

Caracterización de arreglo fotovoltaico para MPPT y convertidor boost.

Characterization of photovoltaic array for MPPT and boost converter.

 Jhon Edward Lizarazo-Parada¹,  Aldo Pardo-García²,  Jorge Luis Diaz-Rodriguez³

¹Servicio Nacional de Aprendizaje, Cúcuta - Colombia

^{2,3}Universidad de Pamplona, Pamplona - Colombia

Recibido: 15 de febrero de 2025.

Aceptado: 28 de julio de 2025.

Publicado: 01 septiembre de 2025.

Resumen- Este estudio presenta el desarrollo y la validación de un convertidor DC-DC tipo Boost diseñado para optimizar la transferencia de energía entre un arreglo fotovoltaico Amerisolar de 340W y una carga programable. La metodología integra la caracterización del panel mediante el modelo de dos diodos exponenciales (estándar IEC 60891) y el uso de la toolbox Simscape de MATLAB para el diseño preciso del controlador. El núcleo del sistema emplea una Raspberry Pi 5 programada en Python para ejecutar algoritmos MPPT, contrastando el desempeño del método de Perturbación y Observación (P&O) clásico frente a una versión de paso modificado. Los resultados experimentales demuestran que el algoritmo modificado, al incorporar un parámetro de conteo adicional, mejora significativamente la convergencia hacia el Máximo Global de Potencia (GMPP) bajo condiciones climáticas fluctuantes. Finalmente, el prototipo validó una eficiencia dinámica del 90% operando a una frecuencia de conmutación de 100 kHz, confirmando la robustez de los sistemas embebidos para mitigar inestabilidades producidas por transitorios de irradiancia.

Palabras clave: convertidor boost, eficiencia, electrónica de potencia, energía renovable, fotovoltaico, irradiancia, modelado de sistemas, MPPT, perturbación y observación P&O, PWM, raspberry pi, sistemas de control.

Abstract— This study presents the development and validation of a Boost-type DC-DC converter designed to optimise energy transfer between a 340W Amerisolar photovoltaic array and a programmable load. The methodology integrates panel characterisation using the two exponential diode model (IEC 60891 standard) and the use of the MATLAB Simscape toolbox for precise controller design. The core of the system uses a Raspberry Pi 5 programmed in Python to execute MPPT algorithms, contrasting the performance of the classic Perturbation and Observation (P&O) method with a modified step version. The experimental results demonstrate that the modified algorithm, by incorporating an additional counting parameter, significantly improves convergence to the Global Maximum Power Point (GMPP) under fluctuating weather conditions. Finally, the prototype validated a dynamic efficiency of 90% operating at a switching frequency of 100 kHz, confirming the robustness of embedded systems in mitigating instabilities caused by irradiance transients.

Keywords: boost converter, control system, efficiency, irradiance, MPPT, P&O, photovoltaic, power electronics, PWM, raspberry pi, renewable energy, system modelling.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jlizarazop@sena.edu.com (Jhon Ewdard Lizarazo Parada).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Como citar este artículo: J. E. Lizarazo-Parada, A. Pardo-García y J. L. Diaz-Rodriguez, "Caracterización de arreglo fotovoltaico para MPPT y convertidor boost", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 13, no. 3, pp. 01-12 2025, doi: [10.15649/2346030X.6274](https://doi.org/10.15649/2346030X.6274)

I. INTRODUCCIÓN

Las configuraciones estructurales empleadas en la generación de energías renovables suelen adoptar esquemas de bloques estandarizados, similares a los referenciados en estudios previos de la literatura técnica [1]. El núcleo de esta investigación se centra en incrementar el rendimiento energético de los arreglos fotovoltaicos mediante el uso de algoritmos de MPPT (Maximum Power Point Tracking), logrando una conversión de potencia superior al procesar la irradiancia y la temperatura como variables dinámicas dentro de su modelo físico-matemático [2]. Tal como se aprecia en la representación general del sistema figura 1, esta arquitectura se distingue por incorporar un bloque de control MPPT en el flujo de una fuente no convencional, optimizando la entrega de energía hacia un bus de corriente directa retroalimentando las variables eléctricas “corriente (I_{PV}) y voltaje (V_{PV})” y ambientales “Irradiancia (I_r) y temperatura (T)”.

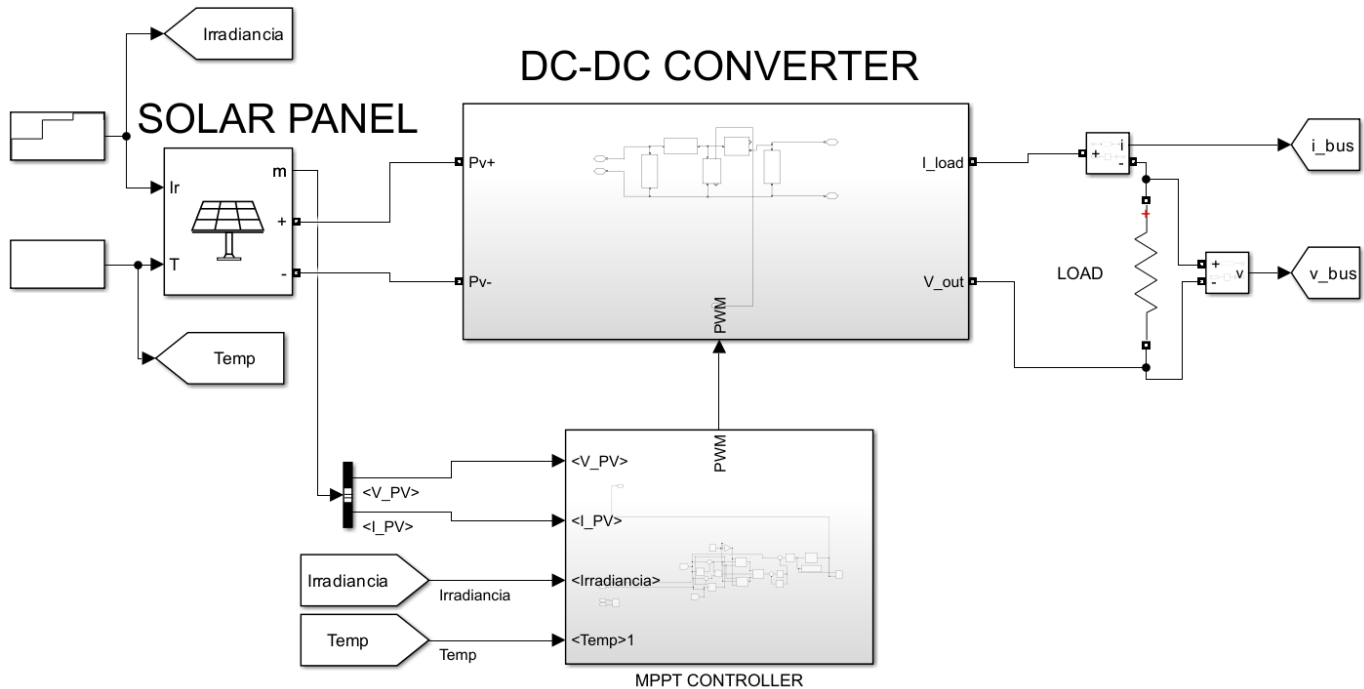


Figura 1: Diagrama de bloque general de sistema PV con bloque MPPT de entradas irradiancia y temperatura[3].

Fuente: Elaboración propia.

La arquitectura conceptual descrita se materializó en un prototipo físico funcional diseñado específicamente para la evaluación y validación de estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). El hardware del sistema experimental integra dos módulos fotovoltaicos Amerisolar AS-6P de 340W instrumentados con sensores de corriente y voltaje, junto a un piranómetro de alta precisión EKO MS-80S para la captura de datos de irradiancia. El objetivo primordial de este montaje es la ejecución de técnicas de control, centrando el alcance de la investigación en el contraste operativo entre el algoritmo de Perturbar y observar (P&O) y una variante de paso modificado. Esta última versión optimiza la convergencia del sistema al emplear un parámetro de conteo que permite discriminar si las fluctuaciones de potencia son resultado de ajustes internos en el voltaje o de cambios reales en las condiciones climáticas.

II. MARCO TEÓRICO

La literatura categoriza diversos procedimientos para ajustar las curvas de Corriente vs. Voltaje (I - V) ante fluctuaciones de irradiancia y temperatura [4], asegurando el cumplimiento de la normativa internacional IEC 60891. Si bien se han identificado tres arquitecturas matemáticas principales para describir el comportamiento de las celdas [5], cada una con beneficios y limitaciones específicas, esta investigación fundamenta su análisis en el modelo de dos diodos exponenciales [6].

Esta elección técnica se distancia de los modelos de diodo simple por su mayor precisión en entornos de simulación dinámicos. Para la validación práctica, se emplea la herramienta Simscape de MATLAB/Simulink, utilizando la Ecuación 1 para descomponer el comportamiento eléctrico de cada celda del panel Amerisolar y facilitar el diseño del controlador MPPT [7] y [8].

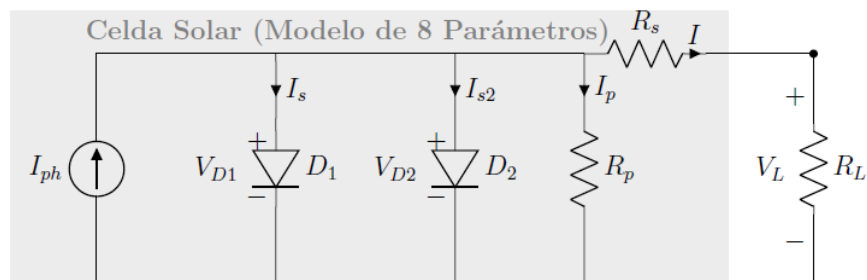


Figura 2: Circuito esquemático modelo de doble diodo [9].

Fuente: Elaboración propia.

$$I = I_{PV} + I_{D1} + I_{D2} - \frac{V_{DI}}{R_P} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$I_{D1} = I_{D2} (e^{V_{D2}/\sigma_2 V_T} - 1) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V = V_D - IR_S \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde V_T corresponde al voltaje térmico y N_s a número de células solares conectadas en serie y los demás parámetros conocidos de la física fundamental [10].

Para determinar las propiedades eléctricas del sistema, se utilizó el entorno computacional de Simscape en Simulink Matlab R2024a, lo que permitió un modelado detallado del módulo solar fotovoltaico. El procedimiento técnico consistió en integrar una carga dinámica a través de una función rampa, facilitando la captura sistemática y precisa de datos de corriente (I), voltaje (V) y potencia (P).

Mediante un script diseñado para ejecutar un barrido paramétrico de irradiancia, el dispositivo fue evaluado en un rango que osciló entre los 100 y 1000 W/m², aplicando incrementos constantes de 100 W/m². Este análisis exhaustivo permitió generar las curvas de rendimiento I-V y P-V figura 3 del panel Amerisolar de 340W, verificando su comportamiento operativo frente a la instrumentación de los sensores de retroalimentación.

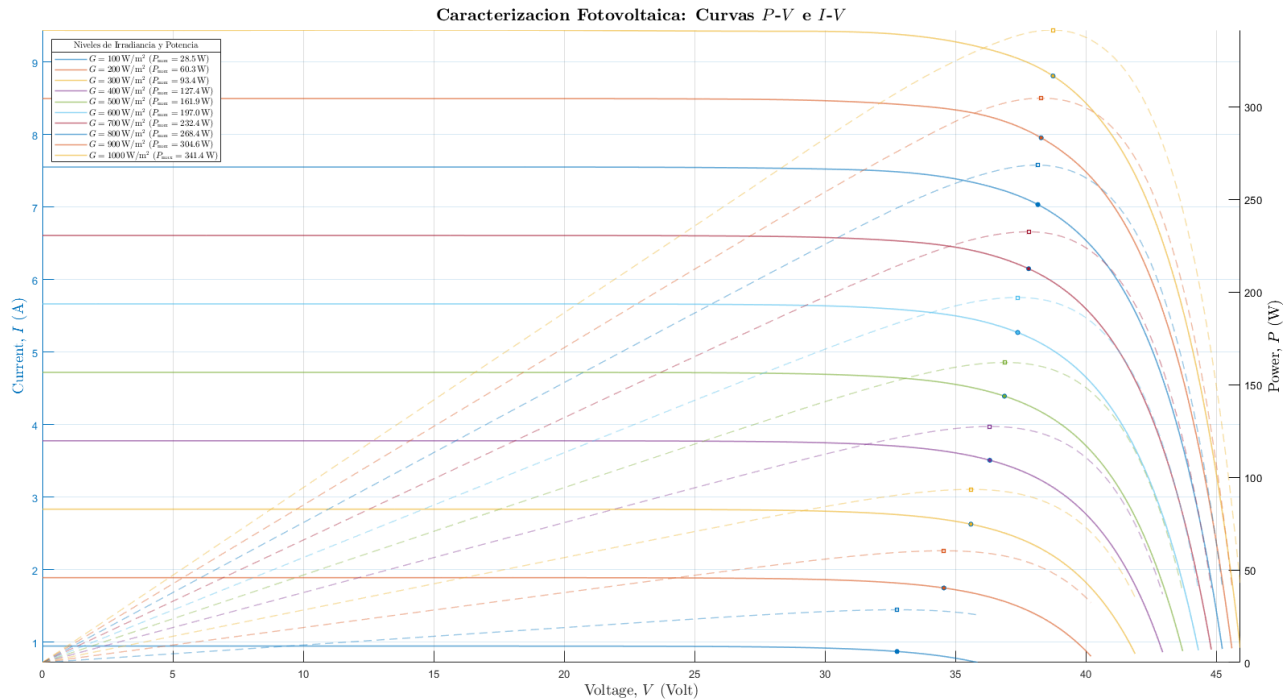


Figura 3: Curva característica Potencia vs Voltaje y Corriente vs Voltaje.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento conjunto del recurso solar y el panel fotovoltaico se fundamenta en leyes físicas influenciadas directamente por la irradiancia, la temperatura y la carga eléctrica. Estos parámetros críticos se sintetizan matemáticamente en el cálculo del voltaje térmico (V_T) a través de la Ecuación 4, la cual integra constantes fundamentales como la de Boltzmann y la carga eléctrica. Esta relación analítica permite establecer una equivalencia funcional entre los dos primeros bloques operativos del sistema la fuente de energía y el generador tal como se describe en el esquema estructural en [11].

Se identifican múltiples topologías de conversión de potencia para aplicaciones fotovoltaicas, abarcando arquitecturas tipo Buck, Forward, Flyback, Push-pull y modelos resonantes, entre otros esquemas especializados [12]. Para el desarrollo de esta metodología, se seleccionó un convertidor topología Boost como acople de impedancias principal, debido a que el arreglo solar entrega una tensión de 46.1 Vmp y la carga resistiva asociada requiere operar a un nivel de voltaje superior. El diseño del circuito esquemático permite la integración de transistores IGBT o MOSFET para gestionar los procesos de conmutación de alta velocidad [13]. En cuanto al régimen operativo, el sistema se configuró bajo un modo de conducción continua (CCM), asegurando que el flujo de corriente no descienda a cero durante el ciclo completo de trabajo [14]. Finalmente, la estabilidad y dirección del flujo eléctrico se garantizan mediante el diodo D1, siguiendo las bases matemáticas y los lineamientos técnicos establecidos en la literatura de referencia para el dimensionamiento del dispositivo observado en la figura 4.

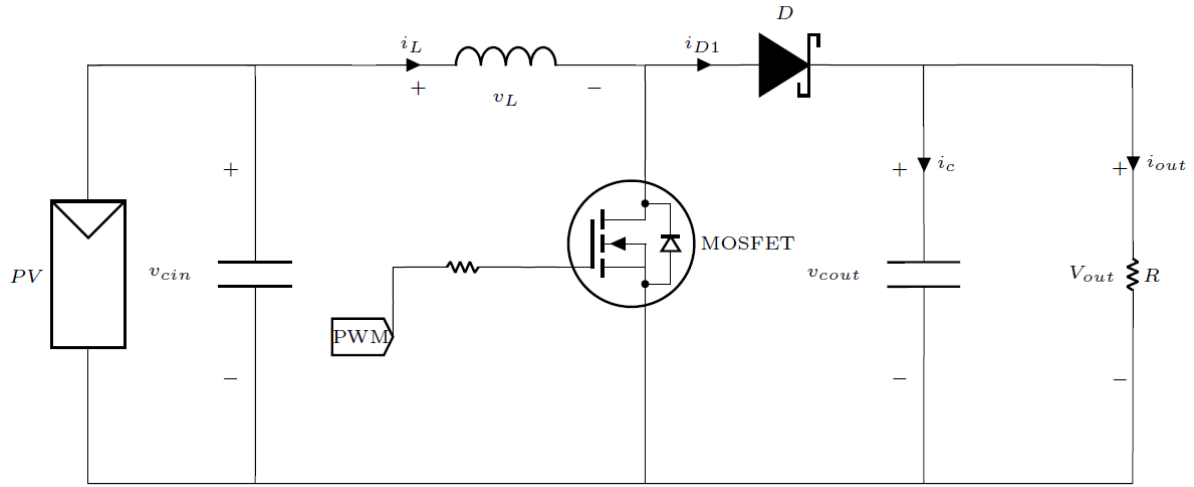


Figura 4: Circuito esquemático Convertidor DC-DC tipo Boost o elevador.
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{out} = V_{in} + v_L \quad \text{Periodo Apagado} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_{out} = V_c \quad \text{Periodo Encendido} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$I_{RIPPLERMS} = (I_{D1})^2 - (i_{out})^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

La ejecución de esta investigación se estructuró en etapas secuenciales para cumplir con los objetivos trazados: primeramente, se realizó el modelado virtual del sistema fotovoltaico y el convertidor elevador en el entorno MATLAB/Simulink ver figura 5; en segundo lugar, se procedió a la verificación de las métricas obtenidas; y finalmente, se llevó a cabo el montaje físico para validar el comportamiento del controlador diseñado.

Tal como se detalla en las representaciones técnicas del sistema, la simulación del convertidor constituye el tercer paso fundamental en la estrategia de control, manteniendo coherencia con la arquitectura de bloques establecida para la planta solar. Para perfeccionar la transferencia energética, se analizaron diversas metodologías de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), discriminando entre enfoques estáticos y dinámicos (offline y online), los cuales pueden fortalecerse significativamente mediante la integración de inteligencia artificial [15].

La intermitencia de recursos naturales como el sol y el viento impide una generación energética constante [16], lo que otorga una relevancia crítica al estudio del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) [9] y [13]. De acuerdo con la literatura técnica, estas metodologías se organizan habitualmente en cuatro categorías (clásicas, avanzadas, híbridas y de optimización) o se distinguen según su ejecución en modalidades en línea (online) o fuera de línea (offline). Para los fines de esta investigación, se seleccionaron los algoritmos online de Perturbación y Observación (P&O) y su variante de paso modificado. Cabe destacar que, aunque estas estrategias fueron propuestas originalmente para convertidores reductores (Buck) [17], este estudio las adapta y valida mediante la simulación de un convertidor elevador o Boost.

La estrategia de control por Perturbación y Observación (P&O) constituye una de las soluciones más extendidas en la industria fotovoltaica comercial gracias a su baja complejidad técnica y desempeño eficiente bajo niveles de radiación constantes. Sin embargo, este método presenta la desventaja de generar oscilaciones indeseadas alrededor del punto de operación estable cuando se producen cambios ambientales repentinos [18].

El flujo operativo del algoritmo de la figura 6 inicia con la medición sistemática de la corriente y el voltaje del panel para el cálculo de la potencia instantánea. Durante el procesamiento, si la variación de potencia (ΔP) es inexistente, el sistema finaliza el ciclo sin realizar ajustes; por el contrario, si se detectan cambios, se analiza el signo de dicha variación junto a las fluctuaciones de tensión (ΔV).

Técnicamente, el controlador responde incrementando el ciclo útil del PWM si se identifica un aumento en el voltaje, o decrementándolo en caso de una caída de tensión, regulando así la conmutación del MOSFET o IGBT en el convertidor elevador. Esta estructura lógica es ideal para su integración en sistemas embebidos, ya que demanda recursos computacionales mínimos para mantener la búsqueda del punto de máxima transferencia energética.

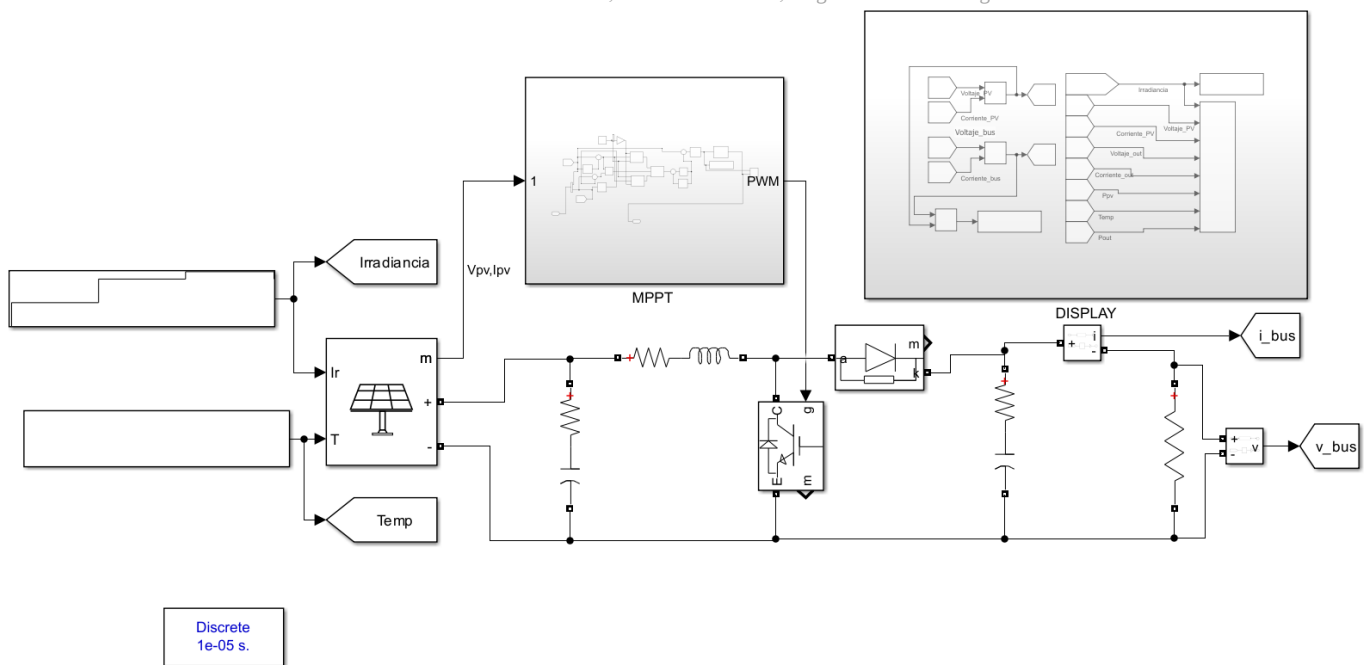


Figura 5: Diagrama de bloques Simulink arreglo fotovoltaico y convertidor DC-DC en Simscape.

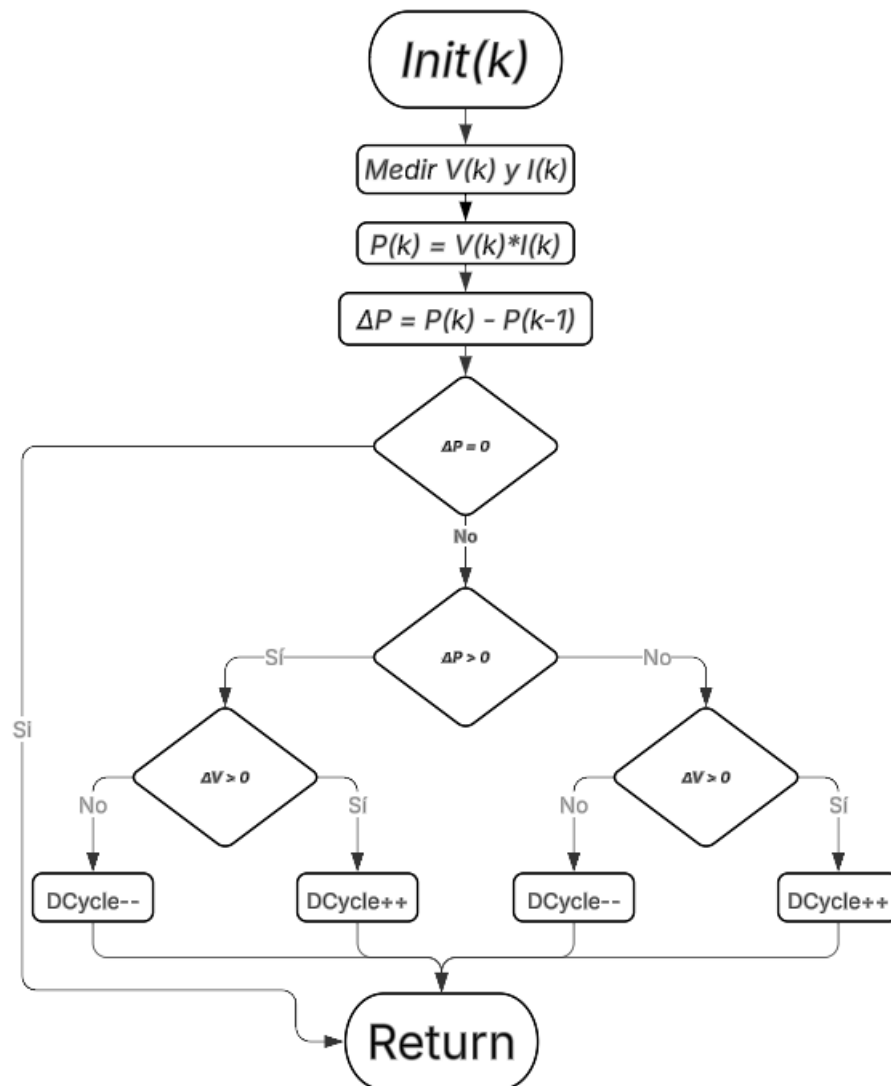


Figura 6: Diagrama de flujo algoritmo de perturbación y observación P&O.

En situaciones donde se detecta una caída en la potencia del sistema ($\Delta P < 0$), el algoritmo analiza la variación de tensión bajo la misma lógica relacional para reajustar el ciclo de trabajo (duty cycle) de la señal PWM. Esta simplicidad operativa y su mínima exigencia computacional convierten a esta técnica en una opción ideal para su ejecución en sistemas embebidos.

La continuidad y precisión del seguimiento están supeditadas al intervalo de muestreo configurado; una vez que el flujo lógico alcanza el nodo de retorno, el proceso se reinicia en el estado Init(k), marcando el comienzo de la k-ésima captura de datos del generador solar.

Técnicamente, tal como se visualiza en los diagramas de Simscape, esta lógica de control se centraliza en el bloque denominado “PyO”, el cual recibe las señales de voltaje (V_{pv}) y corriente (I_{pv}). A partir de estos parámetros, el bloque calcula la potencia instantánea y determina el ciclo útil requerido para gobernar el convertidor elevador (Boost), buscando siempre la máxima transferencia energética hacia la carga.

IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Los resultados presentados en la figura 7 confirman un desempeño óptimo del sistema para el primer escenario de prueba, caracterizado por niveles de irradiancia (900 W/m^2) y temperaturas constantes. En la parte superior de la gráfica se monitorizan la corriente del panel solar, que alcanza los 17 A, y la I_{out} del convertidor; simultáneamente, la gráfica inferior visualiza que el voltaje del panel se estabiliza en torno a los 36 V, cumpliendo con los parámetros de su ficha técnica. Gracias a la acción del convertidor elevador, la tensión de salida se incrementa hasta aproximadamente 80 V. Bajo estas condiciones, el sistema alcanza una potencia total de 610 W, lo que equivale a operar al 90% de la capacidad nominal del arreglo (conformado por dos módulos de 340 W). Estos hallazgos se consideran satisfactorios y guardan plena coherencia con las curvas de rendimiento y los componentes detallados en la Figura 3 y la Tabla I de las fuentes [19].

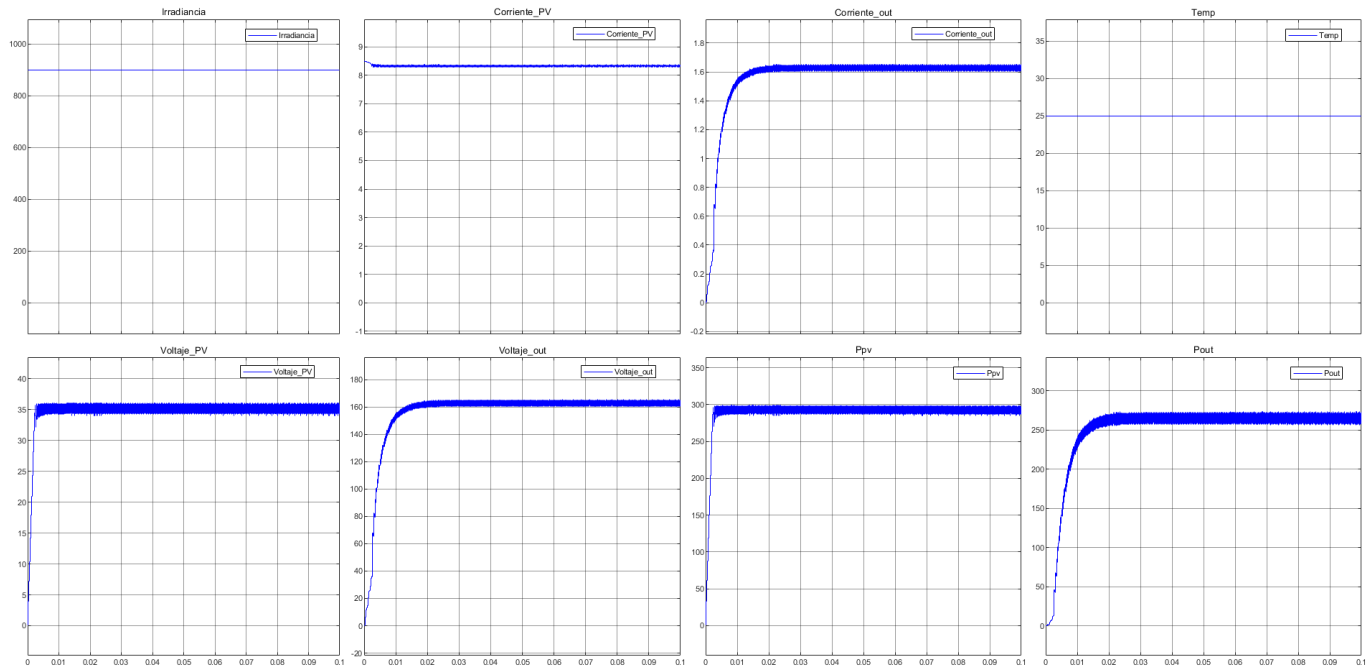


Figura 7: Respuesta del Convertidor input y Output.
Fuente: Elaboración propia.

En la fase de montaje físico, se integró el sensor de corriente INA282 de Texas Instruments, el cual fue sometido a un proceso de caracterización técnica utilizando una fuente de corriente continua y una carga electrónica programable. Al contrastar este componente con los estándares de la literatura técnica [20], se verificó que el dispositivo presenta una respuesta lineal ante las fluctuaciones de corriente en el circuito eléctrico, asegurando una captura de datos precisa para la retroalimentación del algoritmo de control.

Tabla 1: Selección de dispositivos del circuito.

Dispositivos	Descripción	Valor
Panel Solar	2X Amerisolar	340W
Cin	Capacitor paralelo al panel	470uF
L1	Inductor del filtro Boost	5mH
D1	Diodo ultra-rápido	schockly
C2	Capacitor paralelo a la carga	100uF
MOSFET	IRF264P	Rs, 1mΩ
Funtion	MPPT Converter	Algoritmo

Fuente: Elaboración propia.

La validación del sistema se llevó a cabo sometiéndolo a fluctuaciones de irradiancia en pasos de (300 W/m^2), lo que permitió evaluar de manera comparativa la potencia obtenida en la simulación frente a la precisión del algoritmo implementado [21] y [22]. Un desafío recurrente en la creación de estos controladores es la coexistencia de diversos máximos globales, situación que ha motivado el uso de metodologías inteligentes para asegurar un seguimiento efectivo.

Para prevenir la inestabilidad del sistema derivada del periodo de muestreo, es crucial definir adecuadamente el intervalo de ajuste de la señal PWM [23]. En este estudio, tras realizar un barrido inicial, se optó por un incremento del 1%, logrando las respuestas de ascenso y descenso documentadas en las figuras 8 y 9, donde se evidencia la correlación entre el voltaje del panel y la radiación solar.

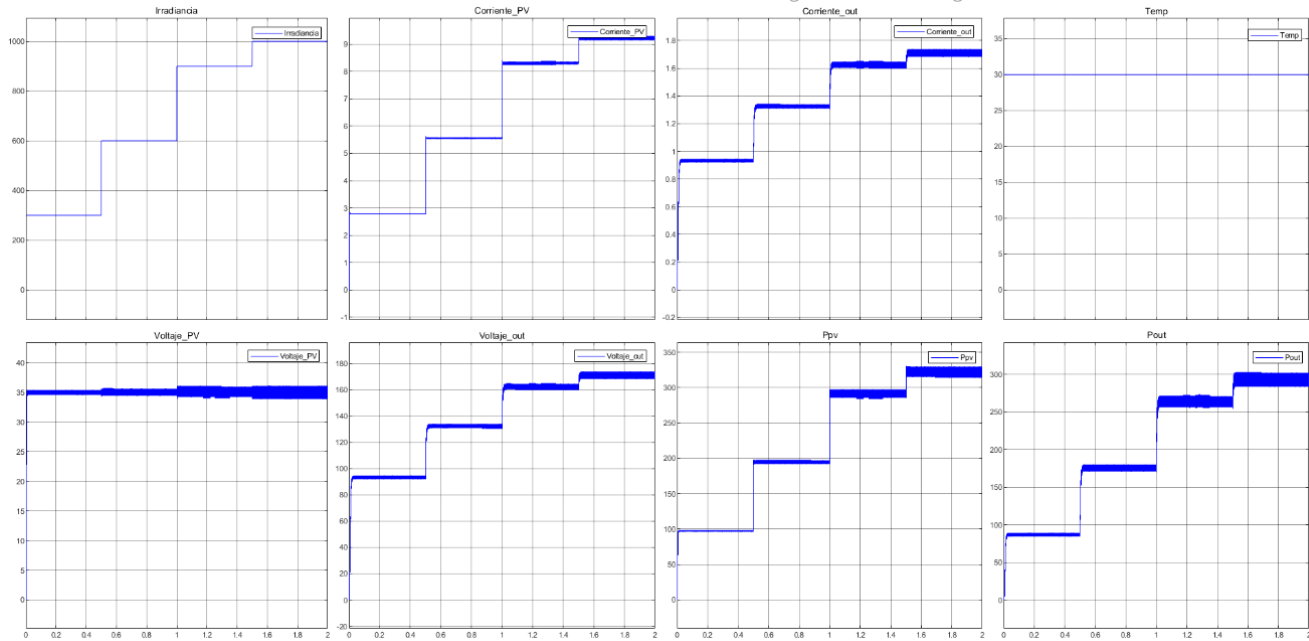


Figura 8: Respuesta de circuito con ascenso de Irradiancia algoritmo P&O clásico.
Fuente: Elaboración propia.

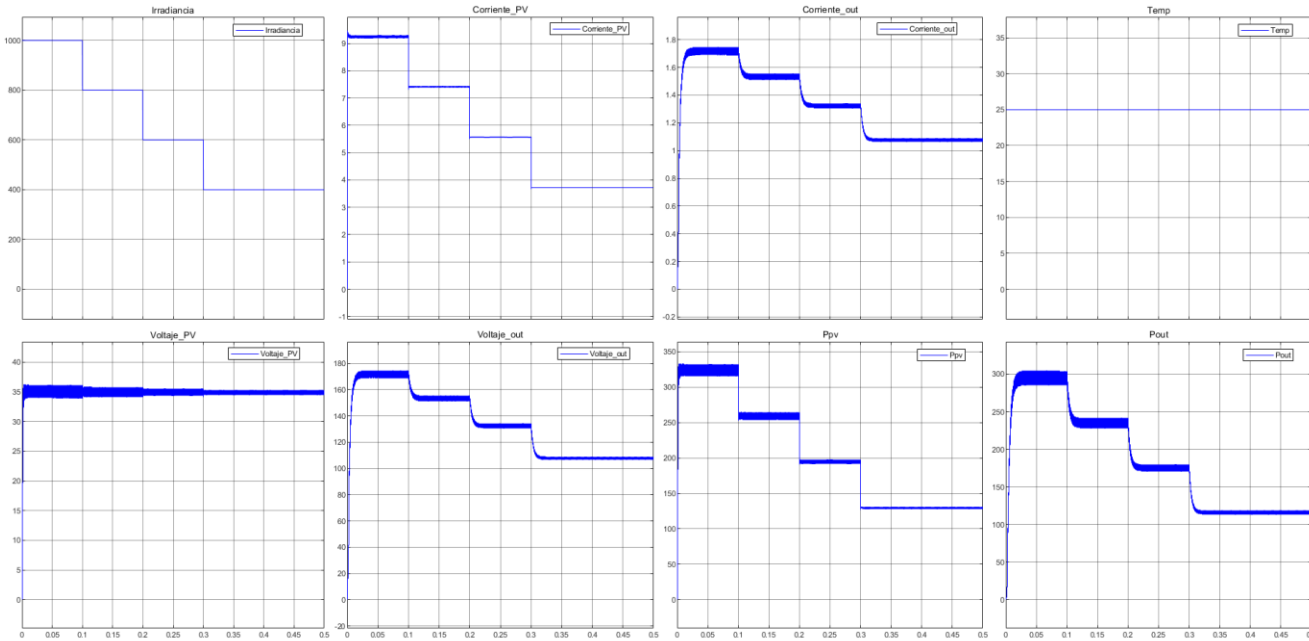


Figura 9: Respuesta con descenso de Irradiancia pasos de 200W/m2 algoritmo P&O clásico.
Fuente: Elaboración propia.

Para la ejecución del experimento, la arquitectura vincula una Raspberry Pi 5 con lenguaje Python 3, la cual se integra con un sensor de irradiancia y temperatura mediante comunicación RS485 y emulación de puerto serie vía USB. Se diseñó un sistema embebido para obtener las señales de corriente y voltaje que utiliza una tarjeta de alta precisión ADS1256, diferenciándose de implementaciones previas por la naturaleza de los sensores seleccionados [15].

Este montaje técnico requirió el desarrollo de un software de adquisición específico para el sistema embebido, operando con niveles de tensión de +5V (single-ended) y una restricción máxima de 2.15V dictada por el sensor de voltaje aislado AMC0311. Los datos se procesan a una frecuencia de 12Hz, una tasa considerada razonable para el algoritmo P&O dado que la frecuencia de conmutación de los transistores MOSFET (100 kHz) es considerablemente superior a la velocidad de medición de las variables eléctricas [24]. Finalmente, la definición de esta frecuencia de muestreo también responde a las limitaciones intrínsecas del hardware de la Raspberry al gestionar un sistema linux [25].

La Figura 10 ilustra el montaje físico del convertidor elevador (Boost), el cual fue construido siguiendo rigurosamente los parámetros técnicos detallados en la Tabla I. El diseño integra un transistor MOSFET Vishay IRFP264, seleccionado por su capacidad de gestionar corrientes de hasta 38 A. Asimismo, se incorporó un diodo de conmutación rápida FFSH2065BDN, componente esencial para que el sistema opere de forma eficiente a una frecuencia de 100 kHz. Esta configuración de hardware responde al diseño realizado con la selección de dispositivos para garantizar una transformación de energía adecuada.

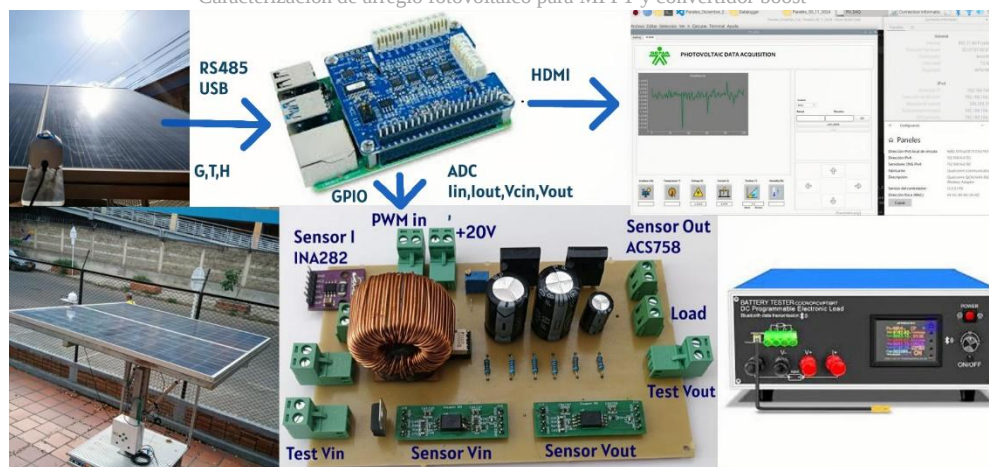


Figura 10: Arquitectura del sistema implementado.

Fuente: Elaboración propia.

El desempeño del sistema fotovoltaico se evalúa mediante dos indicadores principales de rendimiento: la eficiencia en estado estable y la eficiencia dinámica. (η_{stable}): Es la relación entre potencia de entrada del arreglo (representada como P_{pv} en gráficas como las de las Figuras 8 y 9) y la potencia máxima teórica establecida en la hoja de datos del fabricante bajo condiciones constantes de irradiancia y temperatura [20]. Eficiencia dinámica (η o μ) este parámetro mide la capacidad del algoritmo seguidor para capturar energía cuando el sistema se enfrenta a variaciones o condiciones no uniformes de irradiancia y temperatura [26]. Eficiencia total, la eficiencia global del conjunto se obtiene al realizar el producto de la eficiencia intrínseca del panel y la eficiencia combinada del MPPT y el Boost.

Esta medición se efectúa con el propósito fundamental de analizar la respuesta del sistema ante las fluctuaciones de irradiancia, vinculando la estabilidad operativa a una configuración precisa del ciclo útil del PWM (en un rango del 0% al 80%) y al diseño técnico de los parámetros del convertidor. A diferencia de las metodologías convencionales [27], la implementación de un algoritmo P&O de paso variable introduce una variable de incremento adicional, el cual otorga al controlador la capacidad de distinguir si las alteraciones en la potencia son consecuencia de ajustes en el voltaje de operación o de variaciones reales en la radiación solar. Este mecanismo de discriminación técnica contrasta con los estudios de referencia, que emplean el esquema clásico de P&O para gestionar los cambios de luz sin poseer dicha funcionalidad selectiva. Aunque la estrategia de paso modificado conlleva un incremento en el tiempo de procesamiento debido a que requiere acumular lecturas de dos intervalos de muestreo, esta configuración asegura una mejor convergencia. No obstante, es importante señalar que este nivel de precisión implica un sacrificio en la velocidad de seguimiento en comparación con el algoritmo de paso fijo estándar.

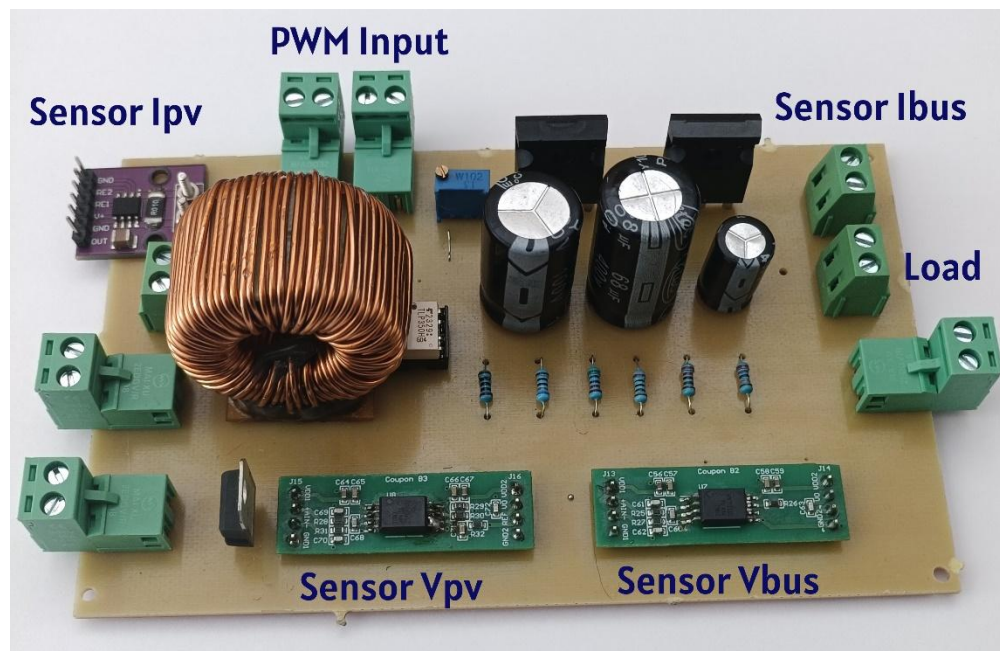


Figura 11: Tarjeta implementada de convertidor DC/DC de topología BOOST.

Fuente: Elaboración propia.

La literatura especializada ofrece un amplio espectro de metodologías para MPPT. Según las fuentes [26], estas incluyen desde técnicas heurísticas, como la optimización de partículas adaptativa [28], hasta clasificaciones detalladas [29] que dividen las estrategias en clásicas, inteligentes, de optimización e híbridas, evaluando su rendimiento a través de los años [30]. Otras investigaciones han realizado comparativas entre el método de Perturbación y Observación (P&O) y las Redes neuronales artificiales (RNN) mediante simulaciones, además de analizar hasta 14 técnicas distintas orientadas específicamente a su implementación en tarjetas embebidas de bajo costo [31], tal como se propone en este estudio. Asimismo, el interés actual se ha centrado en el desarrollo de controladores de carga utilizando simuladores en tiempo real (como el OP5707XG) para validar resultados experimentales [32]. En cuanto a los resultados presentados en las Figuras 13 y 14, se describe el comportamiento del algoritmo P&O de paso modificado frente a variaciones en la irradiancia. Este enfoque técnico presenta características

como mayor tiempo de procesamiento al requerir la acumulación de lecturas de dos intervalos de muestreo, el sistema demanda más recursos computacionales para procesar la información, discriminación de cambios que utiliza un parámetro de conteo para detectar si las variaciones de potencia son causadas por ajustes en el voltaje de operación o por cambios reales en las condiciones climáticas y compromiso entre velocidad y precisión, aunque esta configuración garantiza una convergencia superior hacia el (GMPP), la rapidez de seguimiento disminuye notablemente en comparación con los resultados de la Figura 7.

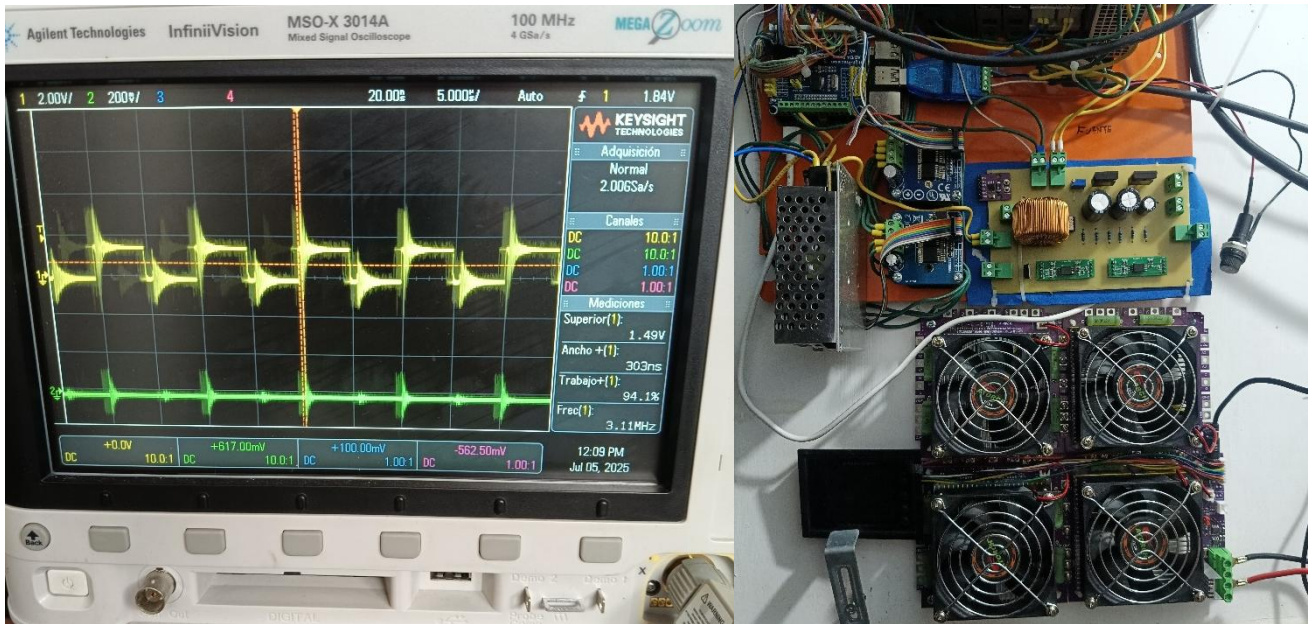


Figura 12: Emplitud de conmutación de MOSFET a frecuencia 100Khz.
Fuente: Elaboración propia.

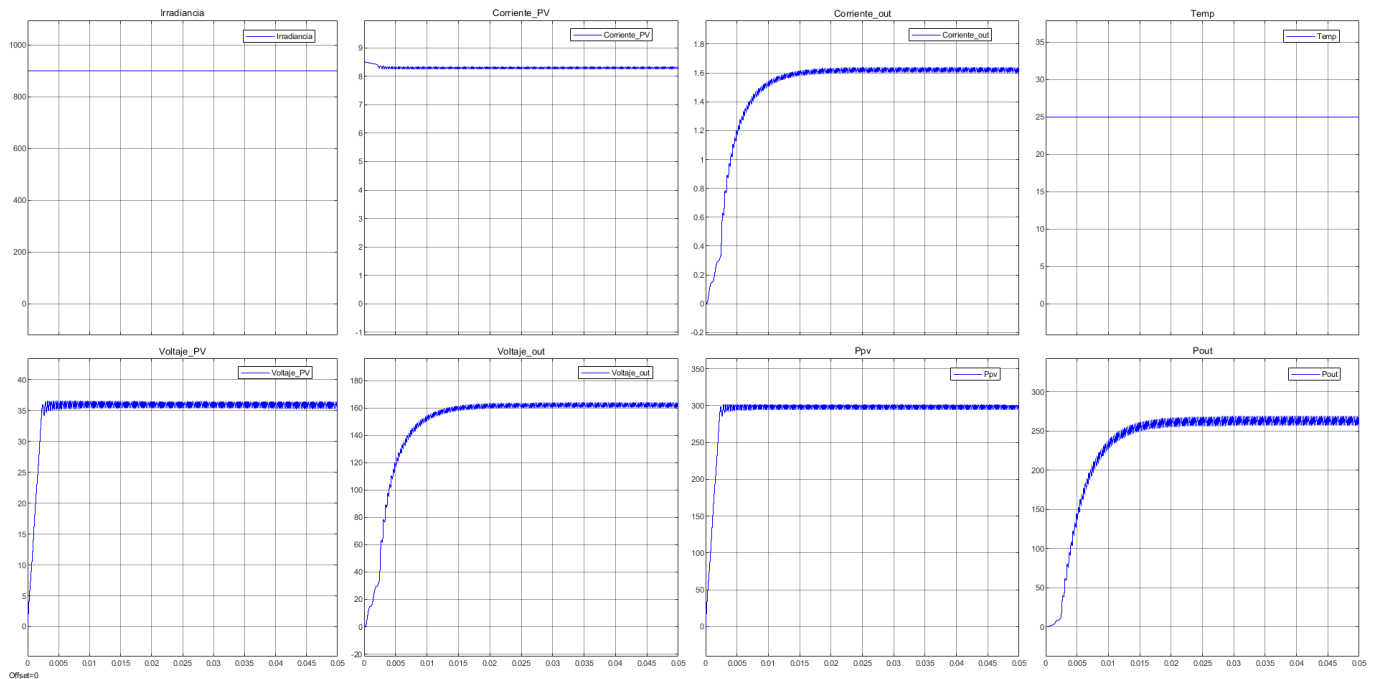


Figura 13: Medición de señal de salida del algoritmo de P&O de paso variable del sistema solar fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.

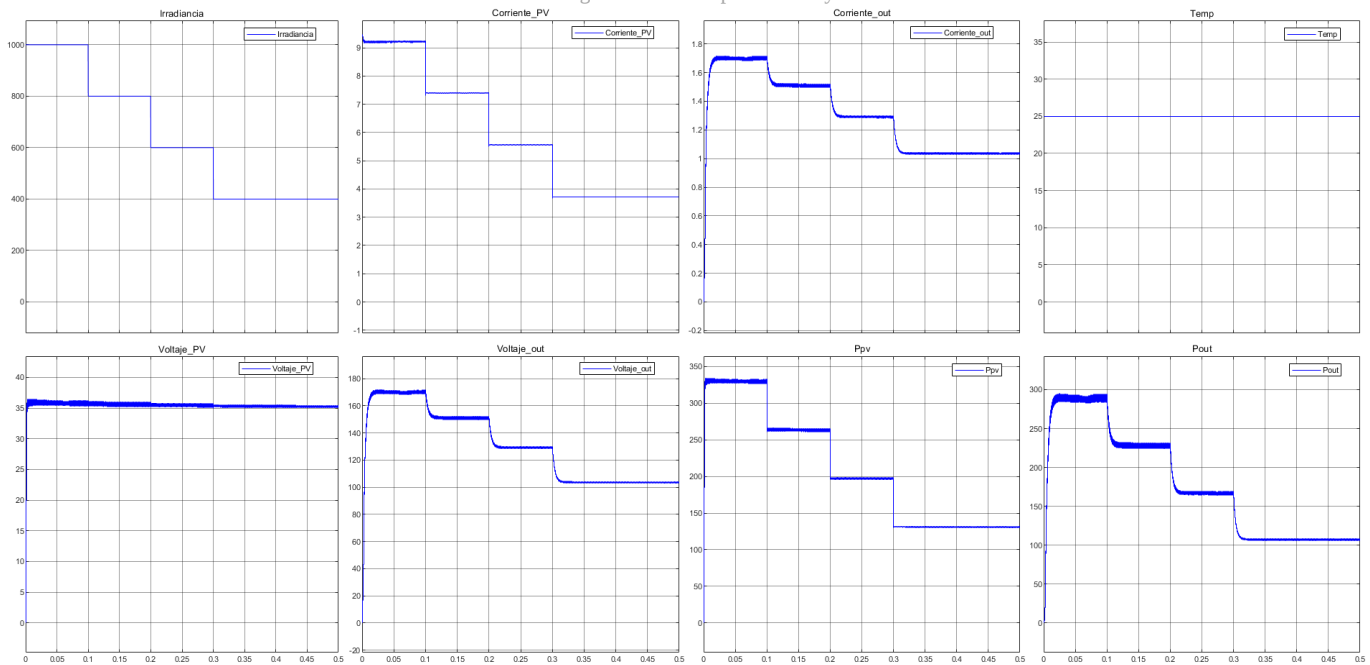


Figura 14: Medición de señal de salida del algoritmo de P&O de paso variable ante escalones descendentes del sistema solar fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

El uso de la toolbox Simscape de Matlab facilitó la caracterización eficiente de arreglos solares con marcas comerciales (como Amerisolar), lo que representó un incremento significativo en la productividad del diseño de controladores. Asimismo, se validó la viabilidad de implementar estos controladores en sistemas embebidos de bajo costo (como la Raspberry Pi 5) o mediante metodologías de hardware en el ciclo (HIL), aprovechando los módulos de expansión de fabricantes comerciales.

Se determinó que el tamaño de paso en los algoritmos P&O y P&O modificado es un factor crítico para la convergencia hacia el GMPP; si bien un ajuste preciso favorece la estabilidad, esto conlleva un sacrificio necesario en la velocidad de seguimiento. Los resultados demuestran que los algoritmos de paso fijo son insuficientes ante condiciones de sombreado parcial, ya que no detectan cambios rápidos, lo que termina comprometiendo la eficiencia energética global del sistema fotovoltaico.

La arquitectura física, compuesta por un convertidor elevador (Boost) operando a una frecuencia de conmutación de 100 kHz y gestionada por un sistema embebido, demostró ser capaz de procesar variables climáticas y eléctricas en tiempo real para maximizar la transferencia de potencia. Esta configuración garantiza una respuesta lineal y estable ante las variaciones de irradiancia típicas de regiones como Norte de Santander.

La arquitectura basada en la Raspberry Pi 5 con lenguaje Python 3 validó la eficacia de los sistemas embebidos de bajo costo para el control MPPT, logrando un seguimiento estable a una frecuencia de 10Hz y una respuesta lineal en la medición de corriente gracias al sensor INA282. Finalmente, la investigación resalta que la detección de sombreados parciales sigue siendo un desafío para los algoritmos convencionales, recomendando para trabajos futuros la implementación en hardware paralelo (FPGA) o el uso de técnicas inteligentes para maximizar la eficiencia dinámica.

VI. RECOMENDACIONES

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) dispone de diversas arquitecturas para su implementación física, donde las técnicas clásicas clasificadas como "en línea" (online) han cobrado mayor relevancia sobre las "fuera de línea" (offline) debido a su superior flexibilidad operativa.

La investigación destaca el potencial de las metodologías metaheurísticas, las cuales facilitan la integración de inteligencia artificial en sistemas embebidos o microcomputadoras mediante algoritmos simples, tales como lógica difusa (FL), redes neuronales artificiales (RNN), algoritmos genéticos (AG), e híbridos ANFIS y el esquema (P&O-AG).

Con el objetivo de optimizar la velocidad de procesamiento y minimizar los tiempos de muestreo del controlador, se recomienda la transición hacia arquitecturas de hardware paralelo como las FPGA. Esta aproximación no solo amplía las capacidades técnicas del sistema, sino que proyecta una reducción de costos y una mayor escalabilidad para futuros desarrollos tecnológicos en el área fotovoltaica.

VII. AGRADECIMIENTOS O FINANCIAMIENTO

El desarrollo de esta investigación y la consecución de sus resultados experimentales han contado con el respaldo fundamental de instituciones clave en el ámbito científico y académico de Colombia. El Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) facilitó

este proceso mediante su programa de becas. Por su parte, la Universidad de Pamplona y el Servicio Nacional de Aprendizaje aportaron tanto la infraestructura física como el software de simulación (específicamente Matlab/Simulink y su toolbox Simscape) necesarios para las fases de caracterización y validación del sistema. Este aporte institucional fue decisivo para integrar los componentes de hardware, como el convertidor Boost y la Raspberry Pi 5, con los modelos computacionales detallados en el artículo.

VIII. REFERENCIAS

- [1] F. A. Lara V, M. Padilla Ortiz, and C. Vargas Salgado, "Comparative experimental analysis of the annual energy production of a 72kWn photovoltaic solar power plant installed on a roof for self-consumption in the city of Monteria using PVsyst, PVGIS and SAM," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 43, pp. 43–2024, 2024, doi: [10.24054/rcta.v1i43.2807](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2807).
- [2] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Fifth. Florida, United States, 2024.
- [3] H. Abidi and L. Sidhom, "Systematic Literature Review and Benchmarking for Photovoltaic MPPT Techniques," *Energies*, vol. 16, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16083509>.
- [4] C. Pavithra, S. Vidhyareni, M. Vijayadharshini, S. K. B. Akshaya, and N. Varsha, "Comparison of Solar P&O and FLC-based MPPT Controllers & Analysis under Dynamic Conditions," *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, vol. 11, pp. 1–6, 2024, doi: [10.4108/ew.4988](https://doi.org/10.4108/ew.4988).
- [5] B. Yang, R. Xie, and Z. Guo, "Maximum Power Point Tracking Technology for PV Systems: Current Status and Perspectives," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 121, no. 8, pp. 2009–2022, 2024, doi: [10.32604/ee.2024.049423](https://doi.org/10.32604/ee.2024.049423).
- [6] E. J. Barbosa et al., "Hybrid GMPPT Technique for Photovoltaic Series Based on Fractional Characteristic Curve," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 14, no. 1, pp. 170–177, 2024, doi: [10.1109/JPHOTOV.2023.3323774](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3323774).
- [7] S. Senthilkumar, V. Mohan, S. Mangaiyarkarasi, and M. Karthikeyan, "International Transactions on Electrical Energy Systems - 2015 - Tripathi - Optimum design of proportional-integral.pdf," 2022.
- [8] Y. García, F. García, and J. A. Martín, "MATHEMATICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS IN SOLAR PHOTOCELLS," 2022.
- [9] M. Piliouline, P. Sánchez-Friera, and G. Spagnuolo, "Comparative of IEC 60891 and Other Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I–V Characteristics of Photovoltaic Devices," *Energies*, vol. 17, no. 3, 2024, doi: [10.3390/en17030566](https://doi.org/10.3390/en17030566).
- [10] N. Priyadarshi, S. M. Mueen, M. S. Bhaskar, and F. Azam, "An improved standalone photovoltaic system with hybrid dual integral sliding mode and model predictive control for MPPT," no. October 2021, pp. 1–15, 2023, doi: [10.1049/rpg2.12665](https://doi.org/10.1049/rpg2.12665).
- [11] M. H. Rashid, *Power Electronics Devices, Circuits & Applications 4/E*, Fourth Edi. USA, Florida, 2014.
- [12] M. Abouelela, *Power electronics for practical implementation of PV MPPT*. 2020. doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_3).
- [13] N. Hernández Díaz, A. Pardo García, E. N. Sánchez Camperos, and C. J. Vega, "Implementación De Un Módulo Para El Control Y Gestión Del Almacenamiento De Energía En Una Microrred Eléctrica," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 37, pp. 91–98, 2023, doi: [10.24054/rcta.v1i37.1258](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i37.1258).
- [14] O. Semiconductor, "Switch-Mode Power Supply Reference Manual," *Semicond.*, vol. Rev4, p. 73, 2014, [Online]. Available: www.onsemi.com.
- [15] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes, and M. Goda, "History of maximum power point tracking," *Green Energy Technol.*, pp. 1–29, 2020, doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_1).
- [16] E. Muñoz-Palomeque, J. E. Sierra-García, and M. Santos, "Técnicas de control inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia en turbinas eólicas," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 21, no. 3, pp. 193–204, 2024, doi: [10.4995/riai.2024.21097](https://doi.org/10.4995/riai.2024.21097).
- [17] A. A. Alzubaidi, L. A. Khaliq, H. S. Hamad, W. K. Al-Azzawi, M. S. Jabbar, and T. A. Shihab, "MPPT implementation and simulation using developed P&O algorithm for photovoltaic system concerning efficiency," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 11, no. 5, pp. 2460–2470, 2022, doi: [10.11591/eei.v11i5.3949](https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3949).
- [18] A. M. Eltamaly and H. M. H. Farh, *PV characteristics, performance and modelling*. 2020. doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_2).
- [19] S. Ngo, C. S. Chiu, T. D. Ngo, and C. T. Nguyen, "A novel hybrid method based MPP tracking design using boost converter for solar power systems," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 506–517, 2024, doi: [10.11591/ijpeds.v15.i1.pp506-517](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp506-517).
- [20] C. Restrepo, C. González-castaño, J. Muñoz, A. Chub, and S. Member, "An MPPT Algorithm for PV Systems Based on a Simplified Photo-Diode Model," 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3061340](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061340).
- [21] O. Abdalla, H. Rezk, and E. M. Ahmed, "Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance," *Sol. Energy*, vol. 180, no. August 2018, pp. 429–444, 2019, doi: [10.1016/j.solener.2019.01.056](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.056).
- [22] H. M. H. Farh and A. M. Eltamaly, "Maximum power extraction from the photovoltaic system under partial shading conditions," *Green Energy Technol.*, pp. 107–129, 2020, doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_4).
- [23] D. M. Atia, *Global maximum power point tracking-based computational intelligence techniques*. 2020. doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_5).
- [24] A. Zouhri, "Advanced Perturb and Observe Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems With Adaptive Step Size," *J. Autom. Mob. Robot. Intell. Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 55–60, 2024, doi: [10.14313/JAMRIS/3-2024/22](https://doi.org/10.14313/JAMRIS/3-2024/22).
- [25] F. García Reina, R. Rodríguez Rojas, T. Martínez Zamora, L. Y. Hernández Mora y F. Hernández Rodríguez, "Efficiency of conversion of energy from solar radiation into internal thermal energy of water in vacuum tube solar heaters," *Rev. Colomb. Tecnol. Av. (RCTA)*, vol. 1, no. 37, pp. 59–65, Jan.–Jun. 2021, doi: [10.24054/rcta.v1i37.980](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i37.980).
- [26] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes, and M. Goda, *On the improvements of perturb-and-observe-based MPPT in PV systems*. 2020. doi: [10.1007/978-3-030-05578-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_6).
- [27] J. D. Bastidas Rodríguez, C. A. Ramos Paja, y A. J. Saavedra Montes, «Arreglos fotovoltaicos con estructura cruzada con configuración irregular: un modelo», *RCTA*, vol. 1, n.º 43, pp. 73–77, mar. 2024, doi: [10.24054/rcta.v1i43.2821](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2821).
- [28] S. R. Chowdhury and H. Saha, "Solar Energy Materials & Solar Cells Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1441–1447, 2010, doi: [10.1016/j.solmat.2010.04.011](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.011).
- [29] W. H. Tan and J. Mohamad-Saleh, "Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications," *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: [10.3390/en16020850](https://doi.org/10.3390/en16020850).
- [30] O. E. Gualdrón Guerrero, R. I. Laguado Ramírez y E. G. Flórez Serrano, "Dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de energía solar-eólica y banco de baterías utilizando inteligencia artificial," *Rev. Colomb. Tecnol. Av. (RCTA)*, vol. 2, no. 40, pp. 152–159, Sep. 2022, doi: [10.24054/rcta.v2i40.2363](https://doi.org/10.24054/rcta.v2i40.2363).

- [31] S. Motahhir, A. El Hammoui, and A. El Ghzizal, "The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm," J. Clean. Prod., vol. 246, no. xxxx, p. 118983, 2020, doi: [10.1016/j.jclepro.2019.118983](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118983).
- [32] H. P. Nguyen, T. T. Nguyen, M. P. Le, and T. N. Tran, "Experimental platforms consisting of software-in-the-loop, hardware-in-the-loop and power-hardware-in-the-loop for developing MPPT charge controller for photovoltaic system," Sol. Energy, vol. 298, no. May, p. 113666, 2025, doi: [10.1016/j.solener.2025.113666](https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113666).