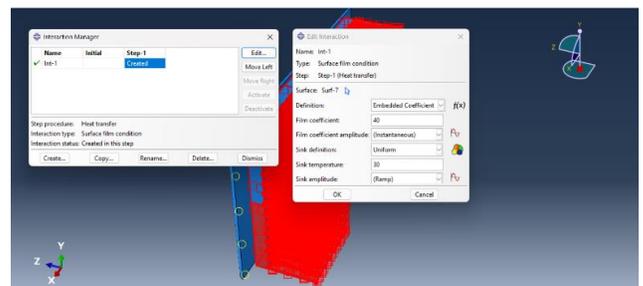


Figura 15. Definición de interacción.

En la figura 16, se define la zona en la cual se tiene mayor influencia, que en este caso son los disipadores de calor.

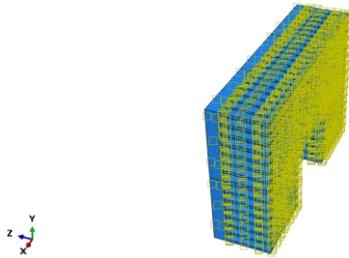


Figura 16. Zona de influencia de la condición de película.

Por otra parte, se definió el contacto entre el TIM y la celda solar, siendo ésta de  $10000 \text{ W/K}$ , en la figura 17, se ilustra como se define en el software.

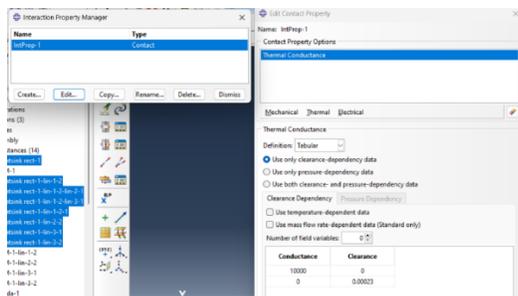


Figura 17. Definición de conductancia en el software.

Para que las interacciones sean válidas, se aplica la restricción de “tie” entre los componentes, en las figuras 18 y 19, se muestra cómo se relacionaron los disipadores de calor con el TIM y el TIM con la celda solar.

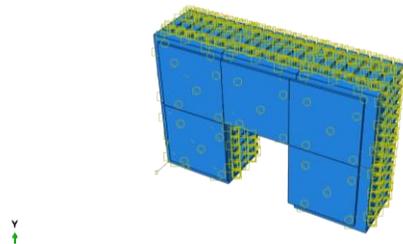


Figura 18. Relación entre disipadores y TIM.

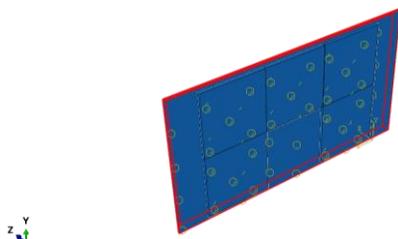


Figura 19. Relación entre TIM y celda.

Una vez definidas las interacciones entre los componentes, se aplicó la condición de frontera de temperatura superficial de la placa solar. La figura 20, muestra cómo y dónde se aplicó esta condición.

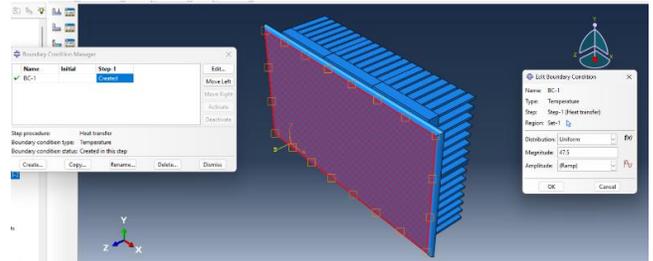


Figura 20. Condición de frontera de temperatura.

Continuando con la simulación, se aplica la malla. Para crearla, se necesita crear un semillado (definición de nodos de las mallas) y posteriormente crear la malla como tal. Se empezó con una malla relativamente gruesa de 1 mm de longitud por arista, teniendo así 25,056 elementos en el mallado.



Figura 21. Mallado (parte frontal).

Asimismo, en la función de “element type” se define que tipo de estudio se llevará a cabo, en este caso se utiliza la opción de transferencia de calor, en las figuras 21 y 22, se muestra la malla aplicada a la geometría.

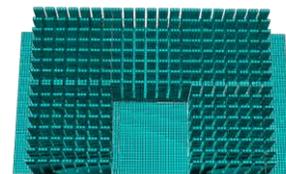


Figura 22. Mallado (parte posterior).

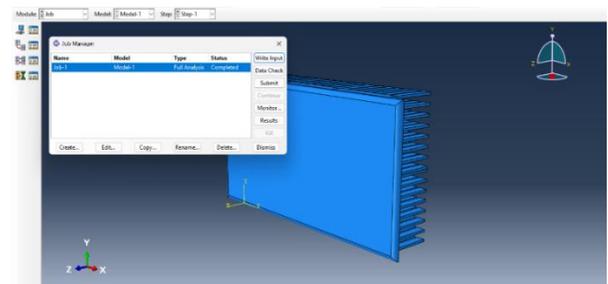


Figura 23. Trabajo exitosamente computarizado.

Una vez con todo definido, se continuó con la sección de “job” y se creó un estudio nuevo para correr. Cuando se sube el trabajo a calcular y el estatus cambia a “completed” sin errores se procede a visualizar los resultados. En la figura 23, se muestra el trabajo completado.

Con el trabajo completado, se realiza la convergencia de mallados con el método de error de gradiente hasta obtener un error menor al 3%, utilizando mallas desde 0.5 mm y reduciendo 0.1 mm por mallado.

En el experimento se propone exponer los paneles solares por 14 días a la intemperie. Una celda solar con una instalación regular y otra con sumidero de calor. Se midieron las temperaturas y señales eléctricas como voltaje y corriente. Las celdas se instalaron a 32 grados, esto se hace considerando el acimut respecto a la posición de la región en la zona (31.695456°, -106.491028°).

Los elementos para ejecución y medición del experimento son los siguientes:

- Celdas solares de 6V y 1W.
- Disipadores de calor rectangulares ATS-61310R-C1-R0.
- Termómetro infrarrojo.
- Multímetro.
- TIM T412 de Parker Chromerics.

Se hicieron capturas de temperatura, corriente y voltaje en las celdas solares todos los días a las 14:00 horas, siendo esta la hora de mayor radiación solar promedio del año. De este modo se obtuvieron los valores de operación bajo condiciones máximas de temperatura.

Con el objetivo de contrastar resultados del comportamiento de los sistemas, se consideraron los valores de la eficiencia de la celda sin disipador de calor como nominal.

En este análisis se toma en cuenta la  $\eta_{nominal}$  como el valor de la celda solar funcionando al 100% de su capacidad, teniendo valores de hasta 0.4 W de potencia y eficiencia del 6%. De esta forma se pudieron ilustrar los valores de las eficiencias arrojadas y la diferencia de desempeño entre las dos configuraciones.

Como se demuestra en la ejecución experimental, al aplicar disipadores de calor en celdas solares se tiene un incremento de potencia de hasta 0.1029 W y una reducción de temperatura máxima de 17.8 °C. En promedio se obtiene un incremento de 0.0346 Watts por celda. Con esto se calcula el aumento de eficiencia en el sistema, el cual se demuestra en la tabla 1.

Los valores promedio de las mediciones nos demuestran que hay aumentos de voltaje de hasta 0.66 V, importante para la estabilidad del sistema.

Por otra parte, se puede observar que en cuestión de corriente no se tiene un impacto significativo, pero en cuestión de potencia se obtuvieron valores de hasta de 0.1 W más. La eficiencia energética de

la celda solar puede aumentar hasta un 29.166 % en comparación con su valor nominal, siendo 10.025 % el aumento de eficiencia promedio respecto a su valor nominal.

Tabla 1. Eficiencia registrada por celda solar.

EFICIENCIA						
Día	Potencia Irradiada (Wh/m <sup>2</sup> )	POTENCIA OBTENIDA		%		Aumento / Disminución de eficiencia (%)
		Sin Heatsink (W)	Con Heatsink (W)	Sin Heatsink	Con Heatsink	
1	2525.3	0.337	0.397	5.114	6.029	17.888
2		0.343	0.443	5.208	6.727	29.166
3		0.374	0.331	5.671	5.016	-11.548
4		0.375	0.385	5.683	5.839	2.743
5		0.359	0.360	5.442	5.457	0.274
6		0.411	0.457	6.235	6.933	11.189
7		0.400	0.439	6.067	6.657	9.735
8		0.431	0.465	6.541	7.053	7.828
9		0.404	0.438	6.123	6.638	8.414
10		0.397	0.451	6.030	6.834	13.340
11		0.347	0.404	5.258	6.123	16.440
12		0.281	0.306	4.270	4.637	8.586
13		0.357	0.402	5.421	6.097	12.474
14		0.358	0.407	5.425	6.175	13.817

## Conclusiones

En la investigación llevada a cabo se demostró que aplicar disipadores de calor con aletas rectangulares en la parte posterior de las celdas solares mejora considerablemente el desempeño energético de un sistema fotovoltaico en condiciones climáticas como las de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Los resultados arrojados muestran cómo es que, al reducir la temperatura en un promedio de 10.97 °C, se obtuvo un aumento de voltaje de salida de 0.2475 V y un aumento de potencia de 0.0346 W de media. Estos resultados se traducen en un aumento de eficiencia del 10.02% respecto a sus valores de operación nominales, pudiendo decir que la aplicación de disipadores de calor es una solución viable al sobrecalentamiento de dispositivos fotovoltaicos en zonas con clima cálido.

Se validaron las simulaciones numéricas llevadas a cabo en ABAQUS mediante experimentación con componentes comerciales (un panel solar y disipadores de calor), lo cual respalda la viabilidad del estudio. Por otra parte, se identificaron retos como las variaciones climáticas y costos asociados con el desarrollo y construcción del sistema que podrían influir en el desempeño de sistemas de diferentes escalas. Con la intención de continuar con el desarrollo de sistemas de gestión térmica se sugiere que en futuros estudios se experimente con distintas geometrías como cilindros, perfiles que canalicen el aire o incluso revisar la viabilidad de aplicar ventiladores al sistema. Estos estudios podrían encaminar a soluciones de aprovechamiento eficiente de energía y recursos económicos disponibles, así como su incorporación formal al mercado.

Respecto de las simulaciones numéricas, se podría mallar con diferentes geometrías de elementos y más tamaños de malla e inclusive probar soluciones multipasos. Inclusive, se podría crear un software propio en Python, o fortran o algún otro compilador para comparar variaciones.

## Referencias

- [1] D. Larcher and J. M. Tarascon, "Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage," *Nature Chemistry*, vol. 7, no. 1, pp. 19–29, 2015. DOI: 10.1038/nchem.2085.
- [2] R. Lasseter and P. Piagi, "Microgrid: A Conceptual Solution," 2004.
- [3] Y. Çengel and A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, 4th ed., 2011.
- [4] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*, 2019.
- [5] G. Brambati, M. Guilizzoni, and S. Foletti, "Convective heat transfer correlations for Triply Periodic Minimal Surfaces based heat exchangers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 242, 2024. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122492.
- [6] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, and A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., 2007.
- [7] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2011.
- [8] M. Krstic et al., "Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, 2024. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102330.
- [9] M. Barhami, "Natural Convection," 2009.
- [10] European Union Clean Energy Technology Observatory, "STATUS REPORT ON TECHNOLOGY DEVELOPMENT, TRENDS, VALUE CHAINS & MARKETS," 2023.
- [11] R. Gallardo, S. Placencia, and L. González, "Diseño de un cargador de baterías en aplicaciones de energía solar," 2014.
- [12] A. Al-Waeli and H. Kazem, *Photovoltaic / Thermal (PV/T) Systems*, 2019.

- [13] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, 2013. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060.
- [14] El Paso International Airport, "Datos históricos meteorológicos de 2024 en Ciudad Juárez," 2024. [Online]. Available: WeatherSpark.
- [15] GPD Global, "Keeping Cool: How Thermal Interface Materials Drive Electronic Innovation," 2024.
- [16] A. M. Ali Morad, A. K. S. Al-Sayyab, and M. A. Abdulwahid, "Optimization of tilted angles of a photovoltaic cell to determine the maximum generated electric power: A case study of some Iraqi cities," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, pp. 484–488, 2018. DOI: 10.1016/j.csite.2018.07.001.

## Semblanza Autores



Diego Moisés Almazo Pérez, Dr. en ciencias en Ingeniería mecánica, especialidad, turbo maquinaria. Actualmente labora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.



Delfino Cornejo Monroy, Dr. En Ciencias en Ingeniería Mecánica. Actualmente labora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.



Luis Esteban Argueta Ramírez, es ingeniero mecánico. Actualmente labora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.



Carlos Alberto Gómez Álvarez, Dr. en ciencias en Ingeniería mecánica. Actualmente labora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.



Roberto Romero López, Dr. En Ciencias en Ingeniería Mecánica. Actualmente labora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

# Modelado e implementación de sistema mecánico masa-resorte-amortiguador: Una revisión

## Modeling and implementation of mechanical system mass-spring-damper: A review

Mayra M. Ayala García<sup>1</sup>, Omar A. Mendoza Aguilar<sup>1</sup>, Kassandra Meza Ibarra<sup>1</sup>, Xiomara V. Moreno Núñez<sup>1</sup>, Guillermo J. Rubio Astorga<sup>1</sup>, Omar I. Gaxiola-Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad de Posgrado, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Culiacán, guillermo.ra@culiacan.tecnm.mx

### Resumen

El análisis de sistemas mecánicos mediante herramientas de modelado y simulación es fundamental en la ingeniería. Lo anterior, debido a que propicia el entendimiento y la correcta interpretación de sistemas reales. Además, permite realizar ajustes que mejoran la eficiencia y rendimiento de los sistemas ante cambios. Este análisis se realiza mediante diversas técnicas como son: Álgebra de bloques, método de Mason, Bond Graph, espacio de estados, etc. Se realizó la simulación e implementación de un sistema masa resorte amortiguador que muestra que dichos modelos y su realización tienen el mismo comportamiento.

**Palabras clave:** Modelado matemático, sistema masa-resorte-amortiguador, función de transferencia.

### Abstract

The analysis of mechanical systems using modeling and simulation tools is fundamental in engineering. Therefore, it promotes understanding and the correct interpretation of real systems. In this way, it is possible to comprehend and solve problems that involve knowledge of the behavior and structure of a real system. Furthermore, it allows improvement for adjustments that benefit the system in response to changes. This analysis used various techniques: Block algebra, Mason's method, Bond graph and state space. The simulation and implementation of a mass spring damper system was made, which shows that the applied techniques and their implementation have the same behavior.

**Keywords:** Mathematical modeling, mass-spring-damper system, transfer function.

Recibido: 29/11/2024; Aceptado 07/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introducción

Un sistema es una combinación de componentes que actúan simultáneamente para alcanzar un objetivo definido [1]. Los sistemas pueden representarse de diversas formas, lo que da lugar a múltiples modelos matemáticos. En este sentido, un modelo matemático del sistema es aquel que determina las funciones matemáticas que representan el comportamiento de las variables de interés de éste [2]. Es decir, el modelo matemático muestra las ecuaciones que nos permiten representar, lo más cercano a la realidad, un sistema.

Una función de transferencia son expresiones matemáticas que caracterizan la relación de entrada y salida del sistema. Dichas expresiones se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales en el tiempo. Mientras que la relación entre la entrada y salida se describe como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada, en condiciones iniciales equivalentes a cero [1].

Por lo anterior, la función de transferencia es un elemento muy valioso en los sistemas. Al describir la relación entre la respuesta y las variables de entrada, es posible comprender y analizar el comportamiento de los sistemas. Así como existen múltiples modelos matemáticos, existen diversas técnicas para obtener la función de transferencia. Dentro de esta diversidad, puede ser complejo determinar qué técnica o herramienta utilizar. Lo anterior puede responderse dependiendo de los conocimientos previos y las herramientas disponibles. Sin embargo, se investigará si las técnicas aplicadas conducen a la misma función de

transferencia. De esta manera, corroborar que, aplicando correctamente cada técnica, el resultado debe ser homogéneo. Así, al comprender cada técnica se puede tomar una mejor decisión a la hora de escoger una técnica dependiendo de los recursos disponibles. Aunado a esto, se garantiza una mejor comprensión del sistema de interés. Por último, se verificará que, aplicando correctamente las técnicas, existen múltiples herramientas que nos permiten determinar la función de transferencia de los sistemas. Además, cabe mencionar, el sistema masa resorte amortiguador tiene importantes aplicaciones prácticas en la vida real. Su implementación en la suspensión de vehículos, así como en la atenuación de vibraciones en edificaciones, puentes y maquinaria industrial, destaca la importancia en modelar y analizar este tipo de sistemas, tanto para su diseño como para su óptimo funcionamiento [3][4].

Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo demostrar que, independientemente de la técnica utilizada, la función de transferencia obtenida debe ser la misma.

### Sistema de estudio

El sistema de interés corresponde a un sistema mecánico conformado por dos masas ( $m_1$  y  $m_2$ ), dos resortes ( $k_1$  y  $k_2$ ) y un amortiguador ( $b_1$ ). Está afectado por una fuerza de salida ( $u$ ) y cuenta con dos salidas ( $y_1$  y  $y_2$ ) y está descrito por las ecuaciones 1 y 2. Por lo anterior, se obtendrán dos funciones de transferencia correspondientes a cada salida. En la figura 1, se encuentra una representación gráfica del sistema antes descrito.

Los valores o parámetros del sistema fueron definidos previamente. Por otra parte, los parámetros para el sistema real fueron calculados; todos éstos se encuentran señalados en la tabla 1.

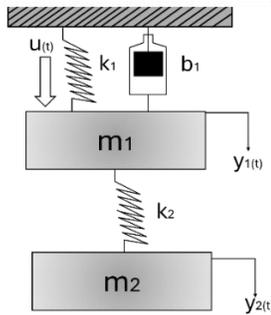


Figura 1. Sistema masa-resorte-amortiguador estudiado

Tabla 1. Parámetros del sistema de estudio y real

Parámetro	Ejercicio	Real
u(t)	15 N	45.28 N
k1	130	392.4
k2	150	981
b1	0.25 N/m	0.3836 N/m
m1	1.5 kg	4.53 kg
m2	0.5 kg	3.27 kg

Por otra parte, se muestran las ecuaciones 1 y 2 que son aquellas que rigen al sistema:

$$m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = -(k_1 + k_2)y_1(t) - b_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + k_2 y_2(t) + u(t) \quad (1)$$

$$m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} = k_2 y_1(t) - k_2 y_2(t) \quad (2)$$

## Metodología

En su totalidad, fueron aplicadas cinco técnicas diferentes. De cada una se obtuvo una función de transferencia y una representación gráfica de dicha función. Las técnicas aplicadas fueron: metodología de Laplace, álgebra de bloques, método de Mason, Bond graph y espacio de estados. Las técnicas antes mencionadas, salvo Bond graph, fueron ejecutadas y representadas en el software Matlab, fue así como se comprobaron los resultados. De esta manera se corrobora que existen múltiples formas de obtener la función de transferencia de un sistema.

### Metodología de Laplace

Una manera sencilla de obtener la función de transferencia de un sistema es aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones de dicho sistema. Considerando condiciones iniciales nulas, se parte de las siguientes ecuaciones 1 y 2. Aplicando la transformada de Laplace a cada ecuación se obtiene:

$$-(k_1 + k_2)y_1(s) - b_1 s y_1(s) + k_2 y_2(s) + u(s) = m_1 s^2 y_1(s) \quad (3)$$

$$k_2 y_1(s) - k_2 y_2(s) = m_2 s^2 y_2(s) \quad (4)$$

Para obtener la función de transferencia de  $y_2(s)$  es necesario despejarlo de la ecuación 4 y sustituirlo en la ecuación 3 como se muestra a continuación:

$$-(k_1 + k_2)y_1(s) - b_1 s y_1(s) + k_2 \left( \frac{k_2 y_1(s)}{m_2 (s^2 + k_2)} \right) + u(s) = m_1 s^2 y_1(s) \quad (5)$$

$$\frac{y_1(s)}{u(s)} = \frac{m_2 s^2 + k_2}{(m_1 m_2 s^4) + (b_1 s^3 m_1) + (m_1 k_2 + k_1 m_2 + k_2 m_2)(s^2) + (b_1 s k_2) + k_1 k_2} \quad (5.1)$$

De una manera más rápida se obtiene la función de transferencia para  $y_2(s)$ , utilizando la ecuación 5.1 de función de transferencia para  $y_1(s)$ . De la ecuación 4 se despeja  $y_1(s)$  y se sustituye en la ecuación 5.1.

$$y_1(s) = \frac{(m_2 s^2 + k_2)y_2(s)}{k_2} \quad (6)$$

$$\frac{y_2(s)}{u(s)} = \frac{k_2}{(m_1 m_2 s^4) + (b_1 s^3 m_1) + (m_1 k_2 + k_1 m_2 + k_2 m_2)(s^2) + (b_1 s k_2) + k_1 k_2} \quad (6.1)$$

### Diagrama y álgebra de bloques

A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques posee la ventaja de representar de forma más realista el flujo de las señales del sistema real [1]. Expresa el sistema mediante bloques con ecuaciones organizados para una manipulación sencilla.

En este tipo de diagramas, todas las variables del sistema se enlazan unas con otras mediante bloques funcionales. Éstos son un símbolo para representar la operación matemática sobre la señal de entrada hacia el bloque para producir una salida. Las funciones de transferencia de los componentes, generalmente, se introducen en los bloques correspondientes, conectándose mediante flechas para indicar la dirección del flujo de señales [1].

Parte de sus ventajas recae en la facilidad de formar el diagrama de bloques general de todo el sistema con solo conectar los componentes adecuados. Mediante el flujo de señal, es posible evaluar la contribución de cada componente en el desempeño general del sistema [1]. Para abordar el sistema de estudio de la figura 1, se parte de las ecuaciones 3 y 4.

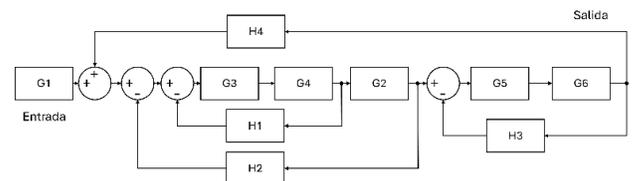


Figura 2. Diagrama de bloques propuesto para la salida  $y_2$

El diagrama de bloques propuesto se representa en la figura 2. Para obtener la función de transferencia es necesario realizar álgebra de bloques. Debido a que el término  $k_2/m_1$  afecta tanto a  $y_1(s)$  como a  $y_2(s)$  la función de transferencia obtenida será de  $y_2(s)$ . Es necesario señalar que los diagramas cuentan con bloques de step y scope para aplicar la fuerza  $u$  y para visualizar la salida, respectivamente.

De esta manera se obtiene la función de transferencia para  $y_2$ :

$$FTy_2 = \frac{\frac{G_3 \cdot G_4 \cdot G_2 \cdot G_1}{1 + G_3 \cdot H_1 + G_3 \cdot G_4 \cdot H_2} \cdot \frac{G_5 \cdot G_6}{1 + G_5 \cdot G_6 \cdot H_3}}{\frac{1 - G_3 \cdot G_4 \cdot G_2}{1 + G_3 \cdot H_1 + G_3 \cdot G_4 \cdot H_2} \cdot \frac{H_4 \cdot G_5 \cdot G_6}{1 + G_5 \cdot G_6 \cdot H_3}} \quad (7)$$

Una vez determinada la función de transferencia de la salida  $y_2$ , es necesario modificar el diagrama de la figura 2 para obtener la salida  $y_1$ . Con las modificaciones adecuadas se presenta en la figura 3 el diagrama para la salida  $y_1$ .

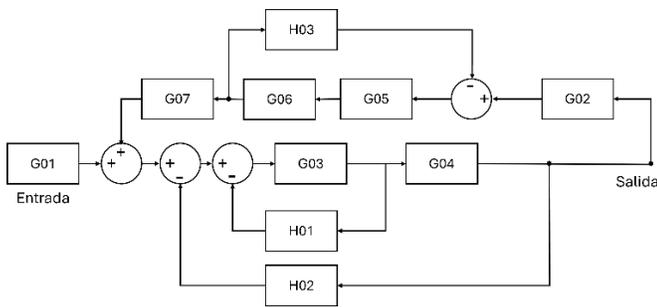


Figura 3. Diagrama de bloques propuesto para la salida  $y_1$ .

Se obtiene el bloque de la función de transferencia para  $y_1$ . La expresión obtenida es:

$$FTy_1 = \frac{\frac{G_03 \cdot G_04 \cdot G_01}{1 + G_03 \cdot H_01 + G_03 \cdot G_04 \cdot H_02}}{\frac{1 - G_03 \cdot G_04}{1 + G_03 \cdot H_01 + G_03 \cdot G_04 \cdot H_02} \cdot \frac{G_06 \cdot G_05 \cdot G_07 \cdot G_02}{1 + G_06 \cdot G_05 \cdot H_03}} \quad (8)$$

**Método de Mason**

Este método, también conocido como fórmula de ganancia de Mason, transforma el diagrama de bloques en un diagrama de flujo de señal o reograma. Es decir, es una versión simplificada de éste. En este caso, los bloques se convierten en señales y los sumadores en nodos. Consta de una versión simplificada que también nos permite llegar a la función de transferencia [5].

La ecuación utilizada para este método se puede observar en la ecuación 9 [6], donde  $\Delta_k$  se refiere a la aportación de los lazos a las trayectorias, mientras que  $P_k$  a las trayectorias directas:

$$FT = \frac{F(s)}{F(i)} = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (9)$$

La figura 4 representa el reograma para obtener la primera función de transferencia, es decir,  $y_1$ . En este se señala una única trayectoria que puede definirse como:

Trayectoria:  $G_01 \cdot G_03 \cdot G_04$

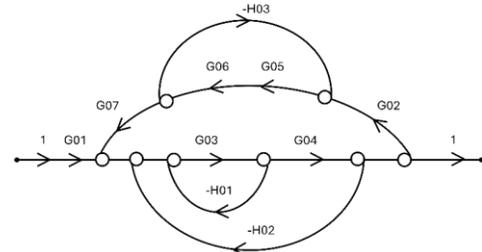


Figura 4. Diagrama de flujo de señal propuesto para la salida  $y_1$ .

De la misma figura se determina que el sistema está conformado por cuatro lazos, que son:

$$L_01: G_03 \cdot H_01, L_02: G_03 \cdot G_04 \cdot H_02, \\ L_03: G_03 \cdot G_04 \cdot G_02 \cdot G_05 \cdot G_06 \cdot G_07$$

Con la figura 4 es notable que existen lazos que no se tocan. En este caso los pares  $L_01$  y  $L_03$ , junto a  $L_02$  y  $L_03$  no se tocan. Con estos datos se define el determinante del sistema y de la trayectoria principal resultando:

$$\Delta = 1 - (L_01 + L_02 + L_03 + L_04) + L_01 \cdot L_03 + L_02 \cdot L_03 \\ \Delta_1 = 1 - L_03$$

Las variables se declaran como:

$$G_01 = \frac{1}{m_1}, \quad G_02 = \frac{k_2}{m_2}, \quad G_03 \text{ a } G_06 = \frac{1}{s},$$

$$G_07 = \frac{k_2}{m_1}, \quad H_01 = -\frac{b_1}{m_1}, \quad H_02 = -\frac{k_1+k_2}{m_1}, \quad H_03 = -\frac{k_2}{m_1}$$

Con la información obtenida, se genera un código en Matlab para determinar la función de transferencia. Al ejecutar el programa se obtiene la expresión matemática que representa a la función de transferencia para la salida:

$$y_1 = \frac{0.2373 s^{18} + 71.19 s^{16}}{0.356 s^{20} + 0.05933 s^{19} + 173.2 s^{18} + 17.8 s^{17} + 9255 s^{16}}$$

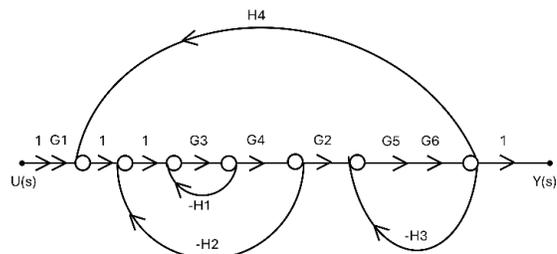


Figura 5. Diagrama de flujo de señal propuesto para la salida  $y_2$ .

Para la salida  $y_2$ , se desarrolló otro reograma representado en la figura 5. De esta manera se obtiene la función de transferencia para la segunda salida. En este se señala una única trayectoria que puede definirse como:

$$\text{Trayectoria: } G1 \cdot G3 \cdot G4 \cdot G2 \cdot G5 \cdot G6$$

Con la figura 5, es notable que existen lazos que no se tocan. En este caso los pares  $L1$  y  $L3$ , junto a  $L2$  y  $L3$  no se tocan. Con estos datos se define el determinante del sistema y de la trayectoria principal resultando:

$$\Delta = 1 - (L1 + L2 + L3 + L4) + L1 \cdot L3 + L2 \cdot L3 = 1$$

Las variables se declaran como:

$$G1 = \frac{1}{m_1}, \quad G2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad G3 \text{ a } G6 = \frac{1}{s},$$

$$H1 = -\frac{b_1}{m_1}, \quad H2 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1}, \quad H3 = -\frac{k_2}{m_2}, \quad H4 = \frac{k_2}{m_1}$$

Con la información obtenida, se genera un código en Matlab para determinar la función de transferencia. Al igual que en la salida  $y_1$ , se ejecuta el código y se obtiene la siguiente expresión:

$$y_2 = \frac{71.19 s^{16}}{0.356 s^{20} + 0.05933 s^{19} + 173.2 s^{18} + 17.8 s^{17} + 9255 s^{16}}$$

### Bond graph

Es una herramienta muy útil para el modelado de sistemas por su capacidad para describir el comportamiento dinámico. Lo anterior indica que es posible describir múltiples sistemas como mecánicos, hidráulicos, eléctricos, etc.

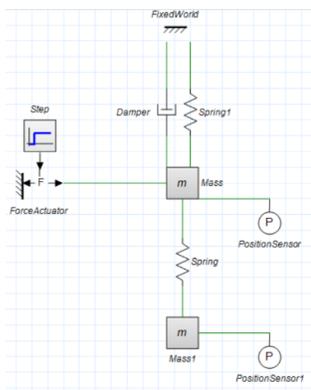


Figura 6. Modelo mecánico desarrollado en 20 Sim.

Esta técnica se fundamenta en la energía y su intercambio o transferencia entre los componentes del sistema [7]. De esta manera, se representa gráficamente las ecuaciones diferenciales del modelo [8]. La

ventaja reside en su capacidad para modelar subsistemas independientemente que se relacionan a través del intercambio de esfuerzos y flujos de energía [9]. Esto permite un enfoque tanto particular como general del sistema ya que puede analizarse cada elemento que lo conforma y después, analizar su comportamiento global en el sistema [9].

También, pueden analizarse dos tipos de modelado. El primero es la representación gráfica, el segundo es el de esfuerzos y flujos. Lo que hace posible utilizar los elementos de cada dominio como bloques que representan al sistema. Por otra parte, se utilizan lazos y flechas. Cada línea o flecha representa la transferencia de energía [9]. Así, se puede representar el sistema de interés y determinar la señal que genera éste. En las figuras 6 y 7 se representa el sistema tanto en un modelo mecánico como en el gráfico de bond. En la figura 8 se muestra la gráfica con las señales de respuesta de éstos.

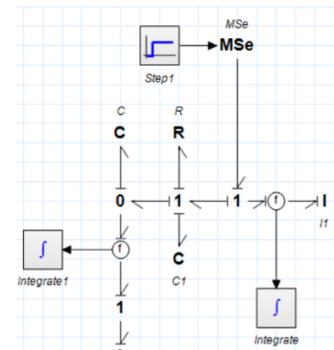


Figura 7. Gráfico de Bond propuesto para el sistema de estudio desarrollado en 20 Sim.

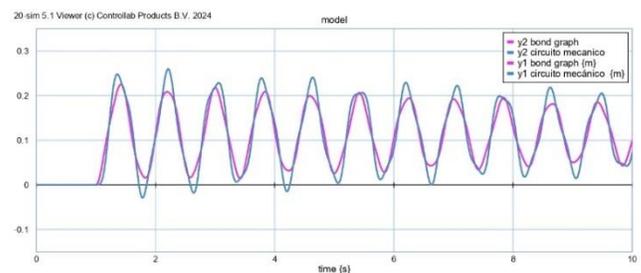


Figura 8. Gráfica de señales de respuesta en 20 Sim.

### Espacio de estados

Este método se fundamenta en representar el sistema con un conjunto de  $n$  ecuaciones de primer orden, que puedan integrarse en una ecuación matricial de primer orden. Facilitando así, de manera significativa la representación matemática de dicho sistema de ecuaciones [10]. A través del espacio de estados se representa el sistema enfocándose en sus variables internas, denominadas variables de estado. Estas variables son las mínimas necesarias para describir la dinámica del sistema. Por otra parte, las ecuaciones de estado explican

la relación entre estas variables, es decir, cómo dependen entre sí y su respuesta a la entrada y salida. Para representar un sistema en el espacio de estado, es necesario transformar sus ecuaciones de manera que se obtenga la variación en el tiempo de cada una de las variables de estado seleccionadas [11].

Esta representación puede derivarse de las ecuaciones diferenciales que describen al sistema o de cualquier conjunto de ecuaciones diferenciales.

Por otro lado, la función de transferencia es una ecuación que relaciona directamente la entrada y la salida del sistema sin observar qué pasa dentro del mismo. A partir de las ecuaciones de estado es posible obtener la función de transferencia usando ciertas operaciones matemáticas, entre ellas la transformada de Laplace, permitiendo resumir todo el comportamiento del sistema.

Para aplicar esta técnica, se dividió el sistema en dos partes. La primera parte abarca a las fuerzas que afectan a la  $m_1$ , en este caso son dos resortes, el amortiguador y la fuerza externa  $u$ .

Considerando la ecuación 1, es posible definir las variables de estado como: no hacer el desarrollo, mencionar que se llevaron por esta metodología y llevar a la ecuación final.

De las ecuaciones dinámicas del sistema (ecuación 1 para  $m_1$  y ecuación 2 para  $m_2$ ), se propuso una representación en el espacio de estados. Las variables y ecuaciones de estado se definieron para  $m_1$  y  $m_2$ . Reorganizando las ecuaciones en forma matricial, el sistema quedó representado según las ecuaciones 10 y 11.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (10)$$

$$y(t) = Cx(t)Du(t) \quad (11)$$

sustituyendo las matrices:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -(k_1 + k_2) & -b_1 & k_1 & 0 \\ m_1 & m_1 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_2 & 0 & -k_2 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad D = 0$$

A partir de esta representación, se utilizó la formulación general de espacio de estados y su transformación de Laplace (ecuación 12) para obtener la función de transferencia.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C[sI - A]^{-1}B + D \quad (12)$$

Por último, se realizan las operaciones matriciales en Matlab siguiendo el procedimiento descrito en la figura 9. Para esto, se definen las

variables del sistema de la figura 1 y cada una de las matrices (A, B, C y D), junto a la matriz identidad (I). Con los elementos definidos se obtienen las funciones de transferencia para ambas salidas: primero utilizando la ecuación 12, y, posteriormente utilizando función ss2tf, que calcula directamente la función de transferencia a partir del espacio [12].

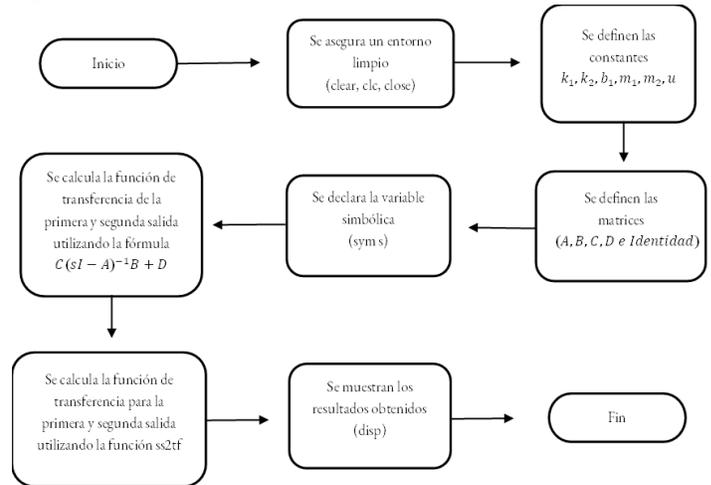


Figura 9. Procedimiento para obtener la función de transferencia para  $y_1$  y  $y_2$  a partir del espacio de estados en Matlab.

Con este código se obtuvo la función de transferencia para cada una de las salidas  $y_1$  y  $y_2$  mostradas en la ecuación 13 y 14, respectivamente. Se obtuvo la función mediante dos códigos diferentes, pero, el resultado fue el mismo ya que, al comparar las salidas mediante bloques en Simulink, se obtuvo la misma.

$$y_1 = \frac{0.6667 s^2 + 200}{s^4 + 0.1667 s^3 + 486.7 s^2 + 50 s + 2.6e04} \quad (13)$$

$$y_2 = \frac{200}{s^4 + 0.1667 s^3 + 486.7 s^2 + 50 s + 2.6e04} \quad (14)$$

### De función de transferencia a espacios de estados

Para este método se hace el procedimiento inverso al espacio de estados, detallado paso a paso. En primer lugar, se parte de la función de transferencia correspondiente a  $y_1$  (ecuación 13). Se manipula cruzando denominadores, de modo que se obtiene una ecuación polinómica en  $s$  que involucra a  $y_1$  y a  $u$ . A continuación, se procede a integrar sucesivamente, tomando  $s$  como factor, para introducir nuevas variables de estado que encapsulan los términos resultantes. Después de la primera integración, se define una primera variable de estado  $x_1$ ; tras la segunda, se introduce  $x_2$ ; y así sucesivamente, hasta llegar a la cuarta variable de estado  $x_4$ .

Al finalizar el proceso, se obtienen cuatro ecuaciones de estado:  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$ ,  $\dot{x}_3$  y  $\dot{x}_4$ . Dichas ecuaciones se reorganizan de forma matricial para llegar al modelo en espacio de estado (ecuación 10 y 11).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -2.6 \times 10^4 & -50 & -486.7 & -0.1667 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 200 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad D = [0]$$

Repetimos el mismo procedimiento para la salida de  $y_2$  (ecuación 14), teniendo como resultado las matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2.6 \times 10^4 \\ 1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & 1 & 0 & -486.7 \\ 0 & 0 & -1 & -0.1667 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 200 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad D = [0]$$

### Discretización

El proceso de discretización es un método que convierte a las ecuaciones que gobiernan el sistema a ecuaciones discretas [13]. Este proceso, también conocido como muestreo, reemplaza la señal continua por un conjunto de valores tomados en diferentes puntos discretos de tiempo [14]. Con lo anterior, este proceso simplifica el análisis de los sistemas ya que solo considera ciertos valores del tiempo continuo. No obstante, para determinar que la discretización se ha ejecutado correctamente, ésta debe representar adecuadamente las características esenciales del sistema [14]. Lo anterior se traduce en que, la señal generada del proceso de discretización debe tener un comportamiento aproximado a la señal real o continua del sistema.

Para nuestro sistema, una vez que se corroboraron que todos los métodos aplicados generan las mismas salidas, añadimos la línea de discretización. Utilizando las funciones de Matlab, se realizó una discretización con un tiempo de muestra de 0.05 para ambas salidas ( $y_1$  y  $y_2$ ), obteniendo así las ecuaciones 15 y 16.

$$y_1 = \frac{7.997 \times 10^{-4} z^3 - 2.392 \times 10^{-4} z^2 - 2.34 \times 10^{-4} z + 7.974 \times 10^{-4}}{z^4 - 2.87 z^3 + 3.88 z^2 - 2.859 z + 0.9917} \quad (15)$$

$$y_2 = \frac{4.99 \times 10^{-5} z^3 + 5.126 \times 10^{-4} z^2 + 5.117 \times 10^{-4} z + 4.968 \times 10^{-5}}{z^4 - 2.87 z^3 + 3.883 z^2 - 2.859 z + 0.9917} \quad (16)$$

Se seleccionó este tiempo a causa de su similitud con el comportamiento del sistema real. Además, al trabajar con un sistema real nos permite tomar las muestras necesarias para garantizar el comportamiento modelado.

### Métodos para obtener la función de transferencia

Se compararon las respuestas de las técnicas mediante bloques de Simulink para corroborar que las salidas son iguales. En el programa se definieron bloques de cada una de las técnicas, salvo bond graph. También se encuentra la discretización y la función de transferencia del sistema real. Al correr el sistema se generaron dos bloques finales de

salida, uno para  $y_1$  y  $y_2$ , representados en las figuras 10 y 11 respectivamente. Al analizar las figuras es notable que todas las líneas evaluadas se sobrepone, lo que indica que la señal es la misma.

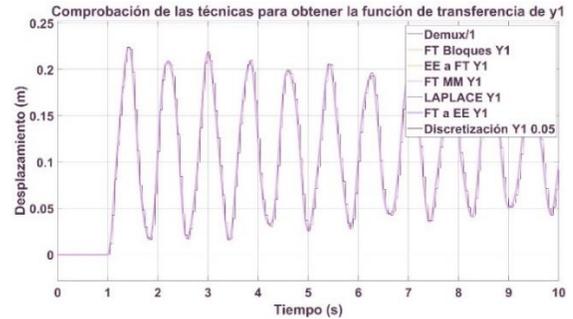


Figura 10. Comprobación para la salida  $y_1$ .



Figura 11. Comprobación para para la salida  $y_2$ .

## Resultados

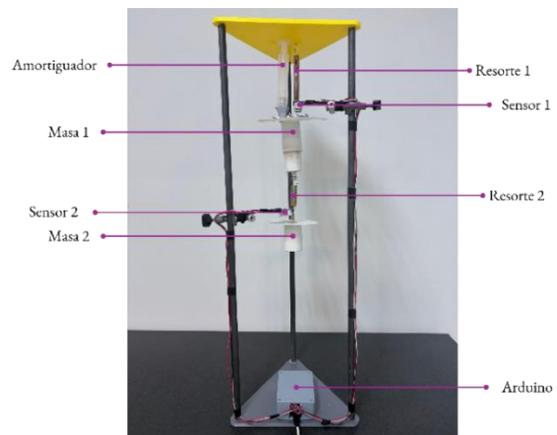


Figura 12. Sistema MRA propuesto en la realidad.

La base y la parte superior del sistema fueron fabricadas a medida mediante impresión 3D. Se conectaron sensores ultrasónicos HC-SR04 que miden la distancia, lo cual nos permite medir las oscilaciones del sistema una vez aplicadas las fuerzas del escalón que representan la fuerza externa  $u$ . Para que este sistema coincida con la representación matemática calculada anteriormente, se determinaron nuevos valores

para las variables. Con el cálculo de las determinantes, se obtuvieron los valores para las masas y la fuerza externa descritos en la tabla 1.

En la figura 12 se aprecia el sistema terminado y su configuración como un sistema masa-resorte-amortiguador.

Con estos elementos, y un microcontrolador, se elaboró un sistema de medición de distancias integrados con una computadora mediante programación en lenguaje C. De esta manera, los datos son transmitidos de manera eficiente a la computadora y pueden ser procesados.

### Métodos para obtener la función de transferencia

Se siguió la metodología descrita anteriormente para cada una de las técnicas, utilizando los valores reales descritos en la tabla 1. En comparación de otros trabajos [4], solo se obtuvo la función de transferencia por espacio de estados y transformada de Laplace. Por lo anterior, dada la metodología aplicada en esta investigación, se llegó a una representación del sistema con mayor validación debido a su múltiple comprobación gracias a la aplicación de distintas técnicas que arrojaron la misma función de transferencia apreciada en el comportamiento de la señal.

Los diagramas de bloques para ambas salidas son iguales a los que se aprecian en las figuras 2 y 3. Por lo tanto, se mantienen las mismas ecuaciones de transferencia (ecuación 7 y 8) para  $y_1$  y  $y_2$ . De igual manera, para el método de Mason, los diagramas propuestos para el sistema ideal (figura 4 y 5) siguen siendo aplicables para el sistema real. Para la representación en espacio de estados, esta vez utilizando los parámetros del sistema real (ver Tabla 1), se obtuvieron las funciones de transferencia que se muestran en las ecuaciones 17 y 18.

$$y_1 = \frac{0.2208 s^2 - 1.648e^{-15} s + 66.23}{s^4 + 0.08468 s^3 + 603.2 s^2 + 25.4 s + 2.599e04} \quad (17)$$

$$y_2 = \frac{66.23}{s^4 + 0.08468 s^3 + 603.2 s^2 + 25.4 s + 2.599e04} \quad (18)$$

A continuación, se invierte el proceso, y, con las ecuaciones 20 y 21 se obtuvieron las matrices del espacio de estados. Para la salida  $y_1$ :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -2.599 \times 10^4 \\ 1 & 0 & 0 & -25.4 \\ 0 & 1 & 0 & -603.2 \\ 0 & 0 & 1 & -0.08468 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 66.23 \\ 0 \\ 0.2208 \\ 0 \end{pmatrix}, C = (0 \ 0 \ 0 \ 1), D = 0$$

Y, para la salida  $y_2$ :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -2.599 \times 10^4 \\ 1 & 0 & 0 & -25.4 \\ 0 & 1 & 0 & -603.2 \\ 0 & 0 & 1 & -0.08468 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 66.23 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C = (0 \ 0 \ 0 \ 1), D = 0$$

En el caso de la discretización, se siguió el mismo procedimiento y también se aplicó un tiempo de muestreo de 0.05. Se obtuvieron las siguientes funciones de transferencia descritas en la ecuación (19) y (20).

$$y_1 = \frac{2.589 \times 10^{-4} z^3 - 7.729 \times 10^{-5} z^2 - 7.643 \times 10^{-5} z + 2.586 \times 10^{-4}}{z^4 - 2.644 z^3 + 3.43 z^2 - 2.639 z + 0.9958} \quad (19)$$

$$y_2 = \frac{1.639 \times 10^{-5} + 1.656 \times 10^{-4} z^2 + 1.655 \times 10^{-4} z + 1.635 \times 10^{-5}}{z^4 - 2.644 z^3 + 3.43 z^2 - 2.639 z + 0.9958} \quad (20)$$

La señal generada se mostrará en las figuras 14 y 15 acompañadas de las respuestas calculadas para la función de transferencia real.

### Comprobación de los resultados

Una vez ejecutadas las técnicas al aplicar los valores reales descritos en la tabla 2, se compararon las respuestas mediante bloques de Simulink para corroborar que su comportamiento coincidiera.

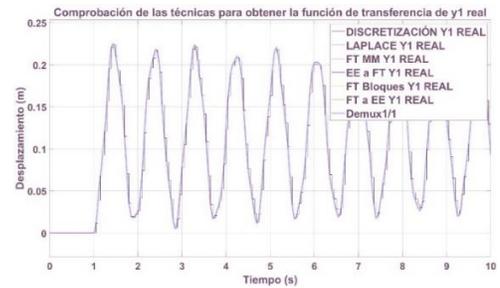


Figura 13. Comprobación de las técnicas para determinar la función de transferencia para  $y_1$  real y su discretización.

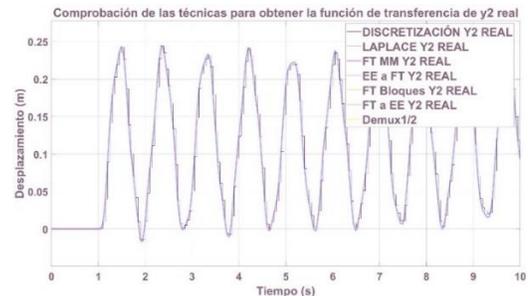


Figura 14. Comprobación de las técnicas para determinar la función de transferencia para  $y_2$  real y su discretización.

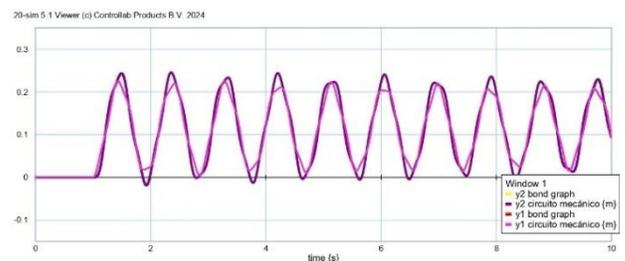


Figura 15. Simulación en 20 Sim del modelo mecánico y gráfico de bond representativos del sistema real.

En el programa se definieron bloques de cada una de las técnicas, salvo bond graph. Esta última se ejecutó en el programa 20 Sim, dando como resultado la señal de respuesta presentada en la figura 15.

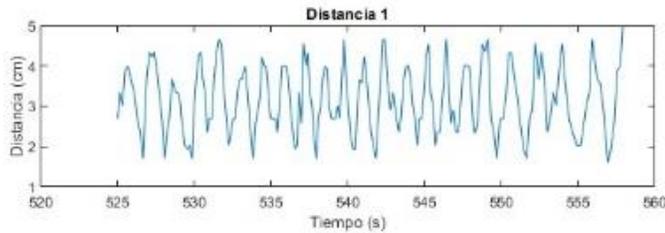


Figura 16. Simulación en tiempo real en Matlab para  $y_1$ .

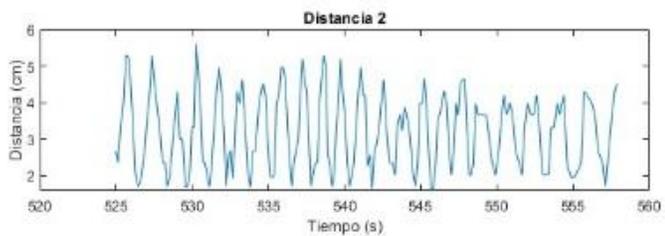


Figura 17. Simulación en tiempo real en Matlab para  $y_2$ .

Al correr el sistema se generaron dos scope para mostrar las gráficas de salida, uno para  $y_1$  y otro para  $y_2$ , representados en las figuras 13 y 14 respectivamente. Al analizar las figuras es notable que todas las líneas evaluadas se superponen, lo que indica que la señal es la misma. Al momento de compararlas con el modelado inicial con los valores del ejemplo (tabla 1) encontramos un comportamiento similar.

Por último, en la figura 15 se encuentra la ejecución de la técnica de Bond graph en el programa 20 Sim. Se aprecia que las señales generadas por el gráfico de bond y el circuito mecánico corresponden. Lo anterior también muestra un comportamiento muy similar a las señales generadas en las figuras 16 y 17 en Matlab, por lo que se puede afirmar que la ejecución es correcta.

Por último, en las figuras 17 y 18 se muestran las gráficas del sistema físico en tiempo real. En éstas se aprecia un comportamiento similar al calculado y simulado con las técnicas antes mencionadas con una ligera discrepancia entre las señales simuladas con valores reales y el sistema físico.

Lo anterior ocurre porque los sistemas previamente modelados son ideales, mientras que el sistema físico se ve afectado por factores externos como señales de ruido o inestabilidad en los sensores, lo cual puede afectar la señal de salida del sistema físico [15]. Estos factores pueden ser problemas de reflexión, frecuencias externas y/o cuestiones transversales [16].

## Conclusiones

Es posible obtener la función de transferencia mediante diversas técnicas. Ya que nos puede dar los mismos resultados, cada una de éstas tiene sus ventajas y desventajas. Una de ellas es el diagrama de bloques, que es una técnica simple donde se aplican fórmulas para realizar operaciones entre bloques y otra que existen múltiples formas de resolverlo. Sin embargo, es un proceso un poco más extenso que en otras técnicas y, como se aprecia en los resultados, la función de transferencia resulta en una expresión muy larga. Algo similar ocurre con el método de Mason, puesto que se basa en la técnica anterior, sin embargo, al determinar sus componentes (lazos y trayectorias) es fácilmente ejecutable en softwares especializados como lo es Matlab. Siguiendo con Bond graph, es una técnica sencilla puesto que solo debe generarse el diagrama de bond y definir sus parámetros, pero, necesita del software 20 Sim para ejecutarse. Por último, el espacio de estados destaca por su alta aplicabilidad a diversos tipos de sistemas y por su capacidad para representar de manera clara la interacción entre las variables internas, así como sus efectos en el comportamiento general del sistema. No obstante, en sistemas de alto orden, que cuente con un número considerable de variables de estado, el trabajo con matrices grandes puede incrementar la dificultad y aumentar el riesgo de cometer errores durante el análisis o los cálculos.

Dependerá de las propiedades del sistema y de cada usuario, y de sus conocimientos y herramientas, determinar qué técnica desea utilizar.

En este estudio, las tres técnicas que se aplican en Matlab generaron la misma función de transferencia.

De igual manera, la discretización calculada representa adecuadamente el sistema y nos permite tener una representación de este con menos recursos y sin perder la precisión de los resultados.

Por último, el sistema real propuesto nos permite entender a profundidad el comportamiento de un sistema masa-resorte-amortiguador. La señal del sistema físico presentó ruido, sin embargo, el comportamiento fue similar al simulado.

## Reconocimientos

En primer lugar, agradecemos a nuestra institución, Tecnológico Nacional de México campus Culiacán, por proporcionarnos los recursos académicos y de infraestructura necesarios para el desarrollo del proyecto. Al SECIHTI por el apoyo como becarios nacionales.

## Referencias

- [1] Ogata, K., Ingeniería de control moderna. 5ta. Ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN. Prentice Hall Pearson. 2010.
- [2] Llata García, J. R., Gonzáles Sarabia, E., Fernández Pérez, D., & Torre Ferrero, C., Modelado de Sistemas de Control. Universidad de Cantabria. Recuperado 3 de diciembre de 2024, de [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1829/course/section/1438/capitulo\\_1.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1829/course/section/1438/capitulo_1.pdf)
- [3] Espinosa Justo, E., Linares Flores, J., Barahona Avalos, J., Guerrero Ramírez, E. O., & Sandoval García, A. P., Control Proporcional-Integral-Generalizado de un Sistema Masa-Resorte-Amortiguador. VI Semana Nacional de Ingeniería Electrónica, (págs. 25-32). Oaxaca, 2010.
- [4] Hernández Zárate, J. A., Servín Martínez, A., Morales Tassinari, A. M., Domínguez Sánchez, G., & Gómez Acevedo, H. M., MODELADO Y SIMULACION DE UN ABSORBEDOR DE VIBRACIONES USANDO TECNICAS DE CONTROL PARA UN SISTEMA MECANICO. REVISTA ELECTRONICA EN INGENIERIA MECANICA, 1-16. 2016.
- [5] electronica, W., Diagrama de bloques- Solución por fórmula de ganancia de Mason. Obtenido de Wilaeba electronica: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2020/03/diagrama-de-bloques-solucion-por-formula-de-ganancia-de-mason.html>
- [6] UNAM. (2018). Reogramas (Diagramas de flujo de señal). Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/ime/reogramas-diagramas-de-flujo-de-senal/>
- [7] Siemens. The Basics Of The Bond Graph Theory. <https://community.sw.siemens.com/s/article/the-basics-of-the-bond-graph-theory>
- [8] College of Engineering. Bond Graph Fundamentals. 2023. [https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE330\\_files/Section%20%20Bond%20Graph%20Fundamentals.pdf](https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE330_files/Section%20%20Bond%20Graph%20Fundamentals.pdf)
- [9] Borutzky, W. (2010). Bond Graph Methodology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-882-7>
- [10] Ogata, K., Sistemas de Control en Tiempo Discreto. 2da Ed. Prentice Hall. 1996.
- [11] Mohammed, H., Uchenwa Linus Okafor, & Aliyu Jaafar Bello. (2023). An Investigation of Stability, Controllability and Observability of a Three Degree of Freedom Translational Mechanical System using State Space Approach. Applied Mathematics and Computational Intelligence (AMCI), 12(4), 76–93. <https://doi.org/10.58915/amci.v12i4.82>
- [12] MathWorks. (s.f.). ss2tf. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ss2tf.html>
- [13] Barreiro, M., Discretización de ecuaciones. Obtenido de Modelización Numérica de la Atmósfera 2017: [http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/Modelacion\\_numerica\\_atms/Tema2\\_17.pdf](http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/Modelacion_numerica_atms/Tema2_17.pdf)
- [14] Zannin, C., Discretización. Obtenido de Hypergeo: <https://hypergeo.eu/discretizacion/?lang=es>
- [15] Suhas, S., Wang, L., Golsby, N. & Lander, M., Optimización basada en la interacción fluido-estructura en turbinas de marea: una revisión desde una

perspectiva. Revista de Ingeniería y Ciencia Oceánica, 7(2022), 449-461. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.09.017>. 2022

[16] SOLIDAT. (8 de Abril de 2024). Resuelva los problemas de los sensores ultrasónicos: los problemas de reflexión, ruido y cruce se convierten en desafíos. Obtenido de SOLIDAT: <https://es.solidat.net/news/solve-ultrasonic-sensor-problems-reflection-76500962.html>

## Semblanza Autores



Ing. Ayala García Mayra Mayte, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.



Ing. Mendoza Aguilar Omar Alejandro, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.



Ing. Meza Ibarra Cassandra, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.



Ing. Moreno Nuñez Xiomara Vianey, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.



Dr. Guillermo Javier Rubio Astorga Ingeniero Eléctrico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara.



Dr. Gaxiola Sánchez Omar Iván, Ingeniero Electrónico por Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003), Maestro en Ciencias en Sistemas Digitales por CITEDI (2005) y Doctor en ciencias de la información por la UAS (2019).

# Algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para un Convertidor Elevador de un Sistema Fotovoltaico vía Control Predictivo basado en Modelos

## Maximum Power Point Tracking Algorithm for a Boost Converter in a Photovoltaic System via Model Predictive Control

Mario Castro Torres, Aldo N. Higuera Juárez<sup>1</sup>, Alejandro Lizárraga Lizárraga<sup>1</sup>, David López Flores<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias Aplicadas. Tecnologías Sostenibles. Universidad Politécnica de Sinaloa, ahiguera@upsin.edu.mx

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chihuahua, División de Posgrado e Investigación, david.lf@chihuahua.tecnm.mx

### Resumen

En este trabajo se presenta un algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) para gestionar el flujo de corriente y el proceso MPPT en un convertidor elevador de un sistema fotovoltaico utilizando la técnica de Control Predictivo basado en Modelos (MPC, Model Predictive Control). El algoritmo MPPT también utiliza una función lineal hibridada con la técnica MPC para obtener la referencia corriente que rastrea el MPC. Se modela el convertidor en espacio de estados para generar funciones de costo de la técnica MPC que controlan la corriente del inductor y frecuencia de conmutación del convertidor; priorizando el control de la corriente. El algoritmo se implementa en MATLAB/SIMULINK, dando un tiempo de respuesta de 2 ms en el control de corriente, 60 ms en el control indirecto de voltaje, lo cual impacta positivamente al proceso MPPT.

**Palabras claves:** Control predictivo basado en modelos, convertidor elevador, seguimiento del punto de máxima potencia, espacio de estados

### Abstract

Abstract: This work presents a Model Predictive Control (MPC) approach for managing current flow to track the Maximum Power Point (MPPT) in a boost converter designed for power transfer to the grid. The MPC utilizes a linear function to obtain the virtual current reference. The system is modeled in state space to generate cost functions that control both the inductor current and the transistor switching frequency, prioritizing current control over frequency. The algorithm is implemented in MATLAB/SIMULINK, achieving a response time of 2ms for current control, 60ms for indirect voltage control, and robust MPPT.

**Keywords:** MPC, Boost Converter, MPPT, State Space.

Recibido: 14/02/2025; Aceptado 28/02/2025; Publicado 17/03/2025

## Introducción

Los sistemas Fotovoltaicos (FV) son fundamentales en la transición energética al mismo tiempo que contribuyen a reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. Sin embargo, para lograr un aprovechamiento eficiente de los sistemas FV, se requiere de un algoritmo para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) de la energía fotovoltaica. Dado que la mayoría de los sistemas FV operan a niveles de voltaje bajos, los convertidores elevadores son comúnmente preferidos en estas aplicaciones [1, 2, 3]. De aquí, que en este trabajo se presenta un análisis del convertidor elevador de un sistema FV en espacio de estados. Este análisis es utilizado para el diseño del algoritmo MPPT utilizando Control Predictivo basado en Modelos (MPC, Model Predictive Control) para gestionar el flujo de corriente y obtener un apropiado proceso MPPT en el sistema FV.

Gestionar adecuadamente el flujo de corriente y el proceso MPPT requiere de un rápido tiempo de respuesta y una operación efectiva del algoritmo de MPPT, especialmente cuando se producen cambios instantáneos en el sistema, como los causados por sombras. Para mejorar el tiempo de respuesta en estas situaciones, se han presentado en la literatura varios algoritmos MPPT basados en diferentes técnicas, tales como: Redes Neuronales (NN, Neural Networks), Algoritmos

Genéticos (GA, Genetic Algorithms), Controladores basados en Lógica Difusa (FLC, Fuzzy Logic Controllers), Perturbación y Observación (P&O, Perturb and Observe) y MPC [1]. Las NNs aprenden patrones complejos, para esto requieren ser entrenadas con un relativo alto costo computacional [4]. Los GAs son útiles para entregar respuestas generales, sin embargo, pueden ser tardados en generar respuestas más específicas. Los FLCs son subjetivos al generar respuestas, debido a que depende totalmente del conocimiento del diseñador sobre el sistema. Los algoritmos de P&O son sencillos de aplicar, puesto que utilizan ecuaciones computacionalmente ligeras, pero producen respuestas oscilatorias alrededor del punto de máxima potencia [5]. En contraste, los MPCs utilizan el modelo del sistema para minimizar una función de costo y determinar soluciones óptimas, lo que inherentemente mejora el tiempo de respuesta y operación del algoritmo MPPT [6].

Los algoritmos MPPT basados en la técnica MPC se utilizan ampliamente en el control de los convertidores. Los análisis dinámicos de respuesta utilizando esta técnica muestran resultados con ligeros impulsos en el control del voltaje o de corriente [7]. En la literatura se reportan algoritmos MPPT que usan técnicas híbridas de MPC para generar una referencia de voltaje o corriente, reduciendo la carga computacional y aumentando la velocidad de respuesta del algoritmo. En [1] se genera la referencia de corriente del algoritmo MPPT con la

técnica de P&O. En [8] se agrega un FLC al híbrido de P&O-MPC para mejorar la respuesta del algoritmo MPPT, entregando tiempos de respuesta de hasta 45 ms. En este trabajo, para obtener un tiempo de respuesta de hasta 2 ms en el control de la corriente, el algoritmo MPPT utiliza una función lineal hibridada con MPC. Esta función lineal genera la referencia de corriente que procesa la técnica MPC para controlar la corriente del convertidor, manteniendo el voltaje estable mediante el control indirecto de la corriente.

El presente trabajo está organizado como sigue. En la sección 2 se describe el análisis necesario para generar los modelos utilizados en el MPC y la función lineal para el diseño del algoritmo MPPT. La sección 3 describe la implementación del algoritmo y presenta los resultados. Finalmente, la sección 4 menciona las conclusiones del trabajo.

## Metodología

Las celdas fotovoltaicas son un arreglo de células semiconductoras que convierten la luz solar en energía eléctrica [10, 11]. Para transferir la máxima potencia a la carga, es necesario de un algoritmo MPPT que mantenga los valores de voltaje y corriente de la celda en los óptimos. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques utilizado en este trabajo para el algoritmo MPPT, el cual mantiene los niveles de voltaje y corriente de salida del sistema FV en sus valores óptimos. El algoritmo MPPT se diseñó con base en la hibridación de la función lineal para el cálculo de la corriente de referencia (bloque de color rojo) y la técnica MPC (bloque de color azul).

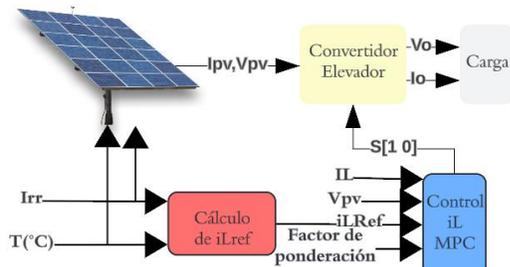


Figura 1. Algoritmo MPPT propuesto para el sistema FV.

El MPC es una técnica de control que predice el comportamiento del sistema a partir de los estados de control. El estado seleccionado como óptimo es el que minimiza la función de costo. La evaluación de la función de costo para cada periodo de muestreo se determina a partir del horizonte de muestreo (N) que puede escogerse en función de los requerimientos del sistema [9].

El horizonte de predicción utilizado en este trabajo se selecciona con N=1 debido a la dinámica del convertidor, donde se escoge el siguiente

estado de conmutación. De esta manera, la función de costo que incluye los estados futuros, la referencia y las acciones futuras se puede definir como:

$$g = f(x(k), u(k), \dots, u(k + N - 1)) \quad (1)$$

donde  $g$  es la función objetivo de costo que se busca minimizar,  $f$  es la función que describe el modelo del sistema en espacio de estados,  $x(k)$  es el estado del sistema en el tiempo o iteración  $k$ ,  $u(k)$  es la entrada de control en el tiempo o iteración  $k$  y  $u(k+N-1)$  representa las entradas de control en tiempos futuros  $k+N-1$ . En MPC, se optimiza una secuencia de entradas de control futuras para minimizar la función de costo en un horizonte de predicción de  $N$  pasos.

Para obtener la función de costo a utilizar en el control, se utiliza un método de discretización de tres pasos:

Modelar el convertidor para los estados posibles  $S = [1 \ 0]$ .

Obtener el modelo en tiempo discreto para las predicciones en cada instante de muestreo.

Definir la función de costo.

El convertidor elevador cuenta con dos estados de conmutación (ver figuras. 2(a) y 2(b) para estado de encendido y apagado, respectivamente). Cuando está encendido ( $S = 1$ ), la corriente del inductor  $i_L$  calcula a partir de:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L) \quad (2)$$

donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada del convertidor y  $R_L$  es la resistencia interna del inductor  $L$ .

Cuando el convertidor está apagado ( $S = 0$ ), la corriente del inductor resulta de:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L - V_{out}) \quad (3)$$

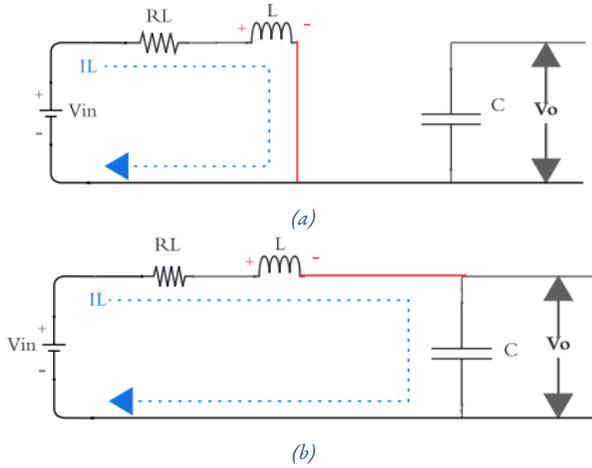
donde  $V_{out}$  es el voltaje de salida del convertidor.

La ecuación (1) y (2) se pueden sumar algebraicamente para conocer el comportamiento de la corriente del inductor durante un periodo de trabajo:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L - V_{out}(1 - d)) \quad (4)$$

donde  $d$  es el ciclo de trabajo del convertidor:

$$d \begin{cases} 1 & \text{cuando } S = 1 \\ 0 & \text{cuando } S = 0 \end{cases}$$



**Figura 2.** Estados de conmutación del convertidor elevador: (a) encendido con  $S=1$  y (b) apagado con  $S=0$ .

A la ecuación (4) se le denomina modelo promediado del convertidor elevador para la corriente, ya que incluye los dos estados de conmutación.

En la literatura se describen distintas metodologías de discretización, entre las cuales, la aproximación de Euler es el más utilizado para sistemas de primer orden, ecs. (5). Combinando las ecuaciones (3) y (5) podemos obtener la ecuación 6 de predicción de la corriente del inductor:

$$\frac{d}{dt} i_L \approx \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} \quad (5)$$

$$i_L(k+1) = \frac{T_s}{L} (V_{in}(k) - R_L i_L(k) - V_{out}(k)(1-d) + i_L(k)) \quad (6)$$

donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo e  $i_L(k+1)$  es la corriente de predicción del inductor.

Para cada periodo de muestreo, el problema de optimización se resuelve con los nuevos datos disponibles en la iteración  $k$ , de esta manera se determina el estado de  $S$ . La técnica MPC no puede determinar el estado óptimo de  $S$  únicamente basándose en las predicciones, también es necesario minimizar el error entre el valor de referencia y el valor de predicción, lo cual se realiza mediante la función de costo mencionada en el paso 3 de la metodología. Esta es la razón por la cual la función de costo es uno de los elementos fundamentales en las aplicaciones que utilizan MPC. En este estudio se utiliza la función de costo descrita en la ecuación (7), que describe el error entre la predicción de corriente y la referencia  $i_{ref}$ :

$$g_i(k+1) = [i_{ref} - i_L(k+1)]^2 \quad (7)$$

Este método de control digital, que predice el siguiente valor de  $S$  en cada período de muestreo, necesita una segunda función de costo para reducir la frecuencia de conmutación. Dado que los métodos de control digital no utilizan comparadores para generar la señal de conmutación, pueden presentar frecuencias de conmutación variables. Si la frecuencia de conmutación es aproximadamente igual a la frecuencia de muestreo, el error de control aumentará. Para disminuir la frecuencia de conmutación, se utiliza la función de costo en la ecuación (8) y se emplea un factor de ponderación ( $\lambda$ ) para limitar sus efectos en la función de costo total. En este estudio, el factor de ponderación se determinó como 0.1 utilizando el método de clasificación de funciones de costo propuesto en:

$$g_{sw}(k+1) = \lambda^* [d(k) - d(k-1)]^2 \quad (8)$$

Una de las ventajas significativas de utilizar dos funciones de costo es la capacidad de controlar múltiples parámetros empleando sola función. La función de costo total es resultado de la suma de las ecuaciones (7) y (8) propuestas:

$$g(k+1) = g_i(k+1) + g_{sw}(k+1) \quad (9)$$

Dado que el uso de la técnica del error cuadrático en funciones de costo con múltiples términos ofrece mejores resultados, como se reporta en [12], se prefirió el mismo enfoque en este estudio para obtener resultados más precisos. Esta es la razón por la cual se utilizan los cuadrados de las ecuaciones (7) y (8). En cada periodo de muestreo se calcula y minimiza la función de costo para  $S$ , ecuación (10), luego, utilizando la ecuación (11), se selecciona el estado en función del valor de  $d(k)$  que arroje el valor mínimo de la función de costo [12].

$$d(k) = [1 \ 0] \arg \min_d g \quad (10)$$

$$\min_d g(k+1) = \min (g_i(k+1) + g_{sw}(k+1)) \quad (11)$$

Se entiende por minimización de  $g(k+1)$  como el valor de  $d$  que más acerque a  $i_L$  de  $i_{L_{ref}}$ .

Los algoritmos MPPT en sistemas fotovoltaicos, utilizan las gráficas I-V, figura 3(a) y P-V, figura 3(b) para observar los valores de referencia. El punto de máxima potencia se define donde  $\frac{dP}{dV} = 0$ . De ahí se puede escoger el parámetro a variar en el convertidor, ya sea el voltaje, la corriente o el ciclo de trabajo.

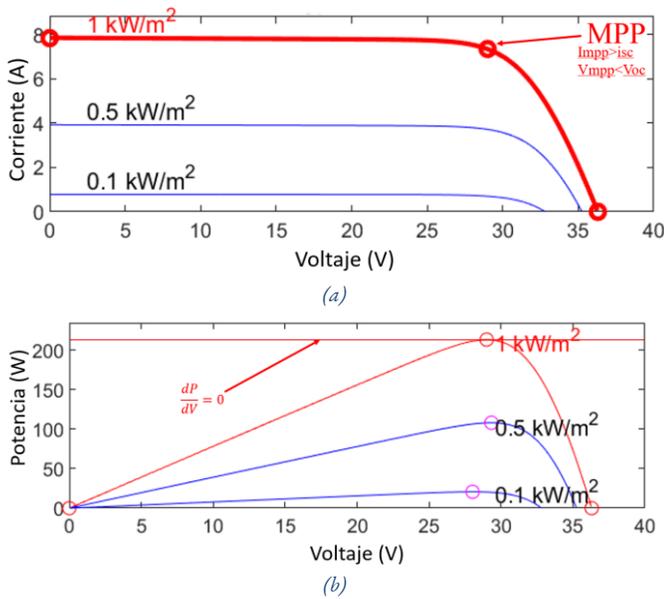


Figura 3. Gráfica I-V y P-V, características de un panel solar.

En este trabajo se mantiene el voltaje a través de un control de la corriente utilizando la irradiancia y la temperatura ambiente para determinar el valor de corriente disponible en la máxima potencia, de este modo el voltaje se mantiene estable modificando el ciclo de trabajo  $d$  para ajustar la corriente en función de la irradiancia. Para determinar la corriente de referencia, se utilizó el modelo del panel que calcula la corriente máxima disponible en función de la temperatura ambiente y la irradiancia.

$$i_{Lref}(irr, T) = \frac{irr}{Irr_{Ref}} \left( i_{isc} - U_{isc}(T - T_{ref}) \right) * 0.95P \quad (12)$$

donde  $i_{Lref}$  es la corriente de referencia para el MPC,  $Irr$  corresponde a la irradiancia incidente,  $Irr_{Ref}$  es la irradiancia en condiciones estándar (1000 W/m<sup>2</sup>),  $i_{sc}$  es la corriente de cortocircuito dada por el panel,  $U_{isc}$  es el coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito propio del panel,  $T$  la temperatura ambiente medida,  $T_{ref}$  la temperatura ambiente en condiciones estándar (25°C) y  $P$  es un valor referente a la cantidad de conjuntos de paneles solares que están conectados en serie en el arreglo ponderado al 95%. El valor de ponderación evita que el control siga la corriente de cortocircuito, lo que resultaría en un voltaje y potencia casi nulos, haciendo inviable el MPPT.

En la figura 4 se presenta el diagrama de bloques del algoritmo MPPT propuesto basado en la función lineal hibridada con la técnica MPC. Mediante la medición de la irradiancia incidente y la temperatura ambiente, se genera una corriente de referencia utilizando la función lineal de eqs. (12), ésta alimenta la función de predicción de corriente

$iL(k + 1)$  dada por eqs. (6), misma que se utiliza para compararla con el error y minimizarse en  $\min g(k + 1)$  usando eqs. (11), con esto se selecciona  $S$ , el siguiente estado del convertidor.

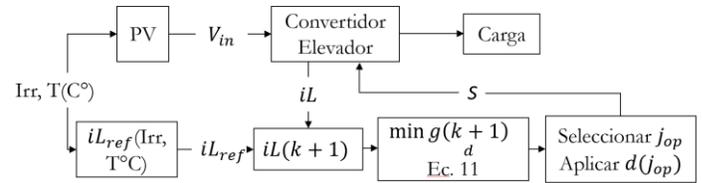


Figura 4. Diagrama de bloques del algoritmo MPPT propuesto.

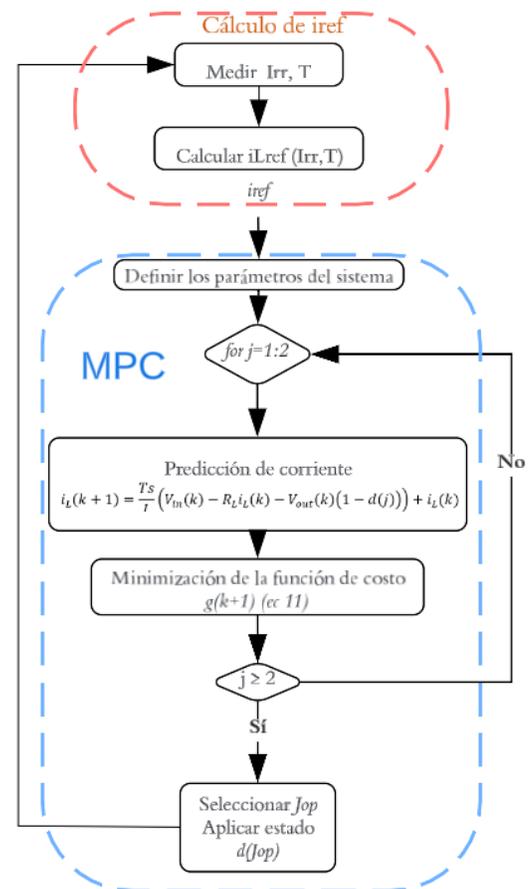


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT propuesto.

La figura 5 refiere al diagrama de flujo que representa el proceso que sigue el algoritmo MPPT propuesto para gestionar el flujo de corriente y el proceso MPPT del convertidor elevador en el sistema FV. Comienza con la medición de la irradiancia y la temperatura, seguido por el cálculo de  $iLref$ . Luego, el algoritmo MPC se encarga de predecir la corriente futura, minimizar la función de costo, y seleccionar el índice óptimo  $jop$  ( $j = [1, 2]$ ,  $jop$  es el valor de  $j$  óptimo) para aplicar el estado de conmutación correspondiente, optimizando la entrega de potencia a la carga.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
$P_{m\acute{a}x}$	50729.7 W
C	1000 $\mu F$
L	16 mH
RL	0.2 $\Omega$
Arreglos en paralelo	17
Total de paneles	238
Ts	10 $\mu s$

Tabla 2. Parámetros del panel solar usado en el sistema FV.

Dato del modulo	Valor
$P_m$	213.15 W
Celdas por modulo	60
$V_{oc}$	36.3 V
$I_{sc}$	7.84 A
$V_{mp}$	29 V
$I_{mp}$	7.35 A
$U_{Isc}$	0.102 %/°C

los valores de  $P = 0.005$  e  $I = 1$ . El generador de la señal de modulación  $q$  utiliza  $P = 0.01$ ,  $I = 1$ . Se aplicó una frecuencia de conmutación de 5 kHz en el inversor. Los parámetros P e I representan las ganancias de control proporcional e integral.

## Resultados

El sistema se sometió a un ciclo de irradiancia típica, con 0 W/m<sup>2</sup> de 0 a 0.5 segundos, aumentando hasta 1000 W/m<sup>2</sup> entre 0.5 y 2 segundos, y luego descendiendo a 0 W/m<sup>2</sup> entre 2 y 3.8 segundos, manteniéndose constante hasta los 4 segundos de simulación (ver figura 7), además de dos sombras durante el segundo periodo. Esta variación es fundamental, ya que afecta directamente a la generación de potencia en el sistema.

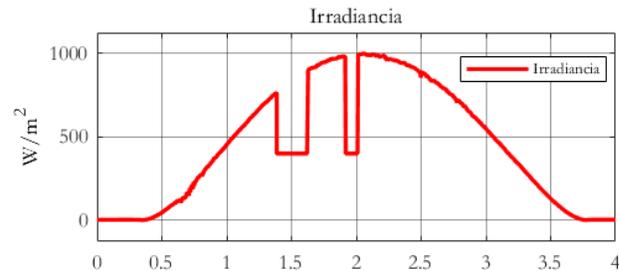


Figura 7. Ciclo de irradiancia para evaluación de rendimiento del algoritmo MPPT propuesto.

Ante la reducción del tipo escalón de 800 a 400 W/m<sup>2</sup> en la irradiancia, el control reduce la corriente promedio del inductor manteniendo  $S = 0$  durante 188.02  $\mu s$ , que es lo que tarda en alcanzar la referencia (ver figura 8). Caso contrario a la figura 9, donde ante un incremento de 400 a 900 W/m<sup>2</sup>, la corriente promedio del inductor incrementa hasta alcanzar la referencia, manteniendo  $S = 1$  durante 400  $\mu s$ .

Aunque el control gestiona la corriente, el objetivo principal es mantener el voltaje estable, lográndose en 60 ms después de recibir la entrada escalón de irradiancia (ver figura 10).

De acuerdo con Fig. 11, el algoritmo MPPT realiza un correcto seguimiento del punto de máxima potencia. En el primer periodo (de 0s a 0.75s) el control mantiene a  $S = 1$ , tratando de elevar la corriente promedio del inductor. Una vez que el inductor logra llegar a la referencia, el control incrementa la frecuencia sw, haciendo que  $V_{in} = 406V = V_{mp}$ , por consiguiente,  $V_o = 800V$ , y el algoritmo MPPT logra seguir el punto de máxima potencia.

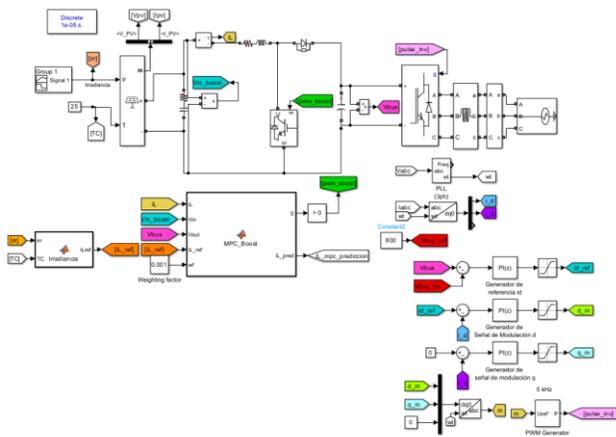


Figura 6. Algoritmo MPPT propuesto para el sistema FV en SIMULINK.

De acuerdo con figura 6, el algoritmo propuesto para el sistema FV se implementó en SIMULINK con el objetivo de transferir potencia a la red. Por lo que se utilizó un inversor de 3 fases controlado por un PI discreto que gestiona el flujo de corriente a la red. La salida del inversor lleva un filtro L de 2.26 mH para disminuir el rizo de corriente. El Control  $PI(z)$  que genera la referencia  $i_d$  se configura con los valores  $P = 0.15$  e  $I = 80$ . El generador de la señal de modulación  $d$  utiliza

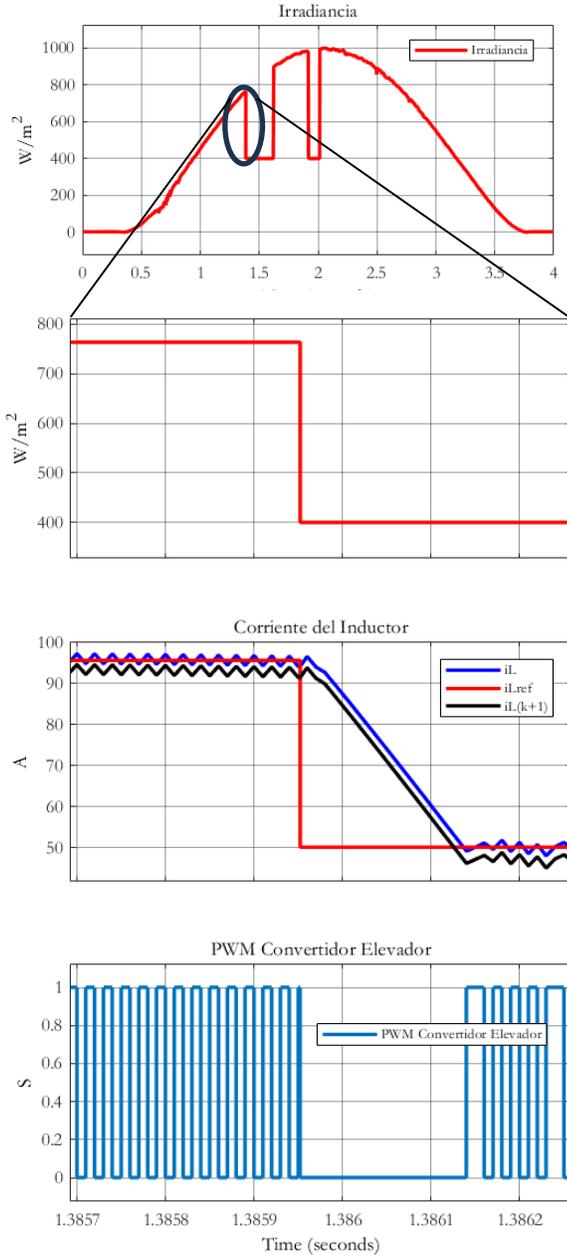


Figura 8. Respuesta del algoritmo MPPT propuesto ante una reducción del tipo escalón en la irradiancia.

Durante los cambios del tipo escalón, se muestra un sobre impulso en Ppv, debido a que el control de voltaje es 30 veces más lento que el control de corriente. Como resultado de esto, el proceso MPPT registra una eficiencia cercana al 99%.

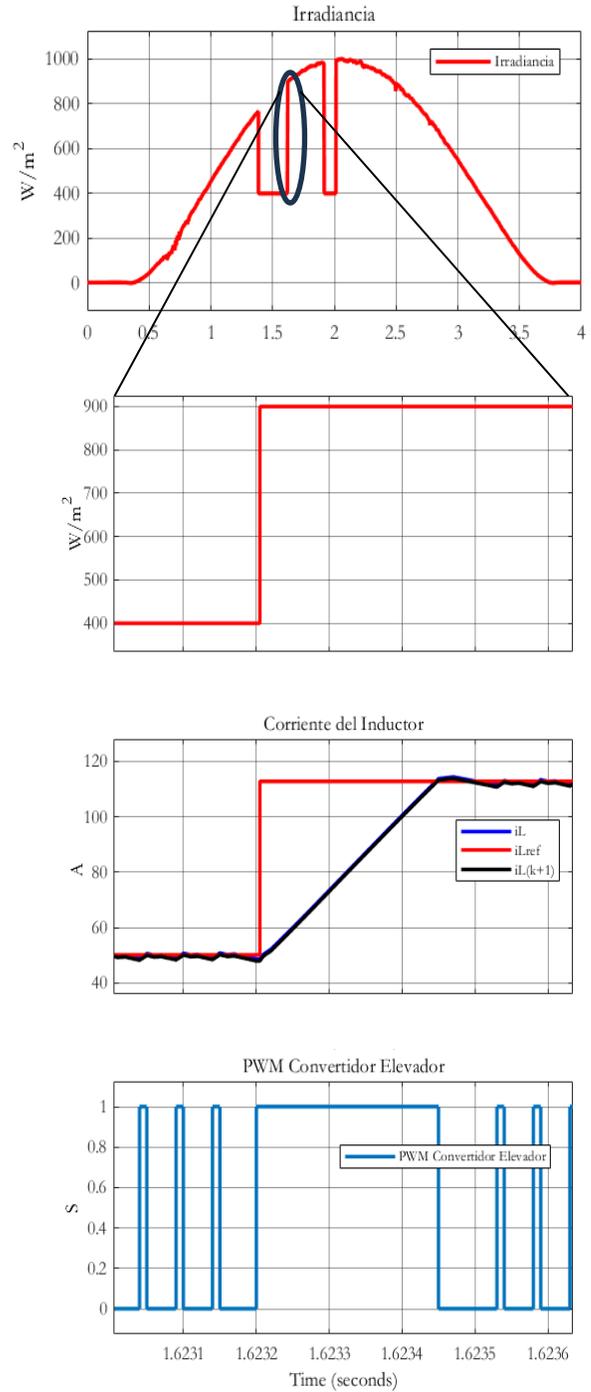


Figura 9. Respuesta del algoritmo MPPT propuesto ante un incremento del tipo escalón en la irradiancia.

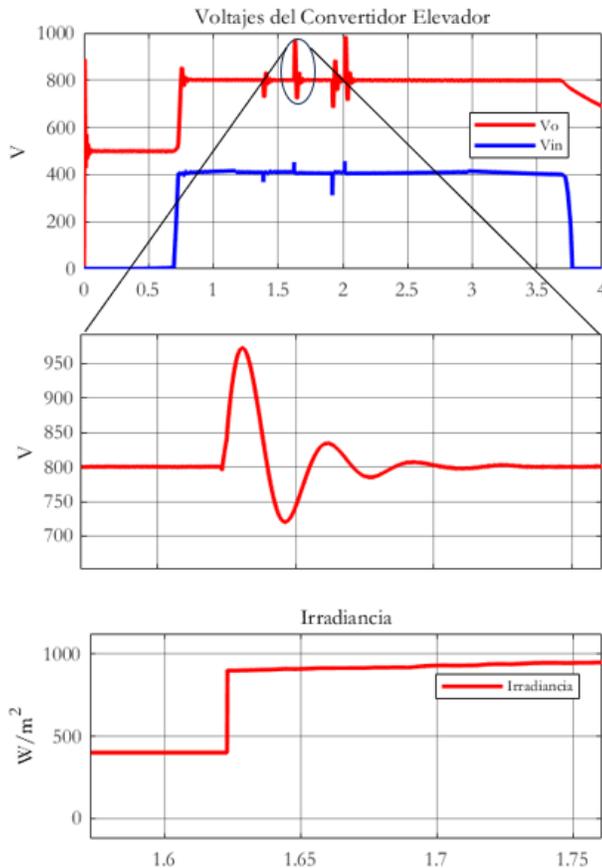


Figura 10. Control de voltaje alcanzado vía el algoritmo MPPT propuesto ante una entrada escalón.

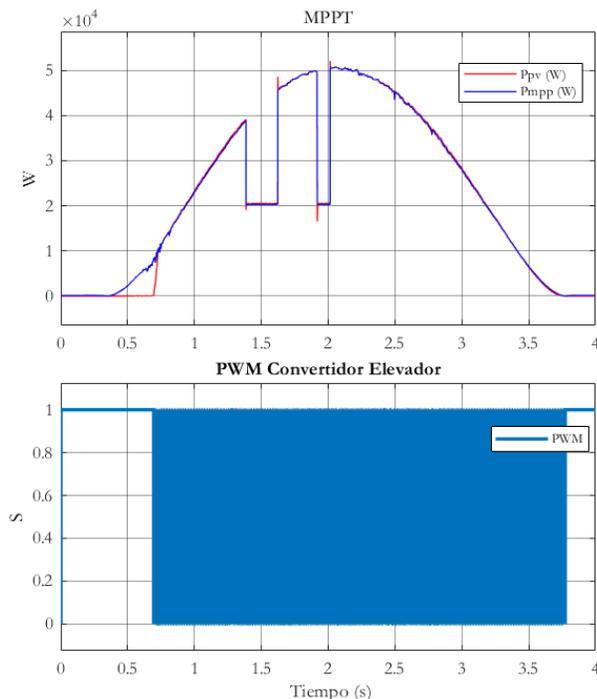


Figura 11. Proceso MPPT alcanzado con el algoritmo propuesto.

## Conclusiones

Este trabajo presentó un algoritmo MPPT basado en una función lineal hibridada con la técnica MPC. La función lineal genera la corriente de referencia y el MPC se encarga de rastrearla, optimizando así el flujo de corriente y el proceso MPPT en un convertidor elevador de un sistema fotovoltaico. El algoritmo logró un tiempo de respuesta de 2 ms en el control de corriente y 60 ms en el control indirecto de voltaje, lo que garantiza un proceso MPPT eficiente incluso ante cambios bruscos en la irradiancia. La eficiencia del proceso MPPT alcanzada fue cercana al 99%, validando la efectividad del enfoque propuesto en el algoritmo MPPT en términos de velocidad de respuesta y robustez del proceso MPPT frente a condiciones variables de irradiancia solar.

## Referencias

- [1] Erdal Irmak & Naki Güler: A model predictive control-based hybrid MPPT method for boost converters International Journal of Electronics. 2019.
- [2] Hernanz, J. R., Guede, J. M. L., Barambones, O., Zulueta, E., & Gamiz, U. F.. Novel control algorithm for MPPT with boost converters in photovoltaic systems. International Journal of Hydrogen Energy, 42(28), 17831–17855. 2017.
- [3] Qian, Q., Yu, J., Su, C., Sun, W., & Lu, S. (). A LLC resonant converter with dual resonant frequency for high light load efficiency. International Journal of Electronics. 104(12), 2017. 2033–2047
- [4] Dinamarca, A. Aprendizaje y Análisis de Redes Neuronales Artificiales Profundas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Cuyo. 2018
- [5] De Los Reyes-Suárez, L., Mares Gardena, A. E., Analysis of a Multiport DC/DC Converter used for energy extraction from a photovoltaic system. Memorias del 2023 Congreso Nacional de Control Automático. 25-27 de octubre, 2023.
- [6] F. Garcia-Torres, A. Zafra-Cabeza, C. Silva, S. Grieu, T. Darure, y A. Estandequeiro, “Model Predictive Control for Microgrid Functionalities: Review and Future Challenges”, Energies (Basel), vol. 14, núm. 5, p. 1296, feb. 2021.
- [7] Seo, S. W., Kim, Y., & Choi, H. H. Model predictive controller design for boost DC–DC converter using T–S fuzzy cost function. International Journal of Electronics, 104(11), 1838–1853. 2017
- [8] Priya, T. H., & Parimi, A. M. Design of adaptive perturb and observe-fuzzy MPPT controller for high voltage gain multilevel boost converter. IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner. 2016
- [9] Metry, M., Shadmand, M. B., Balog, R. S., & Abu-Rub, H. MPPT of photovoltaic systems using sensorless current-based model predictive control. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2), 1157–1167. 2017

[10] Torres, Carlos. ZnO como material prometedor para celdas solares 1 st Carlos Torres. 2020

[11] N. P V, C. M, R. P. Eldho and S. Michail, "Review on Role of Power Electronics in Integration of Renewable Energy Sources with Micro grid," 2022 International Conference on Smart and Sustainable Technologies in Energy and Power Sectors (SSTEPS), Mahendragarh, India, 2022, pp. 27-32.

[12] Danandeh, M. A., & Mousavi, S. M. G. (2018). Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), 2743–2767.).



Dr. David Ricardo López Flores. Ing. en Electrónica con Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica. Profesor de tiempo completo en TecNM – Campus Chihuahua, donde imparte clases en los programas de Ing. Electromecánica y la División de Estudios de Posgrado e Investigación. Sus intereses de investigación se centran en áreas clave como unidades de control y acondicionamiento de sistemas solares y eólicos con base en técnicas de control convencional y no convencional.

## **Semblanza Autores**



Ingeniero Mario Castro Torres. Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica de Sinaloa, estudiante de la Maestría en Ciencias Aplicadas por la Universidad Politécnica de Sinaloa, con el proyecto de tesis "Estudio Comparativo de Técnicas de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red".



Aldo Noe Higuera Juárez. Doctor en Ciencias e Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Sus áreas de investigación son: Control y gestión de la energía, Electrónica de potencia. Actualmente se desempeña en el programa de mecatrónica como profesor investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa y en Maestría en Ciencias Aplicadas de la misma institución.



Alejandro Lizárraga Lizárraga. Doctor en Ciencias e Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Actualmente se desempeña en el programa de mecatrónica como profesor investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa y en Maestría en Ciencias Aplicadas de la misma institución. Sus áreas de investigación son: Diseño y optimización de convertidores electrónicos de potencia, Administración y uso eficiente de la energía eléctrica.



**GEOVOLTAICA**  
Revista de Energía y Sostenibilidad