

**EMULADOR DE PERFILES DE RADIACIÓN PARA PRUEBAS DE
FUNCIONAMIENTO DE INVERSORES DE CORRIENTE DC-AC DE SISTEMAS
SOLARES FOTOVOLTAICOS**

CARLOS MARIO QUIROZ MUÑOZ



**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN ENERGÍA
MEDELLÍN
2025**

**EMULADOR DE PERFILES DE RADIACIÓN PARA PRUEBAS DE
FUNCIONAMIENTO DE INVERSORES DE CORRIENTE DC-AC DE SISTEMAS
SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Carlos Mario Quiroz Muñoz

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magister en
Energía**

**Carlos Alberto Ocampo Quintero.
Magíster en Ingeniería**

**Santiago Bustamante Mesa.
Doctor en Ingeniería**

**Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de Ingeniería
Maestría en Energía
Medellín
2025**

Dedicatoria y Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de este proyecto de tesis.

A mi esposa, Mónica Flórez, gracias por tu amor, tu paciencia infinita y tu apoyo incondicional en cada etapa de este proceso. Tu comprensión y tus palabras de aliento fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante. A mi hijo, Miguel Ángel, por ser mi mayor motivación y recordarme con su sonrisa la importancia de perseverar.

A mis padres, por su respaldo constante, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, y por brindarme los valores y la disciplina que me han traído hasta aquí.

Agradezco sinceramente a mis asesores, Carlos Alberto Ocampo y Santiago Bustamante, por su acompañamiento comprometido, sus valiosos aportes técnicos y su disposición permanente para orientar y enriquecer este trabajo. Su guía fue fundamental para alcanzar los objetivos propuestos.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro.

Resumen

El presente trabajo de grado se centró en el desarrollo y aplicación de un emulador de perfiles de radiación solar diseñado específicamente para la evaluación y pruebas de funcionamiento de inversores de corriente DC-AC utilizados en sistemas de energía solar fotovoltaica. Dada la creciente adopción de fuentes de energía renovable, se hace necesaria una alta confiabilidad y eficiencia en estos componentes, así como herramientas de ensayo que permitan reproducir condiciones reales de operación.

El proyecto se dividió en varias etapas. En primer lugar, se realizó un exhaustivo análisis de los inversores de corriente DC-AC disponibles en el mercado, identificando sus características, modos de operación y requisitos de prueba. Luego, se diseñó y construyó el emulador de perfiles de radiación solar, que permitió reproducir patrones de radiación solar realistas y variados. La arquitectura propuesta incluyó un convertidor DC-DC controlado digitalmente y un sistema de supervisión mediante una interfaz gráfica, lo que facilitó la configuración de perfiles horarios y su monitoreo en tiempo real. La implementación del emulador se basó en algoritmos de control avanzados y una interfaz de usuario intuitiva que permite a los ingenieros configurar y supervisar las pruebas de manera eficiente.

Durante la etapa de validación, el emulador demostró una precisión media del 97 % en la reproducción de la potencia esperada, con un tiempo de respuesta ante cambios abruptos de irradiancia. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas prácticas con inversores de corriente reales en sistemas solares fotovoltaicos, utilizando el emulador de perfiles de radiación para evaluar su rendimiento en condiciones simuladas de radiación solar variable. Los resultados mostraron que el emulador permitió verificar el comportamiento del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), con desviaciones inferiores al 3 % respecto a los valores teóricos. Los resultados

demonstraron la utilidad y eficacia del emulador como herramienta de prueba y validación.

Palabras clave

Emulación de perfiles de radiación, fuente regulada variable, geolocalización automática, inversores DC - AC, pruebas de funcionamiento de inversores.

Abstract

This master thesis is focused on the development and application of a solar radiation profile emulator specifically designed for the evaluation and operational testing of DC-AC power inverters used in solar photovoltaic energy systems, given that the growing adoption of renewable energy sources demands high reliability and efficiency of these components.

The project was divided into several stages. First, a thorough analysis of commercially available DC-AC power inverters was conducted, identifying their characteristics, operating modes, and testing requirements. The solar radiation profile emulator was then designed and built, allowing it to reproduce realistic and varied solar radiation patterns. The emulator's implementation was based on advanced control algorithms and an intuitive user interface that allows engineers to efficiently configure and monitor tests. To this end, a series of tests and validations were carried out to ensure the emulator's accuracy and reliability in reproducing solar radiation profiles, achieving highly satisfactory results.

Finally, practical tests were conducted with real-life inverters in photovoltaic solar systems, using the radiation profile emulator to evaluate their performance under simulated conditions of varying solar radiation. The results demonstrated the emulator's usefulness and effectiveness as a testing and validation tool.

Keywords

Automatic geolocation, DC - AC inverters, inverter performance tests, emulation of radiation profiles, variable regulated source.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. MARCO DE REFERENCIA	14
2.1. Estado del arte	14
2.2. Marco teórico	32
2.2.1. Emulador solar fotovoltaico (PV)	33
2.2.2. Métodos de emulación (PV) convencionales	35
2.2.3. Emulador fotovoltaico basado en el principio DC-DC	40
2.2.4. Emulación de perfiles de radiación solar	42
Modelo de celda PV	43
Gráfica del diagrama de bloques del emulador PV	43
2.2.5. Inversores DC-AC en sistemas fotovoltaicos	45
2.2.6. Fuentes de voltaje regulables	45
Puntos clave:	46
2.2.7. Recolección y tratamiento de datos vía API	48
2.2.8. Controladores embebidos y programación de sistemas dinámicos	48
2.2.9. Evaluación de eficiencia y confiabilidad de inversores	48
3. OBJETIVOS:	49
General:	49
Específicos:	49
4. METODOLOGÍA	50
4.1. Fase 1: Diseño del sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante API	50
4.2. Fase 2: Etapa de Control y Sincronización Electrónica	51
4.3. Fase 3: Construcción e implementación del prototipo funcional	52
4.4. Validación experimental y pruebas con inversores	53
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1. Diseño del sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante API	54
5.1.1. Configuración de la API	56
5.1.2. Interpretación y normalización de los datos	56
5.1.3. Almacenamiento y gestión de datos	56
5.1.4. Validación del sistema de adquisición	57
5.2. Desarrollo del sistema de control del emulador de radiación solar	57
5.2.1. Definición de parámetros de control	58
5.2.2. Desarrollo de los algoritmos de control	58
5.2.3. Integración entre adquisición y control	58

5.2.4. Validación del sistema de control	60
5.3. Construcción del prototipo funcional de emulación de condiciones ambientales	67
6. Construcción del prototipo funcional de emulación de condiciones ambientales	67
6.1 Arquitectura del prototipo	68
6.2 Ensamblaje y pruebas iniciales	69
6.3 Programación del controlador y ajuste dinámico	70
6.4 Validación funcional del prototipo	70
6.5 Validación experimental	72
7. DISCUSIÓN	79
7.1. Innovación tecnológica frente a las fuentes existentes	80
7.2. Aplicabilidad en la caracterización de inversores	80
7.3. Comparación con emuladores de señales y radiación	81
7.4. Avances frente a procedimientos de prueba convencionales	81
7.5. Consideraciones para futuras investigaciones	82
8. Conclusiones	83
8.1. Limitaciones del proyecto	84
8.2. Recomendaciones y líneas futuras de trabajo	85
9. BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características eléctricas de un emulador solar fotovoltaico.	32
Tabla 2. Método de emulación fotovoltaica convencional.	35
Tabla 3. Análisis comparativo de métodos de emulación de energía solar fotovoltaica.	35
Tabla 4. Resumen de los diferentes emuladores fotovoltaicos relevantes.	36
Tabla 5. Análisis comparativo de los métodos de control utilizados en la emulación solar directa.	38
Tabla 6. SWO Análisis comparativo del modo de funcionamiento del emulador DC-DC basado en PV.	39
Tabla 7. Comparativa de APIs para la adquisición de datos de irradiancia solar.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de los principios de funcionamiento de un emulador fotovoltaico controlado por voltaje [28].	38
Figura 2. Esquema de un emulador solar fotovoltaico [28].	39
Figura 3. Rango de control del convertidor buck-boost del emulador, en relación con las características I-V fotovoltaicas convencionales [28].	40
Figura 4. Diagrama esquemático del emulador solar fotovoltaico con	

diferentes modelos fotovoltaicos [28].	41
Figura 5. Diagrama de bloques del emulador PV [7].	43
Figura 6. Modelo de celda PV basado en diodo único [7].	43
Figura 7. Diagrama de bloques del SPVME [15].	46
Figura 9. Conexión del TRIAC al microcontrolador Arduino Uno para el control de potencia.	59
Figura 10. Unidad de control de iluminación ensamblada con potenciómetro de ajuste manual.	60
Figura 11. Circuito detector de cruce por cero y visualización de la onda senoidal sincronizada.	61
Figura 12. Conexión de los componentes que conforman el circuito detector de cruce por cero.	62
Figura 13. Comportamiento de la señal generada por el circuito detector de cruce por cero.	63
Figura 14. Estructura interna del módulo de emulación con paneles fotovoltaicos y luminarias.	64
Figura 15. Módulo de pruebas con cerramiento para aislamiento lumínico y térmico.	65
Figura 16. Interior del módulo tras la instalación de los paneles de aislamiento lumínico.	66
Figura 17. Diagrama electrónico para control de radiación.	68
Figura 18. Curva de radiación directa en Riohacha - Colombia 01-01-2020	72
Figura 19. Curva de potencia vs voltaje a la salida del emulador.	74
Figura 20. Curva de radiación directa Riohacha - Colombia 15-02-2020	75
Figura 21. Curva de potencia vs voltaje a la salida del emulador	76
Figura 22. Curva de radiación directa Riohacha - Colombia 13-06-2020	77
Figura 23. Curva de voltaje vs potencia a la salida del emulador	78

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica ha impulsado la necesidad de contar con herramientas precisas y versátiles para la validación de sus componentes clave, especialmente los inversores de corriente DC-AC. Su desempeño bajo condiciones reales de operación es crucial para garantizar la eficiencia y confiabilidad de todo el sistema, cumpliendo con los requisitos de interconexión e interoperabilidad con la red eléctrica definidos en estándares internacionales como la IEEE 1547 [1]. Estos dispositivos son responsables de convertir la energía generada en corriente continua por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna, apta para su uso en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Su desempeño bajo condiciones reales de operación es crucial para garantizar la eficiencia y confiabilidad de todo el sistema. Sin embargo, realizar pruebas en condiciones ambientales naturales representa un desafío debido a la variabilidad e imprevisibilidad de la radiación solar.

En este contexto, el desarrollo de un emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar representa una alternativa eficaz para replicar, de forma controlada, las condiciones reales que enfrenta un sistema fotovoltaico en un sitio específico. Este trabajo de grado tiene como objetivo general desarrollar un emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar que utilice datos obtenidos a través de una API, ajustando dinámicamente sus parámetros de funcionamiento con base en escenarios reales, lo que permitirá evaluar inversores de corriente en condiciones idénticas o similares a las de ubicaciones determinadas.

Para alcanzar este objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante una API, desarrollando un método eficiente para interpretar y almacenar los datos obtenidos, con el fin de asegurar una fuente precisa y confiable de información para la emulación de perfiles solares.

- Desarrollar un sistema de control para el prototipo de emulación, implementando algoritmos capaces de ajustar dinámicamente la intensidad de los parámetros de salida del emulador conforme a los datos de radiación solar proporcionados por la API, garantizando así una representación precisa de las condiciones solares en ubicaciones específicas.
- Construir un prototipo funcional del sistema de emulación, basado en un controlador programable que integre los datos en tiempo real obtenidos mediante la API, permitiendo la recreación de perfiles de radiación solar que sirvan como base para la evaluación de inversores DC-AC en entornos controlados.

Este enfoque no solo permite replicar escenarios históricos o en tiempo real de cualquier punto geográfico con datos disponibles, sino que también proporciona una herramienta útil para la investigación, desarrollo, y validación de tecnologías en energía solar. Además, abre la puerta a pruebas más estandarizadas y repetibles, lo que resulta especialmente valioso para fabricantes, laboratorios de ensayo e instituciones académicas.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Estado del arte

Durante la revisión bibliográfica orientada al desarrollo de este proyecto, se identificó un vacío significativo en el mercado y en la literatura académica respecto a dispositivos que integren la emulación de perfiles de radiación solar con un sistema de generación de voltaje variable de amplio rango, particularmente para la validación funcional de inversores DC-AC en sistemas fotovoltaicos. Este hallazgo refuerza la pertinencia de la propuesta, que tiene como objetivo el diseño y construcción de un prototipo que actúe como sustituto de un arreglo fotovoltaico real, simulando condiciones ambientales específicas de forma controlada, programable y replicable.

Como punto de partida, se encontró la propuesta desarrollada por Bereskin [2], quien diseñó una fuente de alimentación regulada de alto voltaje (VRHVPS) con salida ajustable entre 0 y 500 V y una corriente máxima de 0,25 A. Este sistema utiliza una topología conmutada seguida de un regulador lineal con alta relación de rechazo de fuente de alimentación (PSRR), lo que mejora la estabilidad de la salida. Además, incorpora un sistema digital de control con microcontrolador, sensores Hall para la medición de corriente, y un DAC que regula la tensión de salida. El enfoque de Bereskin permite un control de voltaje preciso, sin embargo, no integra un sistema dinámico basado en datos reales de radiación solar, como sí se propone en este proyecto.

En cuanto al comportamiento de los inversores en sistemas fotovoltaicos, el estudio de Scarabelot et al. [3] presenta un modelo híbrido adaptativo que evalúa la eficiencia de los inversores DC-AC considerando el perfil de radiación en función de la localización

geográfica y el factor de dimensionamiento del sistema. Este enfoque, centrado en datos reales de radiación solar del sur de Brasil, demuestra la necesidad de adaptar los algoritmos de control y validación a condiciones locales específicas, lo cual sustenta la importancia de contar con un sistema de emulación capaz de reproducir fielmente estas condiciones para la evaluación de inversores.

Por otra parte, el estudio desarrollado por Abba et al. [4] propone un sistema digital configurable para emular señales provenientes de detectores de radiación. El sistema, basado en un procesador FPGA, genera impulsos aleatorios con propiedades estadísticas configurables por el usuario, y puede simular ruido y fenómenos físicos asociados a la detección de radiación. Este instrumento, aunque enfocado en aplicaciones distintas como imagenología médica y monitoreo ambiental, establece un precedente importante en cuanto a la posibilidad de emular condiciones físicas de forma programable y realista.

La confiabilidad de los componentes electrónicos en inversores fotovoltaicos también ha sido objeto de estudio. Kaplar [5], en investigaciones desarrolladas en los Laboratorios Nacionales Sandia, identificó que los IGBT (transistores bipolares de puerta aislada), aunque generalmente confiables, pueden presentar fallas incluso en condiciones normales de operación. La monitorización de estos dispositivos bajo transitorios de voltaje y sobrecorrientes reveló que ciertas configuraciones resultan más susceptibles al fallo, lo que evidencia la importancia de realizar pruebas exhaustivas bajo condiciones variadas y controladas, como las que puede ofrecer un emulador de perfiles de radiación como el que se propone.

Desde el punto de vista de las pruebas de conformidad, el trabajo de Kikusato [1] aporta una visión actual sobre el comportamiento de los inversores seguidores de red frente a nuevas normativas. En este estudio, se utilizó un entorno de pruebas tipo hardware-in-the-loop para evaluar las funciones volt-var y frecuencia-watt en inversores fotovoltaicos inteligentes. La investigación resalta la necesidad de métodos de

verificación que consideren no solo el rendimiento eléctrico, sino también la capacidad del inversor para interactuar con redes eléctricas de baja inercia, un aspecto que cobra relevancia a medida que se incrementa la penetración de energías renovables.

Complementando esta perspectiva, el trabajo de Sugeng et al. [6] revisa los procedimientos de prueba de inversores solares para sistemas autónomos en Indonesia, resaltando la aplicación de la norma IEC 61683 para evaluar el desempeño bajo diferentes condiciones operativas permite garantizar la eficiencia y seguridad de los inversores. Este estudio enfatiza la importancia de la normalización en los procedimientos de prueba, algo que puede abordarse mediante la implementación de plataformas de emulación programables, que repliquen condiciones ambientales estandarizadas.

En conjunto, estos trabajos ilustran los avances recientes en fuentes de voltaje controladas, emulación de señales físicas, modelado de eficiencia energética y validación funcional de inversores. Sin embargo, ninguno de ellos integra una solución unificada y de bajo costo que permita emular perfiles reales de radiación solar para someter inversores a pruebas dinámicas en condiciones similares a las del campo. Esta carencia constituye la principal motivación para el desarrollo del dispositivo propuesto en este proyecto.

En el artículo [6] presenta un emulador integrado, portátil, de bajo costo y capaz de replicar el comportamiento en estado estable y dinámico de tres fuentes de energía: paneles solares fotovoltaicos (PV), celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) y baterías. Su principal aporte radica en la integración de la emulación de múltiples fuentes de energía en un solo sistema, con capacidad de seguimiento rápido de carga, lo que reduce la complejidad del hardware, el costo y los requerimientos de espacio para la investigación y pruebas en energías renovables. El emulador está construido alrededor de un convertidor flyback controlado por un DSP TMS320F28027 de Texas Instruments e interconectado con una interfaz gráfica (GUI)

desarrollada en LabVIEW mediante una tarjeta de adquisición de datos USB-6008 de National Instruments. El sistema emplea un compensador de tipo III y un algoritmo de control basado en tablas de búsqueda, lo que permite una emulación rápida y precisa de las características de las fuentes bajo condiciones variables de carga, garantizando alta fidelidad tanto en el comportamiento en estado estable como en el dinámico.

El artículo [7] presenta el diseño y la implementación de un emulador de panel solar fotovoltaico (PV) basado en un convertidor DC-DC tipo push-pull. La principal novedad de este trabajo radica en el uso de esta topología de conversión, que permite una respuesta rápida y eficiente en la reproducción de las curvas de corriente-voltaje (I-V) características de un panel solar real. El sistema está controlado mediante un algoritmo que ajusta dinámicamente el ciclo de trabajo del convertidor para replicar el comportamiento eléctrico del panel bajo diferentes condiciones de carga. Esta propuesta proporciona una alternativa precisa y económica para ensayos de sistemas fotovoltaicos en laboratorio, sin depender de condiciones ambientales reales.

En [8] se presenta el diseño y simulación de un emulador de panel solar fotovoltaico basado en un modelo matemático implementado en la plataforma NI LabVIEW. Su principal aporte radica en ofrecer una alternativa de bajo costo y fácilmente configurable para la validación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), evitando la dependencia de condiciones ambientales reales. A diferencia de otros métodos que utilizan tablas de búsqueda, este enfoque emplea un modelo científico de diodo único que permite generar curvas I-V y P-V en tiempo real, considerando variaciones de temperatura, irradiancia y tipo de carga. El sistema incluye controladores PI, amplificadores logarítmicos, convertidores DC-DC y tratamiento de señales de realimentación, y fue validado mediante la simulación del comportamiento de recarga de una batería de 12V–7Ah, mostrando una respuesta comparable a la de un panel real.

En el artículo [9] se presenta el diseño e implementación de un emulador de panel solar (SPE) de bajo costo basado en el modelo de aproximación por diodos. Su principal contribución es ofrecer una alternativa sencilla y económica para pruebas de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), evitando las limitaciones que impone el uso de paneles solares reales, como la variabilidad climática y la necesidad de grandes espacios. El método propuesto utiliza una fuente de corriente controlada por voltaje y una configuración de diodos y resistencias para dar forma a la curva I-V del panel. Se emplean componentes comunes y se minimiza el número total de elementos, reduciendo así el costo sin comprometer la fidelidad de la emulación. El sistema fue simulado con LTSPICE y validado experimentalmente para cargas de hasta 60 W, mostrando resultados consistentes con los perfiles esperados y permitiendo controlar en tiempo real la corriente de cortocircuito y el voltaje en circuito abierto.

En [10] se propone un novedoso emulador de paneles solares fotovoltaicos basado en simulaciones en tiempo real con Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL). Su principal aporte es el desarrollo de un sistema de emulación que combina un modelo de arreglo fotovoltaico simulado en un simulador digital en tiempo real (RTDS) con un convertidor DC-DC tipo buck como etapa de amplificación de potencia. La novedad radica en el uso de un controlador por superficie de conmutación de segundo orden para lograr una respuesta dinámica rápida y precisa, reduciendo significativamente las latencias típicas de los sistemas PHIL. Este enfoque permite estudiar la integración de energía solar a la red bajo condiciones dinámicas reales, simulando diferentes escenarios de irradiancia y carga. El sistema fue validado experimentalmente, mostrando alta fidelidad entre la simulación y el comportamiento físico del emulador, tanto en estado estable como ante transitorios.

En [11] se presenta el diseño e implementación de un emulador solar de bajo costo que permite evaluar algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos. La principal contribución del trabajo radica en su enfoque práctico: en lugar de modelar electrónicamente un panel solar, el sistema utiliza

lámparas halógenas cuya intensidad lumínica es controlada mediante una fuente de voltaje y frecuencia variable, generada por un conjunto motor-generador. Esta luz incide sobre un panel solar real, emulando diferentes condiciones de irradiancia. Se incorporan ventiladores para mitigar los efectos térmicos de las lámparas, y se emplean reflectores y ajustes en la altura de las luminarias para garantizar una distribución uniforme de la luz. El sistema permite replicar perfiles de irradiancia variables, demostrando utilidad para ensayos repetibles en laboratorio, especialmente en el desarrollo y validación de controladores MPPT en condiciones controladas.

El artículo [12] propone un emulador solar sencillo y de bajo costo diseñado específicamente para entornos de laboratorio. Su principal aporte radica en ofrecer una herramienta accesible para la validación de convertidores DC-DC y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), sin depender de condiciones solares reales. El sistema se basa en un convertidor buck controlado por un microcontrolador que regula la salida para replicar la curva I-V de un panel fotovoltaico bajo distintas condiciones de irradiancia. La metodología incluye el uso de una tabla de búsqueda basada en modelos matemáticos del panel solar para ajustar la tensión de salida según la corriente medida. Las pruebas experimentales validaron la precisión de la emulación tanto en condiciones estáticas como dinámicas, demostrando que el dispositivo es capaz de simular de forma eficaz el comportamiento de un módulo fotovoltaico real.

En [13] se propone el diseño de un emulador de panel fotovoltaico (PV) de bajo costo que puede replicar con precisión las curvas I-V de diferentes módulos solares en condiciones controladas. La principal contribución de este trabajo es la implementación de un sistema que integra un convertidor buck como emulador, controlado mediante un modelo de diodo único resuelto con el método de Newton-Raphson, junto con un convertidor boost controlado por MPPT para cargar una batería. Esta combinación permite evaluar el comportamiento de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia sin depender de condiciones climáticas reales. El emulador fue validado en

simulaciones para cargas resistivas y sistemas de carga de baterías, mostrando alta precisión, buena respuesta dinámica y resultados cercanos a los obtenidos con paneles reales. Además, se destaca como una alternativa más accesible y flexible en comparación con emuladores comerciales, con un tiempo de establecimiento más corto y menor requerimiento de almacenamiento.

El artículo [14] propone el desarrollo de un emulador fotovoltaico (PV) basado en un controlador Raspberry Pi como alternativa de bajo costo, portátil y precisa para pruebas de sistemas solares en condiciones controladas. La principal contribución radica en el uso del Raspberry Pi para ejecutar modelos del panel solar y controlar un convertidor DC-DC tipo buck, permitiendo emular curvas características I-V y P-V bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. El sistema emplea un modelo de diodo simple junto con una tabla de búsqueda para reducir el tiempo de cálculo, y ha sido validado mediante simulaciones y pruebas de hardware. Este emulador permite ensayar algoritmos MPPT, cargadores, inversores y módulos solares sin depender de condiciones ambientales reales, siendo útil tanto para investigación como para docencia.

En [15] se presenta el diseño de un emulador de módulos fotovoltaicos (SPVME) que combina técnicas de coemulación hardware-software para replicar el comportamiento de paneles solares en condiciones controladas. Su principal aporte es el uso conjunto de NI Multisim, LabVIEW y una fuente de poder DC programable para emular características I-V y P-V de módulos solares sin recurrir a tablas de búsqueda. El modelo se basa en la ecuación del diodo único, lo que permite emular distintos módulos comerciales bajo variaciones de irradiancia y temperatura. El sistema incluye un algoritmo de seguimiento de carga que ajusta dinámicamente los valores de tensión y corriente, garantizando coincidencia entre el emulador y un módulo real incluso bajo condiciones dinámicas. Se validó el SPVME con un módulo MSX-60 y configuraciones en arreglos 2×4 y 3×5, mostrando errores relativos menores al 0.52%, lo que demuestra su alta precisión y utilidad en pruebas de algoritmos MPPT y convertidores de potencia.

En [16] se presenta una topología novedosa de inversor conectado a red, adecuada para módulos fotovoltaicos tipo AC. Su principal contribución es el diseño de un convertidor de dos etapas: una primera etapa DC-DC de alto factor de elevación con salidas bipolares basada en inductores acoplados y capacitores conmutados, seguida de una segunda etapa convencional de inversor en puente medio (half-bridge). Esta estructura permite amplificar eficientemente la baja tensión generada por módulos solares (≈ 50 V) hasta niveles adecuados para inyección en redes de 220 V AC, alcanzando una ganancia mayor a 7 por salida. La propuesta resuelve eficazmente el problema de las corrientes de fuga a tierra gracias a la puesta a tierra simultánea del módulo PV y la red, lograda mediante las salidas bipolares de la etapa boost. Se destaca el uso de un solo interruptor MOSFET de bajo voltaje, lo que reduce pérdidas por conmutación y simplifica el control, incluyendo la implementación de MPPT. Los resultados experimentales, obtenidos con un prototipo de 150 W, muestran una eficiencia máxima del 96.2%, distorsión armónica total (THD) por debajo del 3.5% y eliminación efectiva de la corriente de fuga, validando la viabilidad y superioridad de la topología propuesta frente a diseños previos.

En el artículo [17] se presenta una topología novedosa de inversor conectado a red, adecuada para módulos fotovoltaicos tipo AC. Su principal contribución es el diseño de un convertidor de dos etapas: una primera etapa DC-DC de alto factor de elevación con salidas bipolares basada en inductores acoplados y capacitores conmutados, seguida de una segunda etapa convencional de inversor en puente medio (half-bridge). Esta estructura permite amplificar eficientemente la baja tensión generada por módulos solares (≈ 50 V) hasta niveles adecuados para inyección en redes de 220 V AC, alcanzando una ganancia mayor a 7 por salida. La propuesta resuelve eficazmente el problema de las corrientes de fuga a tierra gracias a la puesta a tierra simultánea del módulo PV y la red, lograda mediante las salidas bipolares de la etapa boost. Se destaca el uso de un solo interruptor MOSFET de bajo voltaje, lo que reduce pérdidas por conmutación y simplifica el control, incluyendo la implementación de MPPT. Los resultados experimentales, obtenidos con un prototipo de 150 W, muestran una

eficiencia máxima del 96.2%, distorsión armónica total (THD) por debajo del 3.5% y eliminación efectiva de la corriente de fuga, validando la viabilidad y superioridad de la topología propuesta frente a diseños previos.

El artículo [18] presenta el diseño, modelado e implementación de un sistema a escala de laboratorio para la producción de hidrógeno verde alimentado por una fuente solar emulada y un sistema de almacenamiento en baterías. Su principal contribución es integrar una microred de corriente continua (DC) compuesta por un emulador fotovoltaico, convertidores DC-DC controlados con algoritmos MPPT y PI, una batería de ion-litio de 12 V–60 Ah y un electrolizador PEM comercial, todo diseñado para operar de forma autónoma con energías renovables. El emulador solar, construido a partir de una fuente DC con resistencia en serie, simula el comportamiento de un panel solar real bajo condiciones controladas. El sistema fue simulado en MATLAB/Simulink y replicado experimentalmente en el laboratorio, obteniendo una coincidencia notable entre los resultados de simulación y los datos reales. Esta plataforma permite evaluar con precisión estrategias de control y dimensionamiento en sistemas de producción de hidrógeno verde, sentando bases para futuras mejoras en eficiencia, costos y estabilidad de microrredes renovables.

En [19] se presenta el desarrollo de un emulador fotovoltaico económico y de fácil implementación, especialmente diseñado para ambientes académicos. Su principal contribución radica en utilizar una fuente de poder DC programable controlada por una interfaz en LabVIEW, que implementa un modelo matemático del panel solar mediante una tabla de búsqueda (LUT), permitiendo emular curvas I-V y P-V de manera rápida, precisa y sin requerir gran capacidad computacional. El sistema emplea el protocolo SCPI para la comunicación entre el PC y la fuente de poder, y fue validado mediante pruebas con cargas electrónicas bajo diferentes condiciones de irradiancia. Los resultados muestran una alta correspondencia entre el comportamiento del emulador y los datos reales de paneles solares, tanto en estado estable como dinámico. Esta solución ofrece una alternativa práctica, reproducible y de bajo costo para ensayos de

convertidores, algoritmos MPPT y enseñanza en cursos de energías renovables y electrónica de potencia.

En [20] se presenta la modelación y simulación de un emulador fotovoltaico (PV) basado en un convertidor buck, diseñado para replicar las características eléctricas de un módulo solar real bajo condiciones controladas. La novedad del trabajo radica en el uso de una estrategia de control de corriente en lazo cerrado, con un controlador PID y una tabla de búsqueda que referencia datos reales de un panel solar, para asegurar que la salida del emulador imite fielmente el comportamiento de un panel fotovoltaico real. La metodología consiste en implementar el emulador en MATLAB/Simulink utilizando componentes del entorno SimPower, y validar su rendimiento comparando su salida con la del módulo SOLARWORLD Sunmodule SW50. Los resultados de la simulación confirman la precisión del emulador, demostrando una fuerte correlación entre su comportamiento y el del sistema fotovoltaico real.

En [21] se presenta el diseño y la simulación en Simulink de un emulador fotovoltaico basado en un convertidor DC-DC en modo de control de corriente, con aplicaciones sostenibles en la educación sobre energía solar. Su principal contribución radica en la comparación entre este emulador y una solución basada en el método de Newton-Raphson, logrando una buena aproximación a las curvas características I-V de un panel solar ideal, pero con menor costo y complejidad. El método propuesto emplea un control por realimentación directa con un controlador PI, y permite reproducir con alta estabilidad y rápida respuesta transitoria el comportamiento de un panel solar en diferentes condiciones de carga e irradiancia. Los resultados de la simulación demuestran que, aunque el método de Newton ofrece mayor precisión, el modelo DC-DC es suficientemente exacto y práctico para aplicaciones educativas, con errores inferiores al 0.13%, y puede ser implementado en hardware con microcontroladores.

En el estudio presentado en el artículo [22] se analiza el comportamiento de inversores grid-forming (GFM) frente a pruebas de conformidad existentes diseñadas originalmente

para inversores grid-following (GFL). La principal contribución del trabajo es aplicar estas pruebas japonesas a prototipos reales de inversores GFL y GFM de distintos fabricantes, revelando limitaciones clave en el marco de pruebas actual, el cual no considera adecuadamente las características de fuente de voltaje de los GFM. A través de ensayos comparativos bajo condiciones controladas, se identificaron tres problemas principales en los GFM: disparos indeseados por sobrecorriente, oscilaciones de potencia activa tras recuperación de fallas de voltaje, y conflictos entre la capacidad de estabilización de red y la detección de isla. La metodología empleada incluyó pruebas de variación de voltaje, frecuencia y ángulo de fase, evaluando funciones avanzadas como control de frecuencia, respuesta inercial y control de voltaje. Los resultados aportan evidencia técnica valiosa para actualizar los requisitos funcionales y métodos de verificación de los inversores GFM.

En el artículo [23] se presenta una revisión exhaustiva de las tecnologías y metodologías empleadas en el desarrollo de emuladores fotovoltaicos (PV) con un enfoque en su rendimiento. La principal contribución del trabajo radica en compilar y comparar más de treinta estudios que estaban dispersos en la literatura, facilitando así una referencia integral para investigadores y desarrolladores. Se analizan diversos tipos de emuladores, incluyendo los de tipo convencional, basados en fuentes DC programables, convertidores electrónicos de potencia, microcontroladores/FPGA/DSP, plataformas Hardware-in-the-Loop (HIL) y soluciones comerciales. El estudio evalúa cada enfoque en función de su precisión, costo, complejidad, eficiencia y capacidad de respuesta a condiciones climáticas variables. Esta revisión no solo identifica las ventajas y limitaciones de cada tecnología, sino que también proporciona una tabla comparativa para guiar la selección del emulador más adecuado según las necesidades técnicas y presupuestarias de laboratorios e instituciones educativas.

En el estudio presentado en el artículo [24] se analiza y compara el rendimiento de tres algoritmos iterativos de búsqueda de raíces —Newton-Raphson, búsqueda binaria y método de la secante— aplicados al modelado de emuladores fotovoltaicos (PV). Su

contribución principal radica en determinar cuál de estos métodos es más eficiente para calcular la corriente de salida del modelo fotovoltaico bajo diferentes estrategias de control: referencia directa (I-V) y resistencia-corriente (I-R). El método empleado incluye simulaciones detalladas en MATLAB/Simulink de un emulador PV basado en un modelo de un solo diodo, un convertidor buck y un controlador PI. Los resultados muestran que el método de Newton-Raphson converge más rápido en la estrategia de referencia directa, mientras que la búsqueda binaria es más eficiente en el modelo I-R, especialmente para altas resistencias de carga. Esta comparación aporta criterios valiosos para la selección del algoritmo más adecuado según la estrategia de control utilizada en emuladores solares.

En [25] se presenta el diseño, modelado y validación experimental de un emulador fotovoltaico (PV) basado en una fuente de corriente constante, una cadena de diodos y resistencias, siguiendo el modelo equivalente de un diodo. La novedad principal reside en el uso de ecuaciones analíticas y datos de paneles comerciales para ajustar con precisión los parámetros del circuito (R_s , R_p , I_{ph} , N y el factor de idealidad del diodo) y evaluar su comportamiento tanto eléctrico como térmico. El método incluye simulaciones en LTspice y experimentación en laboratorio, en donde se prueba el emulador bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura. Los resultados muestran que el emulador puede reproducir curvas I-V y P-V similares a las de un panel real, aunque con pérdidas térmicas significativas en los diodos, que son mitigadas mediante ventilación forzada. Esta propuesta destaca por su bajo costo, simplicidad y buen desempeño en condiciones de máxima potencia, siendo útil para pruebas educativas y de laboratorio.

El artículo [26] presenta la investigación del papel del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) en la fiabilidad y el rendimiento de los inversores fotovoltaicos, considerados aún como el eslabón más débil en los sistemas solares modernos. La contribución principal del estudio radica en evaluar experimentalmente la robustez de IGBTs comerciales bajo condiciones normales y extremas, y monitorear su

comportamiento en un inversor de 700 W operando en tiempo real. Se utilizaron pruebas de estrés en corriente continua y pulsada, así como análisis térmicos, para observar degradaciones eléctricas, sobrecorrientes transitorias y fallos prematuros incluso dentro de los límites especificados por el fabricante. El método incluye mediciones detalladas de corriente-colector, voltajes de puerta y temperaturas internas, demostrando que el IGBT es frecuentemente el componente más caliente y potencialmente más vulnerable del inversor. Estos hallazgos permitirán desarrollar modelos de fiabilidad acelerada más realistas para mejorar el diseño de inversores y prevenir fallos por envejecimiento acumulado o defectos latentes.

El artículo [27] presenta una visión general del diseño, implementación y beneficios de los emuladores fotovoltaicos (PV emulators) como herramientas clave en el análisis y desarrollo de sistemas de energía renovable. Su principal aporte radica en destacar el uso de emuladores como instrumentos educativos y de investigación que permiten simular el comportamiento de paneles solares bajo diferentes condiciones ambientales como irradiancia, temperatura y sombreados, sin necesidad de prototipos físicos. El modelo propuesto se basa en un circuito con fuente de corriente controlada, resistencia variable de carga y un modelo matemático del módulo PV, lo que permite generar curvas características I-V y P-V con alta fidelidad. Además, se discuten los beneficios (bajo costo, flexibilidad y optimización de eficiencia), así como los desafíos técnicos, como la precisión, la respuesta dinámica y la emulación de sistemas multitransistor. El artículo concluye resaltando el rol esencial de estos sistemas en la validación de algoritmos MPPT y el diseño de nuevas tecnologías solares, particularmente en entornos académicos y de formación técnica.

En el artículo [28] se presenta el diseño y simulación en MATLAB/Simulink de un emulador fotovoltaico (PV) basado en un convertidor DC-DC con control por modo de corriente. Su principal aporte consiste en ofrecer una solución educativa de bajo costo que permite reproducir con alta fidelidad las curvas I-V características de un panel solar, facilitando así la enseñanza de electrónica de potencia aplicada a sistemas

fotovoltaicos en entornos controlados. El modelo se compara con un algoritmo basado en el método de Newton-Raphson utilizando modelos de uno y tres diodos, evidenciando un buen grado de aproximación con errores menores al 0.13%. El emulador responde dinámicamente a variaciones de carga e irradiancia, demostrando una respuesta transitoria rápida (<0.01 s). Además, se realiza un análisis comparativo entre diferentes métodos de emulación y control, destacando que el enfoque propuesto permite su implementación en hardware mediante microcontroladores, lo que refuerza su aplicabilidad en prácticas académicas y formación técnica en energías renovables.

En [29] se presenta una metodología integral para el diseño de controladores basados en la técnica de control por modo deslizante (SMC) aplicada a convertidores de potencia AC/DC y DC/AC. La principal contribución del trabajo es ofrecer un marco de diseño robusto que garantiza un alto desempeño dinámico, insensibilidad a perturbaciones y simplicidad en la implementación para sistemas con dinámicas no lineales e incertidumbres. Se desarrollan algoritmos específicos para convertidores con diferente grado de conocimiento de estados, destacando el uso de PWM por modo deslizante (SMPWM). El método permite lograr objetivos como corriente de entrada sinusoidal, factor de potencia unitario, bajo rizado en la salida y rápida respuesta ante cambios de referencia. La propuesta es validada mediante simulaciones en MATLAB/Simulink, demostrando la capacidad del SMC para mantener la estabilidad y el seguimiento de referencia aún en condiciones de cambio repentino o incertidumbre. Este trabajo consolida al SMC como una técnica altamente eficaz para el control de convertidores electrónicos en aplicaciones de conversión de energía.

El artículo [30] presenta el diseño e implementación de un emulador solar orientado a aplicaciones educativas y de laboratorio, cuyo principal objetivo es analizar el comportamiento de módulos fotovoltaicos bajo condiciones de iluminación artificial con diferentes ángulos de incidencia. Su principal contribución radica en permitir la estimación de la posición óptima de un panel solar fijo respecto al Sol, sin necesidad de emplear sistemas de seguimiento solar costosos. El sistema utiliza una combinación de

lámparas halógenas y LEDs fríos como fuentes de luz, servomotores para ajustar la inclinación del panel en dos ejes (azimut y elevación), y una interfaz de usuario basada en Arduino Uno con pantalla LCD y adquisición de datos vía puerto serial. Se realizaron pruebas con celdas solares mono y policristalinas, midiendo voltaje y corriente en circuito abierto y con carga resistiva, en diferentes ángulos e iluminaciones. Los resultados muestran cómo la combinación de ambas fuentes de luz mejora la estabilidad del voltaje generado, y cómo los ángulos de incidencia afectan significativamente la eficiencia de conversión, siendo las celdas policristalinas más eficientes en condiciones artificiales. El sistema es útil para estudios comparativos, simulación de trayectorias solares y enseñanza de principios fotovoltaicos.

En [31] se propone una solución de bajo costo y sencilla para emular la irradiancia solar en pruebas de paneles fotovoltaicos, especialmente útil para evaluar convertidores como inversores o controladores MPPT en entornos de laboratorio. Su principal aporte radica en reemplazar fuentes de irradiancia reales o simuladores comerciales costosos mediante una fuente de alimentación DC en modo de corriente constante y una resistencia adicional (R_{add}), con la cual se ajusta la curva I-V simulada para que coincida con la de un panel real. El método permite generar distintas condiciones de irradiancia variando el valor de corriente, sin necesidad de iluminación artificial ni paneles solares reales. El modelo se validó mediante simulaciones en MATLAB/Simulink, demostrando que el emulador con resistencia adicional reproduce con precisión la curva característica del panel en condiciones de máxima potencia. Esta propuesta representa una herramienta práctica, económica y versátil para pruebas educativas y de investigación en sistemas fotovoltaicos.

El artículo [32] presenta el diseño y validación de un emulador fotovoltaico capaz de reproducir con alta precisión las características eléctricas de un panel solar bajo condiciones ambientales cambiantes. Su principal contribución es la implementación de un controlador en modo deslizante cuasi-estático (qSMC) a frecuencia fija, utilizando un microcontrolador de bajo costo (dsPIC33E64MC202), lo cual proporciona una solución

robusta, dinámica y económica para pruebas de sistemas fotovoltaicos en laboratorio. El sistema se basa en un convertidor buck DC-DC operando en modo de control de voltaje, con capacidad para simular variaciones rápidas de irradiancia y temperatura mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI). Se realizaron simulaciones y validaciones experimentales de las curvas I-V y P-V con resultados que evidencian una alta fidelidad con respecto al comportamiento real de paneles solares. Esta solución es particularmente útil para el desarrollo y prueba de sistemas MPPT, inversores, cargadores de baterías y aplicaciones de integración a red, sin depender de condiciones ambientales reales o módulos fotovoltaicos físicos.

En [33] se presenta el desarrollo de una plataforma avanzada de pruebas en tiempo real para sistemas de conversión de energía fotovoltaica, diseñada en la Universidad Laval (Canadá). Su principal contribución radica en la integración de un emulador de panel solar fotovoltaico, un sistema de conversión de potencia de dos etapas (convertidor boost y convertidor de fuente de voltaje —VSC—), y capacidades de simulación Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) utilizando la plataforma Opal-RT. El sistema permite evaluar el desempeño de algoritmos de control, estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), y la conformidad con estándares de red bajo condiciones ambientales dinámicas, como variaciones rápidas de irradiancia. Además, incluye una carga electrónica regenerativa trifásica que simula condiciones reales de operación. Los resultados experimentales y de simulación validan la estabilidad y respuesta del sistema ante perturbaciones, destacando la capacidad del VSC para mantener el voltaje del bus DC y la potencia activa en valores nominales. Esta instalación representa una herramienta robusta y flexible para pruebas de microrredes, almacenamiento energético y electrónica de potencia, promoviendo el desarrollo seguro y eficiente de tecnologías sostenibles.

El artículo [34] presenta un estudio comparativo entre simulación, experimentación en laboratorio y emulación en tiempo real del comportamiento de módulos fotovoltaicos bajo distintas condiciones ambientales. Su principal contribución radica en el desarrollo

de un simulador solar basado en lámparas halógenas con filtro óptico y ventilación, que permite analizar las curvas I-V y P-V en configuraciones en serie y paralelo, bajo diferentes niveles de irradiancia y temperatura. Estos resultados se comparan con los obtenidos mediante un emulador solar basado en el microcontrolador Texas Instruments C2000, demostrando una alta correlación. El estudio también aborda los efectos de pérdidas intrínsecas en las celdas solares (como reflexión, recombinación y sombreado), el impacto de la inclinación del panel, la acumulación de polvo, y presenta una metodología detallada para el dimensionamiento de sistemas solares autónomos. Esta combinación de simulación y experimentación proporciona una herramienta educativa y de validación robusta para optimizar el diseño y operación de sistemas fotovoltaicos en condiciones reales.

En [35] se presenta el diseño e implementación de un simulador de posición solar orientado a fines educativos e investigativos. Su principal contribución radica en permitir la recreación precisa de la trayectoria solar (azimut y elevación) mediante una fuente de luz artificial controlada por un sistema Arduino UNO, que opera dos motores paso a paso para ajustar la posición de la luz. A diferencia de simuladores solares tradicionales, este sistema no se enfoca únicamente en la intensidad de irradiancia, sino en simular el ángulo de incidencia de la luz solar a lo largo del día y del año. Se emplean lámparas LED de espectro completo, combinadas con fuentes halógenas y de diferentes temperaturas de color, para evaluar el desempeño de celdas solares bajo distintas condiciones de iluminación. El sistema permite a los usuarios seleccionar fecha y hora, y automáticamente posiciona la fuente de luz para simular la ubicación solar correspondiente. Las pruebas realizadas demuestran su utilidad para estudiar el efecto del ángulo de inclinación en la eficiencia de los paneles y comparar diferentes tipos de tecnología fotovoltaica en un entorno controlado.

En el artículo [36] se presenta una innovadora técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para sistemas fotovoltaicos, basada en un filtro de Kalman, y su implementación en tiempo real mediante un emulador PV y una plataforma dSPACE

DS1103. La principal novedad radica en el uso del filtro de Kalman para mejorar la precisión y velocidad del seguimiento de potencia, reduciendo los errores provocados por ruido de medición y condiciones climáticas cambiantes. El método se evalúa mediante simulaciones y pruebas experimentales, comparándolo con el algoritmo tradicional de Perturbación y Observación (P&O). Se destaca el análisis del contenido armónico total (THD), donde el enfoque con Kalman mostró una notable reducción de distorsiones en corriente y tensión (promedios de 0.038% frente a más del 3% con P&O), lo cual implica una mejora significativa en la calidad de energía del sistema. La propuesta demuestra ser eficaz, precisa y robusta frente a variaciones de irradiancia y temperatura, lo que la convierte en una solución prometedora para aplicaciones reales en sistemas fotovoltaicos.

En [37] se valida un procedimiento de prueba de inversores solares para sistemas fotovoltaicos autónomos, desarrollado en el laboratorio de pruebas del sistema PV de B2TKE en Indonesia, de acuerdo con el estándar IEC 61683. Su principal contribución radica en la evaluación sistemática de cinco inversores comerciales bajo diversas condiciones de carga, factor de potencia y voltajes, con el fin de verificar su eficiencia, forma de onda y distorsión armónica. El método incluye pruebas de consumo en vacío, cargas resistivas e inductivas, condiciones de sobrecarga y subcarga, así como análisis de la distorsión armónica total (THD). Los resultados muestran que la eficiencia máxima de los inversores se alcanza con cargas resistivas al 25% de la capacidad nominal, y que el rendimiento disminuye al reducir el factor de potencia. Las formas de onda de salida fueron predominantemente senoidales con THD inferior al 5%. El estudio concluye que el procedimiento y la instalación de prueba son adecuados para inversores de hasta 15 kW, aunque recomienda ampliar la capacidad para cubrir una gama más amplia de productos comerciales.

El artículo [38] presenta el diseño de una fuente de alimentación de alto voltaje variable regulada (VRHVPS), capaz de entregar de 0 a 500 V con una corriente máxima de 0,25 A. Su principal contribución consiste en integrar un convertidor de modo

conmutado (SMPS) con un regulador lineal de alta precisión, logrando una alta tasa de rechazo de rizado (PSRR) de 58 dB. El sistema incorpora control digital mediante un microcontrolador de 8 bits, con interfaz aislada I²C, sensores Hall para medición de corriente, convertidores ADC/DAC de 12 bits y una interfaz de usuario con pantalla digital y codificador rotatorio. El método combina eficiencia energética y precisión en la regulación, con protección contra sobrecorriente y control digital sobre el voltaje de salida. Se utilizan componentes de bajo costo y estructura modular para facilitar la integración en bancos de pruebas modernos. El diseño es especialmente útil para probar amplificadores de RF, convertidores DC-DC y módulos de potencia basados en tecnología SiC, destacándose por su precisión, robustez, y capacidad de monitoreo seguro en sistemas de alto voltaje.

En conjunto, los trabajos encontrados ilustran los avances recientes en fuentes de voltaje controladas, emulación de señales físicas, modelado de eficiencia energética y validación funcional de inversores. Sin embargo, ninguno de ellos integra una solución unificada y de bajo costo que permita emular perfiles reales de radiación solar para someter inversores a pruebas dinámicas en condiciones similares a las del campo. La tendencia se orienta hacia emuladores de alta precisión basados en convertidores DC-DC (como *buck* o *push-pull*) y el uso de técnicas de control avanzadas (como *PHIL* o *Sliding Mode Control*) para simular curvas I-V con gran fidelidad. No obstante, la integración de datos de radiación geolocalizados obtenidos vía API para la modulación dinámica en un prototipo funcional de bajo costo representa el vacío que esta tesis busca cubrir, ofreciendo una plataforma accesible para la investigación y la docencia.

2.2. Marco teórico

El presente proyecto se fundamenta en una serie de conceptos teóricos que permiten la comprensión y el diseño del sistema propuesto. A continuación, se presentan los más relevantes. El emulador solar fotovoltaico (PV) se modela típicamente en entornos de simulación (como Simulink) replicando con alta fidelidad las curvas características I-V

de un panel solar. Esto se logra a menudo mediante el uso de un convertidor DC-DC controlado en modo de corriente. Este enfoque tiene como objetivo principal facilitar la enseñanza y el análisis de la electrónica de potencia aplicada a sistemas fotovoltaicos, ofreciendo una alternativa accesible y didáctica para estudiar el comportamiento dinámico de los módulos solares bajo diferentes condiciones de carga e irradiancia, sin depender de paneles físicos ni condiciones ambientales reales.

2.2.1. Emulador solar fotovoltaico (PV)

El emulador solar fotovoltaico (PV) es una herramienta clave para simular el comportamiento eléctrico de un panel solar bajo condiciones controladas, permitiendo pruebas y enseñanza sin necesidad de radiación solar real. En este artículo, se presenta un modelo de emulador basado en un convertidor DC-DC controlado por corriente, implementado en Simulink/MATLAB, que utiliza un método de control por referencia directa para reproducir con precisión la curva I-V de un panel fotovoltaico.

Características eléctricas:

Tabla 1. Características eléctricas de un emulador solar fotovoltaico.

Descripción	Característica
Corriente de corto circuito I_{sc} (A)	Corriente máxima disponible del panel en condiciones de cortocircuito (Carga=0)
Voltaje de circuito abierto V_o (V)	Voltaje máximo disponible del panel en condiciones de circuito abierto (Carga= ∞)
Punto de máxima potencia MPP (W)	Depende de los niveles de temperatura e irradiancia
Corriente en MPP (punto de máxima potencia) I_{mpp} (A)	72 - 92 % I_{sc} [4]

Voltaje en MPP (punto de máxima potencia) V_{mpp} (V)	70 - 80 % V_{oc} [4]
Características I-V	No lineal
Impedancia característica (Ω)	Depende de los niveles de irradiación

Punto máximo de potencia (MPP) [20]: El MPP es el punto que se observa en las curvas características de Potencia-Voltaje (P-V) y Corriente-Voltaje (I-V) de un módulo solar.

- Cuando un panel fotovoltaico alcanza su MPP, produce la mayor energía.
- El valor del MPP (medido en vatios) es dinámico y depende de los niveles de temperatura e irradiación (insolación) a los que está expuesto el módulo.
- La potencia en el MPP es el valor más importante para evaluar, ya que luego de este punto la potencia comienza a disminuir si se sigue aumentando el voltaje, lo cual es característico del comportamiento no lineal de un módulo fotovoltaico.

Corriente en MPP (I_{mpp}) [28]: La Corriente en MPP (I_{mpp}), o corriente en el Punto de Máxima Potencia, se define como la corriente de salida máxima disponible del módulo fotovoltaico cuando opera en el MPP.

- Característica Cuantitativa: Se estima que la típicamente se encuentra entre el 72% y 92% de la Corriente de Cortocircuito (I_{sc}).
- Contexto: La Corriente de Cortocircuito (I_{sc}) es la corriente máxima disponible del panel en condiciones de cortocircuito (cuando la Carga = 0).

Voltaje en MPP (V_{mpp}) [28]: El Voltaje en MPP (V_{mpp}), o voltaje en el Punto de Máxima Potencia, es el voltaje de salida del panel fotovoltaico cuando este está operando a su máxima potencia.

- Característica Cuantitativa: Se estima que típicamente se encuentra entre el 70% y 80% del Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}).
- Contexto: El Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}) es el voltaje máximo disponible del panel en condiciones de circuito abierto (cuando la Carga = ∞).

Características I-V (Corriente-Voltaje) [28]: Las Características I-V se refieren a la curva que describe el comportamiento eléctrico fundamental del módulo fotovoltaico.

- Descripción Clave: La característica I-V de un emulador solar fotovoltaico se describe como No lineal.
- Concepto Ampliado: Esta curva ilustra la relación entre la corriente de salida (I_{pv}) y el voltaje de salida (V_{pv}). Un generador solar fotovoltaico ideal se comporta como una fuente de corriente (es decir, una corriente constante alrededor de la) para un amplio rango de voltajes terminales.

Impedancia Característica (Ω) [28]: La Impedancia Característica (Ω) de un emulador solar fotovoltaico es una magnitud dinámica.

- Dependencia: La impedancia característica depende de los niveles de irradiación (insolación).
- Contexto: Este parámetro está intrínsecamente ligado al Punto de Máxima Potencia (MPP), cuyo valor también depende de los niveles de irradiación y de temperatura.

2.2.2. Métodos de emulación (PV) convencionales

Una clasificación general de los métodos convencionales de emulación fotovoltaica se analiza en la Tabla 2. Estos métodos se utilizan para calcular o mapear la curva I-V del panel solar para el control del emulador.

Cálculo directo: Aproxima los parámetros de la curva I-V de forma analítica. Este método se basa en la ecuación del diodo único o dos diodos, y requiere resolver ecuaciones no lineales (por ejemplo, con métodos como Newton-Raphson) para determinar el punto de operación.

Lineal por partes: Emplea algoritmos de ajuste de curvas para estimar corriente y voltaje, simplificando la curva I-V no lineal mediante múltiples segmentos lineales.

Tabla de consulta (Look-up table - LUT): Utiliza datos PV previamente obtenidos y almacenados, donde el controlador busca el voltaje o la corriente de referencia correspondiente a una irradiancia y temperatura dadas.

Red neuronal: Utiliza modelos basados en redes neuronales entrenadas con datos históricos o simulados para predecir la curva I-V.

El método de cálculo directo aproxima los parámetros de la curva I-V de forma analítica, mientras que los métodos de tabla de consulta y redes neuronales utilizan datos PV previamente obtenidos. Por su parte, el método lineal por tramos emplea algoritmos de ajuste de curvas para estimar corriente y voltaje. Ejemplos del método de cálculo directo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 2. Método de emulación fotovoltaica convencional.

Método de emulación fotovoltaica convencional						
Cálculo directo		Lineal por partes		Tabla de consulta		Red neuronal

Tabla 3. Análisis comparativo de métodos de emulación de energía solar fotovoltaica.

Característica	Cálculo directo	Lineal por partes	Tabla de consulta	Red neuronal
Precisión	Alta	Bajo	Basada en el tamaño de la	Depende de los datos de

			tabla de consulta	entrenamiento
Tiempo de cálculo	Alto	Bajo	Bajo	Basado en el número de neuronas
Requisito de memoria	Bajo	Bajo	Alto	Basado en el número de neuronas
Flexibilidad	Depende del modelo equivalente	Depende del modelo equivalente	Bajo	Depende de los datos

La tabla 4 muestra un resumen de tecnologías utilizadas en emuladores fotovoltaicos, destacando cuatro tipos principales: FPGA, fotodiodo, convertidor DC-DC y AD/DC. Cada uno presenta ventajas específicas en precisión, versatilidad, velocidad de respuesta o calidad de energía, según su principio de funcionamiento.

Tabla 4. Resumen de los diferentes emuladores fotovoltaicos relevantes.

Tipos	Tecnología principal	Características
FPGA	El uso de un FPGA	Los algoritmos de control son digitales; por lo tanto, la complejidad se puede utilizar en algoritmos con un retraso mínimo.
Fotodiodo	El uso de un fotodiodo y un amplificador de potencia	Es más sencillo de desarrollar y emular con precisión la célula fotovoltaica, con alta precisión para sombreado parcial, sin embargo, requiere una fuente de luz.
Convertidor DC-DC	El uso de un convertidor DC-DC y un	Alta versatilidad, comportamiento dinámico

	microcontrolador	y puede emular con precisión módulos fotovoltaicos.
AD/DC	El uso de un convertidor AC/DC	Proporciona un alto factor de potencia de entrada con baja distorsión de corriente.

Los métodos de control en emuladores fotovoltaicos convencionales se clasifican en: referenciación directa, hill climbing (método iterativo que ajusta la tensión o corriente para encontrar el punto de máxima potencia observando cambios en la potencia. Es simple y no requiere modelo, pero puede generar oscilaciones y ser más lento ante variaciones rápidas) y modo híbrido (combina referenciación directa e hill climbing. La referenciación directa fija rápidamente un punto inicial, mientras que hill climbing lo ajusta finamente. Ofrece buena precisión y adaptabilidad frente a cambios dinámicos), cuyas ventajas y desventajas se comparan en la Tabla 5. El diseño propuesto emplea cálculo directo junto con el método de referenciación directa para controlar un convertidor DC-DC y reproducir las características de un módulo solar. En el control por voltaje (Figura 1), se genera una señal de control comparando la tensión de referencia (V_{ref}) con la salida del convertidor. En cambio, el control por corriente (Figura 2) ofrece mayor estabilidad y respuesta transitoria más rápida al comparar la corriente de carga con la referencia y ajustar el ciclo de trabajo mediante un controlador PI. La Tabla 5 presenta un análisis comparativo de ambos enfoques.

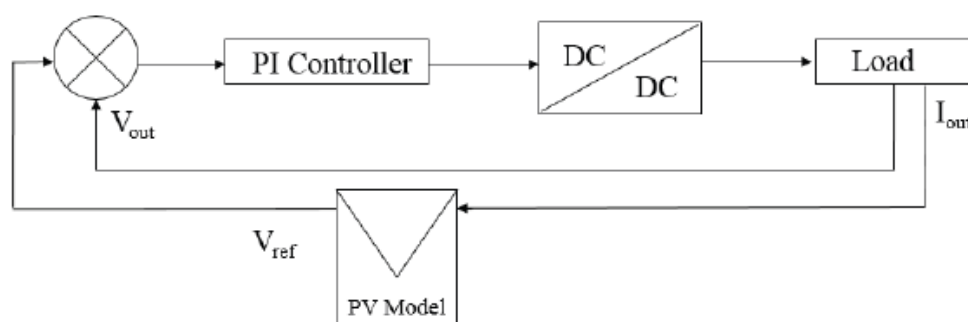


Figura 1. Diagrama esquemático de los principios de funcionamiento de un emulador fotovoltaico controlado por voltaje [28].

Tabla 5. Análisis comparativo de los métodos de control utilizados en la emulación solar directa.

Características	Referencia directa	Escalada	Controlador modo híbrido
Precisión	Preciso en estado estacionario	Determinado por el valor de paso	Preciso
Algoritmos adicionales	Ninguno	Necesario	Necesario
Complejidad	Más simple que HM	Simple	Complejo
Costo computacional	Alto costo	Menos que la referencia directa	Alto costo
Velocidad de cálculo del valor de referencia	Lento debido a la convergencia	Determinado por la velocidad del controlador	Lento debido a la convergencia
Respuesta transitoria	Determinado por el sistema de controlador aplicado	La velocidad a estado estacionario está determinada por el valor de paso	Determinado por el sistema de controlador aplicado
Valor de paso	El controlador ajusta automáticamente	Valor constante	El controlador ajusta automáticamente
Referencias duales	Solo admite referencia única	Solo admite referencia única	Admite referencias duales

Tabla 6. SWO Análisis comparativo del modo de funcionamiento del emulador DC-DC basado en PV.

	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades
1	Mayor estabilidad y una respuesta transitoria más rápida	Baja tolerancia al ruido	Aplicaciones donde la carga es sensible y la corriente (es decir, aplicaciones basadas en baterías)
5	Alta tolerancia al ruido, mejor para grandes variaciones en la carga	Respuesta transitoria lenta	Aplicaciones basadas en la red con grandes variaciones en la carga de salida
6	Y mayor sensibilidad	Mayor costo y complejidad	Aplicable en aplicaciones sensibles donde el costo no es un factor importante

2.2.3. Emulador fotovoltaico basado en el principio DC-DC

En la Figura 3 se muestra un diagrama esquemático del regulador y en la Figura 4 se ilustra la transformación de la impedancia de carga. Para permitir un mejor análisis, se investigan diferentes modelos solares fotovoltaicos equivalentes (Figura 4).

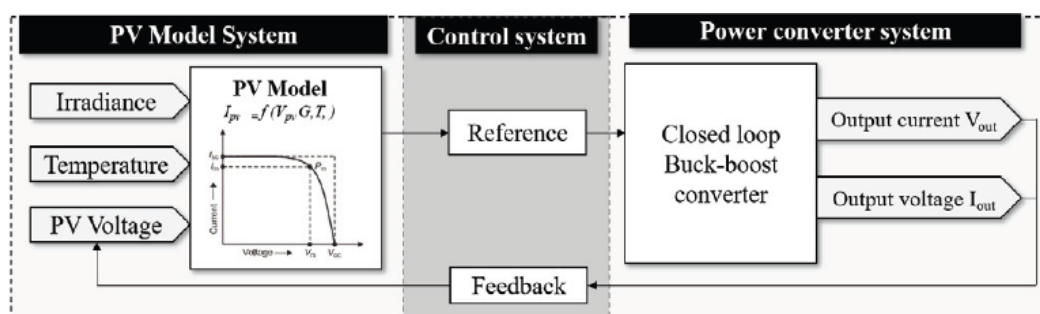


Figura 2. Esquema de un emulador solar fotovoltaico [28].

El emulador se regula para operar en el punto donde la línea de carga intersecta la curva I-V del módulo fotovoltaico (Figura 4), correspondiente a una carga específica. Si se asume que R_{pv3} es la carga y el emulador inicia en el punto b (con corriente I_2 y

voltaje V_2), el controlador ajusta progresivamente la relación entre voltaje y corriente hasta que la pendiente R_{pv3}/R_{Load} coincida con la curva I-V del panel solar simulado. La Figura 5 representa un diagrama esquemático de un emulador solar fotovoltaico.

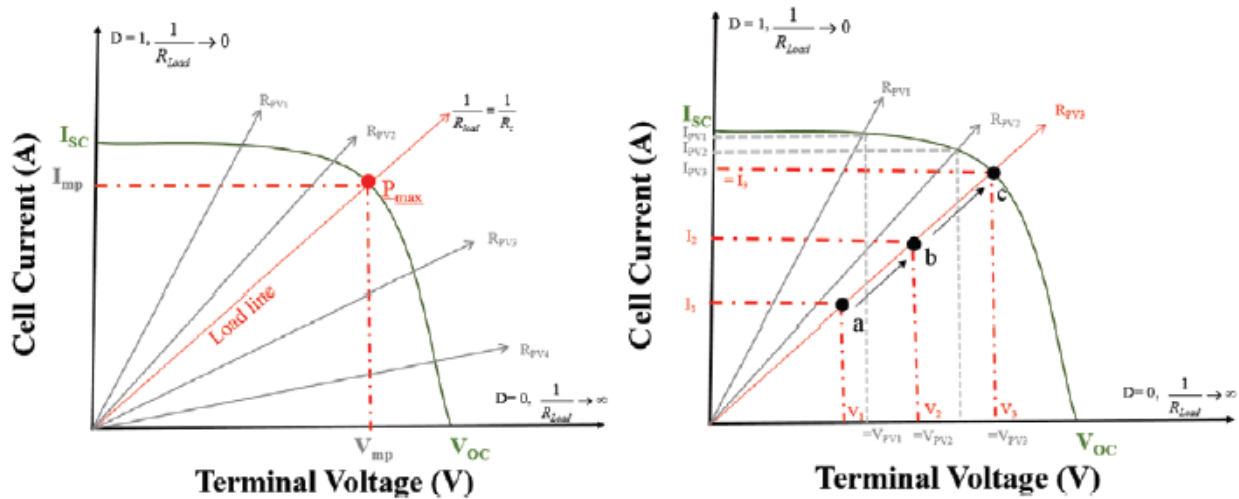


Figura 3. Rango de control del convertidor buck-boost del emulador, en relación con las características I-V fotovoltaicas convencionales [28].

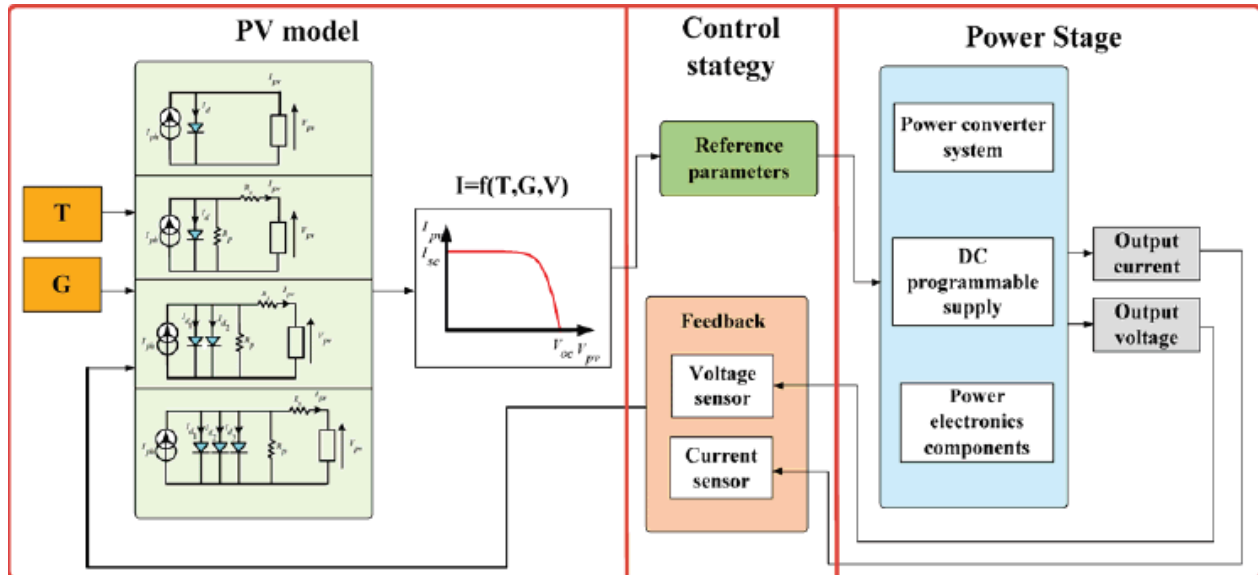


Figura 4. Diagrama esquemático del emulador solar fotovoltaico con diferentes modelos fotovoltaicos [28].

2.2.4. Emulación de perfiles de radiación solar

La radiación solar es la cantidad de energía que emite el sol y que llega a la superficie terrestre. Se mide comúnmente en W/m^2 y varía según la hora del día, el clima, la latitud y la época del año. La emulación de perfiles de radiación consiste en reproducir artificialmente, mediante señales eléctricas, las condiciones de iluminación solar que experimentarían los paneles en un entorno natural. Esta técnica es fundamental para pruebas de laboratorio de dispositivos fotovoltaicos, ya que permite replicar condiciones controladas y repetibles.

El artículo [7] presenta el desarrollo de un emulador de panel solar fotovoltaico basado en un convertidor DC-DC tipo push-pull, con el objetivo de reproducir con alta precisión las curvas características I-V y P-V de un módulo solar. Su principal aporte consiste en el diseño de un sistema capaz de responder dinámicamente a variaciones de carga mediante un algoritmo de control que ajusta el ciclo de trabajo del convertidor para emular el comportamiento de un panel real. Aunque no se enfoca en la emulación de perfiles de irradiancia temporales, el enfoque resulta útil como referencia para el diseño de emuladores que busquen replicar condiciones variables, ya que permite validar convertidores, controladores MPPT y otros dispositivos en entornos de prueba controlados, sin depender de condiciones solares reales.

El emulador fotovoltaico (PV) consta de tres componentes principales:

1. Modelo PV: Genera las características corriente-voltage (I-V) del panel fotovoltaico, esenciales para el control en lazo cerrado del sistema de conversión de potencia. La precisión del modelo PV es crucial para el rendimiento del

emulador, requiriendo cálculos en tiempo real.

2. Estrategia de control: Conecta el modelo PV con el convertidor DC-DC, asegurando que el emulador opere de manera consistente y adaptable a diferentes tipos de módulos PV. Debe ser eficiente, con baja complejidad computacional y sin afectar el control en lazo cerrado.
3. Convertidor DC-DC: Transforma las características I-V generadas por el modelo PV en una salida capaz de transmitir potencia de manera efectiva.

Modelo de celda PV

Se utiliza el modelo de diodo único para simular el comportamiento no lineal de los paneles solares. La ecuación de salida de corriente basada en la Ley de Kirchhoff es:

$$IPV = I_{ph} - I_0[\exp((V_{pv} + IPVR_s)/V_t) - 1] - (V_{pv} + IPVR_s)/R_{sh} \quad [28]$$

Donde:

- IPV: Corriente de salida del módulo PV.
- V_{pv}: Voltaje en el módulo PV.
- I_{ph}: Fotocorriente generada por la luz incidente.
- I₀: Corriente de saturación inversa del diodo.
- R_s: Resistencia en serie.
- R_{sh}: Resistencia en paralelo.

Gráfica del diagrama de bloques del emulador PV

El diagrama de bloques del emulador PV muestra la interacción entre el modelo PV, el circuito de acondicionamiento de señal, la generación de señales PWM y el convertidor DC-DC (Figura 6).

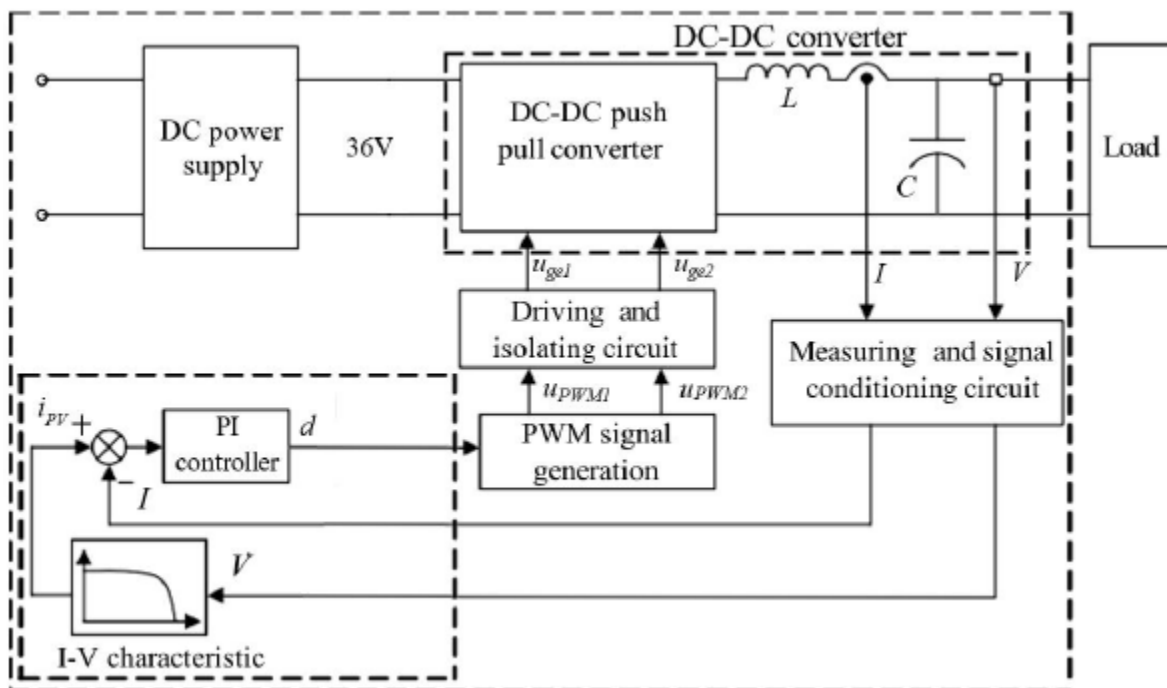


Figura 5. Diagrama de bloques del emulador PV [7].

El circuito equivalente incluye una fuente de corriente, un diodo, resistencias en serie y paralelo (Figura 7).

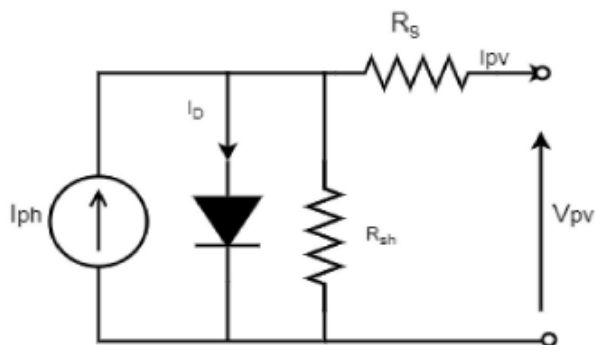


Figura 6. Modelo de celda PV basado en diodo único [7].

2.2.5. Inversores DC-AC en sistemas fotovoltaicos

Los inversores son dispositivos electrónicos que convierten la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC) utilizable en redes eléctricas convencionales. Su eficiencia, confiabilidad y capacidad de respuesta a diferentes condiciones de operación son cruciales para el rendimiento global de los sistemas fotovoltaicos. Existen diferentes topologías de inversores, incluyendo inversores autónomos, conectados a red, y con capacidad de formación de red (Grid Forming).

2.2.6. Fuentes de voltaje regulables

Una fuente de voltaje regulada variable es un dispositivo capaz de entregar un voltaje de salida ajustable dentro de un rango determinado. Su diseño puede incorporar etapas de conmutación (como los convertidores flyback) y etapas lineales para el ajuste fino. Para garantizar la estabilidad de la salida, se utilizan mecanismos de realimentación y control digital, habitualmente implementados en microcontroladores o plataformas FPGA.

El artículo [15] emplea una fuente DC programable comercial, controlada desde LabVIEW. Además, reproduce características I-V dinámicamente, permitiendo seleccionar y simular distintos módulos fotovoltaicos sin tablas de búsqueda. Este documento presenta una técnica de co-emulación de hardware y software para emular características de módulos solares fotovoltaicos, facilitando la evaluación del rendimiento de sistemas de conversión de energía solar.

Describe el funcionamiento del SPVME, que utiliza una fuente de alimentación DC programable controlada por LabVIEW para emular las características de un módulo fotovoltaico solar. El modelo del módulo fotovoltaico se basa en el modelo de diodo único, implementado en Multisim mediante codificación SPICE.

Puntos clave:

1. Modelo del módulo fotovoltaico:

- Se utiliza el modelo de diodo único por su simplicidad, repetibilidad y precisión.
- La ecuación principal que describe la corriente del módulo fotovoltaico es:

$$IPV = I_{ph} - I_{rs} \{ \exp[q(V_{PV} + IPV * R_s) / (KAT_c)] - 1 \} - [(V_{PV} + R_s) / (IPV * R_{sh})] \quad [15]$$

Donde:

- IPV: Corriente de salida del módulo fotovoltaico.
- I_{ph} : Corriente fotogenerada.
- R_s : Resistencia en serie.
- R_{sh} : Resistencia en paralelo.
- V_{PV} : Voltaje de salida del módulo fotovoltaico.
- K: Constante Boltzman.
- A: Factor de idealidad de la célula solar fotovoltaica.
- T_c : temperatura de la superficie de la célula solar fotovoltaica.

Integración de software y hardware:

- Multisim simula las características del módulo fotovoltaico, mientras que LabVIEW controla la fuente de alimentación DC programable.
- LabVIEW ajusta la salida de la fuente de alimentación para replicar el voltaje y la corriente del módulo fotovoltaico bajo diferentes condiciones de irradiación y temperatura.

2. Funcionamiento del sistema:

- La fuente de alimentación DC programable opera en modo de voltaje constante o corriente constante, dependiendo de la carga conectada.
- LabVIEW utiliza NI myDAQ para generar señales de control basadas en los valores simulados en Multisim.

La Figura 8 muestra la interacción entre Multisim, LabVIEW y la fuente de alimentación DC programable.

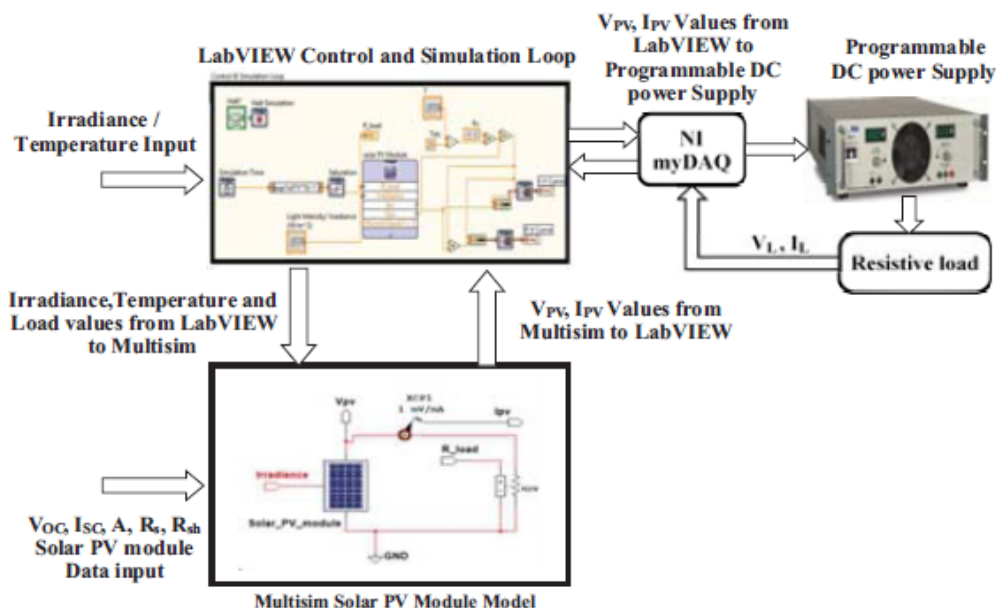


Figura 7. Diagrama de bloques del SPVME [15].

Destaca cómo el SPVME utiliza herramientas de simulación y control para emular con precisión las características de un módulo fotovoltaico, permitiendo pruebas bajo condiciones controladas.

2.2.7. Recolección y tratamiento de datos vía API

Una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) permite acceder a bases de datos remotas que contienen información meteorológica, incluyendo niveles de radiación solar en tiempo real o históricos. Los datos adquiridos a través de una API están en formato CSV, y deben ser interpretados, normalizados y almacenados adecuadamente para su uso en sistemas de control. En este proyecto, estos datos son fundamentales para ajustar dinámicamente el comportamiento del emulador.

2.2.8. Controladores embebidos y programación de sistemas dinámicos

La lógica de control del sistema propuesto se implementa en un microcontrolador, el cual ejecuta algoritmos que permiten ajustar dinámicamente los parámetros de salida del emulador según los perfiles de radiación adquiridos. El uso de técnicas de programación estructurada y orientada a eventos, junto con métodos de interpolación para suavizar transiciones, es clave para garantizar un funcionamiento preciso y estable.

2.2.9. Evaluación de eficiencia y confiabilidad de inversores

La evaluación de inversores en condiciones controladas permite detectar fallas, validar algoritmos de seguimiento de máxima potencia (MPPT), y garantizar el cumplimiento de normativas como la IEC 61683. Asimismo, la posibilidad de simular fallos o sobrecargas controladas permitirá analizar el comportamiento de los dispositivos en situaciones de estrés, mejorando así su confiabilidad y vida útil.

3. OBJETIVOS:

General:

Desarrollar un emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar, que utilice datos obtenidos a través de una API para ajustar dinámicamente sus parámetros de funcionamiento según escenarios reales, permitiendo la evaluación de inversores bajo condiciones de radiación auténticas o similares a las de un sitio específico.

Específicos:

- Diseñar un sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante una API, desarrollando un método eficiente para interpretar y almacenar los datos obtenidos, asegurando así la disponibilidad de información precisa para la emulación de perfiles de radiación solar.
- Desarrollar un sistema de control para el prototipo de emulación de perfiles de radiación solar, implementando algoritmos que ajusten dinámicamente la intensidad de los parámetros según los datos de radiación proporcionados por la API, garantizando una emulación precisa de las condiciones de radiación solar en una ubicación específica.
- Construir un prototipo funcional que sirva como sistema de emulación de condiciones ambientales, utilizando un controlador programado para ajustar dinámicamente los parámetros de funcionamiento según los datos obtenidos por la API.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo del emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar se estructuró en tres grandes fases, correspondientes a los objetivos específicos planteados. Cada fase se abordó de manera secuencial, permitiendo la integración progresiva de los distintos subsistemas, desde la adquisición de datos hasta la emulación física en un prototipo funcional. En todas las etapas, se aplicaron principios de diseño experimental, así como buenas prácticas de programación, validación técnica y documentación, para asegurar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

4.1. Fase 1: Diseño del sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante API

La primera etapa del proyecto se centró en garantizar el acceso continuo y confiable a datos de radiación solar geolocalizados. Para ello, se inició con una revisión exhaustiva de las APIs disponibles que ofrecen datos ambientales y meteorológicos, priorizando aquellas que permitieran la consulta de información histórica y en tiempo real, con especial atención a los valores de radiación solar global. Se evaluaron criterios como cobertura geográfica, frecuencia de actualización, precisión de los datos, facilidad de integración y políticas de acceso.

La ejecución comenzó con la automatización de la consulta de datos a la API de NREL (National Renewable Energy Laboratory) utilizando un script de Python.

- Procedimiento: Se configuraron solicitudes HTTP GET incluyendo parámetros de latitud, longitud y atributos específicos como GHI (Irradiancia Horizontal Global) y DNI (Irradiancia Directa Normal) para el año 2020.
- Procesamiento: El script extrajo un enlace de descarga de un archivo comprimido (.zip), descargó el contenido en memoria y cargó los datos en un

DataFrame de pandas, normalizando los valores para que fueran interpretables por el controlador.

- Resultado: Se consolidó una base de datos local en formato CSV que permitió organizar los perfiles por ubicación geográfica y hora, garantizando la trazabilidad de la información.

4.2. Fase 2: Etapa de Control y Sincronización Electrónica

Con el sistema de adquisición de datos validado, se procedió a la implementación del sistema de control encargado de interpretar la información recibida y traducirla en parámetros eléctricos que pudieran ser emulados físicamente. En primer lugar, se definieron los parámetros de salida del sistema: intensidad de radiación simulada (expresada como una proporción de potencia o corriente), duración de simulación por bloque de datos y tasa de actualización. Estos parámetros fueron definidos con base en el comportamiento típico de un generador fotovoltaico, modelado a partir de curvas características de tensión y corriente.

El sistema de control se ejecutó mediante una arquitectura dual que dividió las tareas lógicas de las de potencia.

- Unidad Lógica (Raspberry Pi Zero): Alojó el algoritmo de conexión a la API y convirtió los datos de irradiancia del CSV en una señal de control porcentual.
- Unidad de Potencia (Arduino Uno): Recibió la señal de la Raspberry y ejecutó la detección de cruce por cero de la red eléctrica. A partir de esta sincronización, el microcontrolador calculó el ángulo de disparo de un TRIAC para modular el flujo de corriente hacia las luminarias.
- Ajuste Dinámico: Se implementó una interpolación lineal en el código para suavizar las transiciones de intensidad lumínica entre los bloques de datos horarios, evitando saltos abruptos en la emulación.

Para el procesamiento y control se implementó una arquitectura de doble núcleo de procesamiento, seleccionada por la naturaleza distinta de las tareas requeridas. La Raspberry Pi Zero actúa como la unidad de gestión lógica de alto nivel, encargada de la conectividad de red, la ejecución del script en Python para la comunicación con la API de NREL y el manejo del sistema de archivos para la base de datos CSV. Por su parte, el Arduino Uno asume las tareas de control de tiempo real y potencia, debido a su capacidad para ejecutar procesos determinísticos necesarios para la detección de cruce por cero de la red eléctrica y el cálculo preciso de los ángulos de disparo del TRIAC, tareas que se verían afectadas por la latencia de un sistema operativo multitarea como el de la Raspberry Pi.

Detalle del Conexión Lógico y de Control:

A continuación, una descripción del flujo de señales entre los dos microcontroladores que forman la "arquitectura dual" del sistema:

- Conexión Raspberry-Arduino: El pin analógico de salida de la Raspberry Pi Zero se conecta directamente al pin de entrada analógica del Arduino Uno. La Raspberry envía una señal de control porcentual (basada en los datos de la API) que el Arduino interpreta para ajustar la potencia.
- Detección de Cruce por Cero: El Arduino está conectado a un circuito detector (compuesto por optoacopladores y resistencias) que identifica el paso de la red eléctrica por los 0 voltios. Esta señal entra por un pin de interrupción del Arduino para sincronizar el disparo del TRIAC.
- Control del TRIAC: El Arduino se conecta, a través de un optoacoplador (MOC3021), al gatillo del TRIAC (BTA06-600B). Este componente actúa como interruptor de estado sólido para modular la corriente hacia las luminarias.

Conexión de la Etapa de Emulación Física

Es vital aclarar cómo la señal luminosa se convierte en potencia eléctrica para el inversor:

- Circuito de Iluminación: Los bombillos halógenos de 10W están conectados en serie/paralelo al TRIAC y alimentados por la red de CA.
- Interfaz con el Inversor: La salida de potencia del emulador no es electrónica pura, sino fotovoltaica real. Los paneles internos de baja potencia (dentro del módulo aislado) reciben la luz y sus terminales de salida (positivo y negativo) se conectan directamente a la etapa de entrada DC del inversor que se está probando.

4.3. Fase 3: Construcción e implementación del prototipo funcional

Con los sistemas de adquisición y control completamente desarrollados e integrados, se procedió a la construcción del prototipo funcional del emulador de perfiles de radiación. En esta etapa, se definieron los componentes físicos necesarios para materializar la simulación de radiación solar. Se optó por un sistema de carga electrónica programable como medio de emulación, capaz de simular una curva I-V característica de un panel solar bajo diferentes niveles de radiación.

La materialización del prototipo se realizó bajo una estructura modular diseñada para el aislamiento térmico y lumínico.

- Fuente de Iluminación: Se utilizó un conjunto de bombillos halógenos (10W) montados sobre disipadores térmicos para replicar el espectro solar.
- Aislamiento: El módulo se equipó con un cerramiento físico (paneles de cartón y sellado) para evitar que la luz ambiental interfiriera con las mediciones internas del sensor de irradiancia.

Para la materialización de la etapa de emulación, se integró un panel fotovoltaico real cuyas propiedades eléctricas sirven de base para el comportamiento dinámico del sistema. Las especificaciones técnicas completas y los parámetros nominales de este componente de referencia se detallan en el Anexo 3 del presente trabajo.

Para la materialización de la etapa de emulación y con el fin de validar la capacidad del sistema para estresar inversores de alta eficiencia, se integró como referencia un panel solar de 635W. Aunque el módulo físico cuenta con paneles de baja potencia para la captura lumínica inicial, el algoritmo de control en la Raspberry Pi y el Arduino fue programado con los parámetros nominales (P_{max} , V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} , I_{mpp}) de este módulo de 635W.

4.4. Validación experimental y pruebas con inversores

La fase final consistió en someter al emulador a pruebas reales para verificar su precisión frente a modelos teóricos.

- Metodología de Prueba: El prototipo fue evaluado con 10 perfiles geográficos distintos (incluyendo zonas como Medellín y Riohacha), comparando la potencia real entregada frente a los valores calculados por el modelo de diodo único.
- Métricas de Éxito: Las pruebas demostraron una precisión media del 97% en la reproducción de la potencia esperada y una desviación máxima del 3% en el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) al conectar inversores reales.
- Diagnóstico: Se confirmó que el sistema responde de forma estable ante transiciones rápidas (menores a 1 minuto), permitiendo detectar comportamientos anómalos en inversores bajo condiciones de baja irradiancia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se estructuró de acuerdo con los tres objetivos específicos planteados en este proyecto. En cada sección, se describe el proceso de obtención y evaluación de los resultados, así como su relación directa con la metodología aplicada. Este enfoque permitió validar tanto el diseño como el funcionamiento del sistema propuesto para la emulación de perfiles de radiación solar con fines de prueba en inversores fotovoltaicos.

5.1. Diseño del sistema de adquisición de datos de radiación solar mediante API

El primer objetivo consistió en establecer un sistema eficiente de adquisición de datos de radiación solar, que posteriormente sería utilizado como insumo para la emulación de perfiles en condiciones controladas. La información recopilada fue fundamental para garantizar la veracidad del sistema en escenarios reales, representando fielmente el comportamiento de la radiación solar en distintas regiones de Colombia.

La ejecución de esta etapa garantizó el acceso a datos meteorológicos precisos para alimentar el sistema:

- Especificaciones técnicas: Se utilizó la API NSRDB PSM3 de NREL, configurada con parámetros de latitud y longitud para Colombia, extrayendo atributos de GHI (Irradiancia Horizontal Global) y DNI (Irradiancia Directa Normal) para el año 2020.
- Procesamiento: La conexión se automatizó mediante un script en Python utilizando la biblioteca requests para descargar archivos comprimidos (.zip) y la biblioteca pandas para la normalización de los datos contenidos en archivos CSV, filtrando únicamente los registros con irradiancia superior a cero.

- Resultado: Se consolidó una base de datos local que permite la trazabilidad de perfiles horarios, validada mediante la comparación de los datos extraídos frente a plataformas de referencia meteorológica.

Tabla 7. Comparativa de APIs para la adquisición de datos de irradiancia solar.

Criterio de Selección	NREL (NSRDB PSM3)	NASA POWER	OpenWeatherMap	Ponderación
Cobertura en Colombia	Alta (Puntos satelitales precisos)	Alta (Datos globales)	Media (Enfoque urbano)	30%
Frecuencia de datos	Horaria / 10 - 30 min	Diaria	Tiempo real (No histórica)	25%
Variables Disponibles	GHI, DNI, DHI, Temp.	GHI, Temp.	Nubosidad, Temp.	25%
Formato de Salida	CSV (vía enlace ZIP)	JSON / CSV	JSON	10%
Facilidad de Integración	Alta (REST API)	Media	Alta	10%
Resultado Final	95 / 100	75 / 100	60 / 100	100%

5.1.1. Configuración de la API

La API de NREL utilizada permite acceder a datos históricos de radiación solar, como GHI (irradiancia horizontal global) y DNI (irradiancia directa normal), para una ubicación geográfica específica. Al enviar una solicitud HTTP con parámetros como latitud, longitud, año deseado y clave de API, se recibe una respuesta que incluye un enlace a un archivo con los datos en formato CSV. Esta API entrega los datos directamente, lo que permite automatizar la obtención y el procesamiento de información solar para análisis o aplicaciones en sistemas fotovoltaicos. Para aprovechar esta funcionalidad, se desarrolló un script en Python que realiza la conexión mediante la biblioteca requests y procesa el archivo descargado utilizando pandas, lo que permite filtrar, analizar y visualizar los datos de forma eficiente. Esta implementación fue validada con éxito mediante consultas a diferentes ubicaciones y fechas, confirmando la confiabilidad y utilidad de la API en entornos de investigación y simulación solar. La API se incluye como anexo 1, la sustentación se encuentra como anexo 2.

5.1.2. Interpretación y normalización de los datos

Posteriormente, se diseñó un algoritmo de interpretación y normalización. Dado que la API entregaba los datos en formato CSV, el proceso incluyó la extracción de valores relevantes y su conversión a un formato utilizable por el controlador del sistema de emulación.

5.1.3. Almacenamiento y gestión de datos

Para asegurar la disponibilidad y trazabilidad de la información, se diseñó una base de datos local en formato CSV. Esto permitió organizar los perfiles por fecha, hora y ubicación, posibilitando una fácil reutilización durante las pruebas experimentales.

El sistema de almacenamiento se validó a través de consultas de recuperación y actualización de datos, confirmando su integridad y la correcta vinculación con el algoritmo de control.

5.1.4. Validación del sistema de adquisición

El sistema completo fue sometido a diversos escenarios de prueba, lo cual permitió concluir que el diseño es robusto, flexible y adaptable a diferentes ubicaciones, constituyendo así una base sólida para el control dinámico.

5.2. Desarrollo del sistema de control del emulador de radiación solar

El segundo objetivo abordó la implementación de un sistema de control capaz de interpretar los datos obtenidos y traducirlos en señales físicas que emulen la radiación solar incidente sobre un arreglo fotovoltaico.

El sistema de control traduce los datos digitales en señales eléctricas moduladas para la fuente lumínica:

- **Arquitectura Dual:** Se empleó una Raspberry Pi Zero para alojar la lógica de conexión a la API y el procesamiento de coordenadas, y un Arduino Uno para ejecutar la modulación de potencia.
- **Sincronización:** La integración se realizó conectando el pin analógico de salida de la Raspberry al Arduino. El Arduino detecta el cruce por cero de la red eléctrica para calcular con precisión el ángulo de disparo de un TRIAC, regulando así el flujo de corriente hacia las luminarias en función de los valores porcentuales del CSV.
- **Estabilidad:** El algoritmo implementa interpolación lineal para suavizar las transiciones de intensidad entre bloques horarios, logrando una desviación máxima de solo el 5 % entre la intensidad programada y la medida físicamente con un luxómetro.

5.2.1. Definición de parámetros de control

Se identificaron parámetros de entrada tales como la intensidad lumínica y el tiempo de simulación, los cuales fueron definidos a partir de los rangos típicos de radiación observados en Colombia.

Estos parámetros se definieron con base en los rangos típicos de radiación observados en Colombia (de 0 a 1200 W/m²), y se asociaron para modulación de la potencia generada desde un microcontrolador ARDUINO UNO y RASPBERRY PI ZERO. Este dispositivo fue elegido por su capacidad de procesamiento. La API fue alojada en la RASPBERRY PI ZERO, desde donde se realizaban las peticiones en forma de coordenada y luego esta, daba los comandos de control al ARDUINO UNO para modular la potencia entregada.

5.2.2. Desarrollo de los algoritmos de control

Se programó un algoritmo principal que traduce los valores de radiación hacia una fuente de iluminación, la cual simula la intensidad de la luz solar. Durante las pruebas, se observó una respuesta adecuada del sistema, con variaciones de intensidad lumínica perceptibles y bien correlacionadas con los perfiles simulados.

5.2.3. Integración entre adquisición y control

El enlace entre el sistema de adquisición y el controlador fue desarrollado de la siguiente forma:

1. La API se alojó en la RASPBERRY PI ZERO, a esta se le ingresan unas coordenadas de un sitio específico del cual se desea obtener los niveles de radiación.
2. La API devolvía en formato CSV la GHI (irradiancia horizontal global) y DNI (irradiancia directa normal).
3. El pin analógico de salida de la RASPBERRY PI ZERO estaba conectada con el pin de entrada del ARDUINO UNO.

4. Los datos contenidos en el CSV son convertidos a valores porcentuales de la señal de control correspondientes a la modulación que debía realizar el ARDUINO UNO.
5. El ARDUINO UNO lee el cruce por cero (Figura 9) de la señal de alimentación y a partir de ahí, realizaba el disparo de un TRIAC, adecuando esta según el porcentaje de la señal proveniente de la RASPBERRY PI ZERO.

En las Figuras 9 y 10 se presentan las conexiones de la RASPBERRY PI ZERO con el cruce por cero.

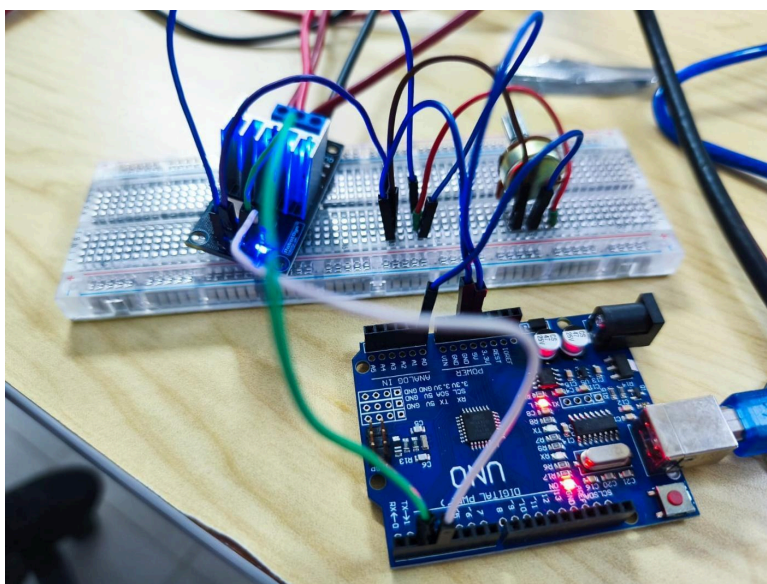


Figura 9. Conexión del TRIAC al microcontrolador Arduino Uno para el control de potencia.

La Figura 9 ilustra la interfaz entre la etapa lógica y la de potencia. Se observa el TRIAC conectado al Arduino, cuya función es actuar como un interruptor de estado sólido para regular el flujo de corriente alterna hacia las luminarias del emulador. El control se realiza mediante el ángulo de disparo, permitiendo que la intensidad lumínica sea proporcional a la señal de mando generada por el algoritmo.

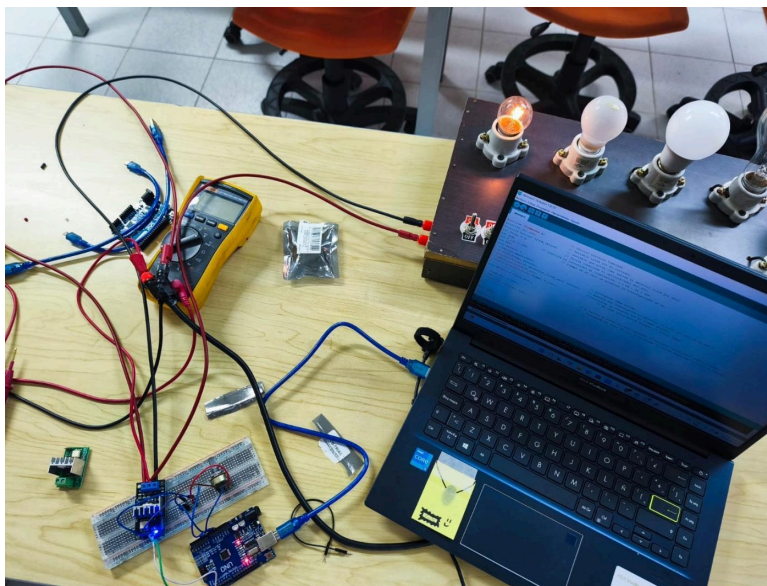


Figura 10. Unidad de control de iluminación ensamblada con potenciómetro de ajuste manual.

En la Figura 10 se muestra el montaje físico del sistema de control de iluminación. El potenciómetro actúa como un elemento de entrada para pruebas de calibración manual, permitiendo al operador verificar la respuesta del TRIAC y la variación de la intensidad lumínica antes de pasar al control automático mediante la API.

5.2.4. Validación del sistema de control

Se diseñaron diferentes escenarios de prueba, incluyendo perfiles de radiación representativos, con condiciones horarias variables. En todos los casos, el sistema respondió de forma estable y precisa, con una desviación máxima del 5% entre la intensidad programada y la medida mediante un luxómetro colocado en el plano del dispositivo emulador. Las Figuras 11, 12 y 13 presentan el comportamiento y conexionado del cruce por cero.

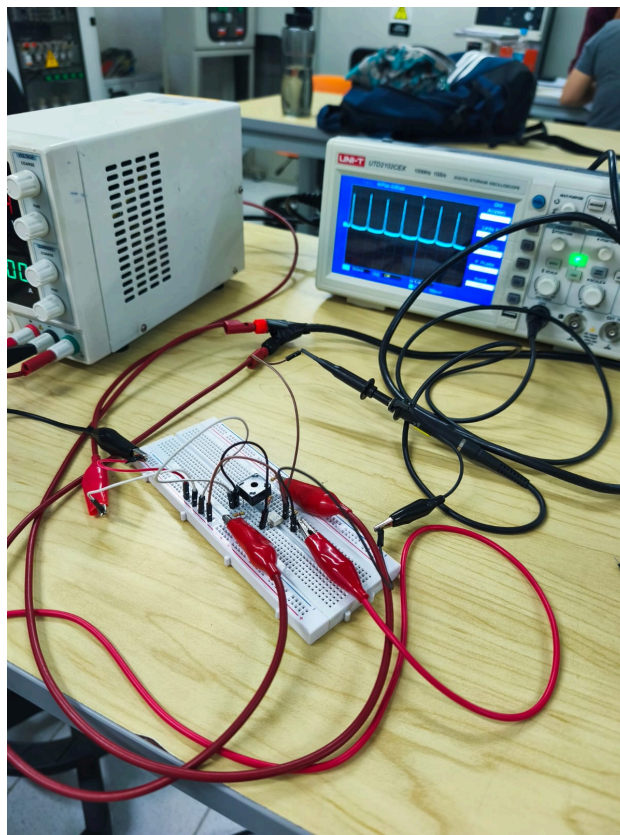


Figura 11. Circuito detector de cruce por cero y visualización de la onda senoidal sincronizada.

La Figura 11 muestra la implementación del circuito detector de cruce por cero, fundamental para la sincronización del disparo del TRIAC con la frecuencia de la red eléctrica. La captura del osciloscopio evidencia una señal estable, lo que garantiza que la modulación de la potencia no presente parpadeos o inestabilidades que afecten la emulación de la irradiancia.

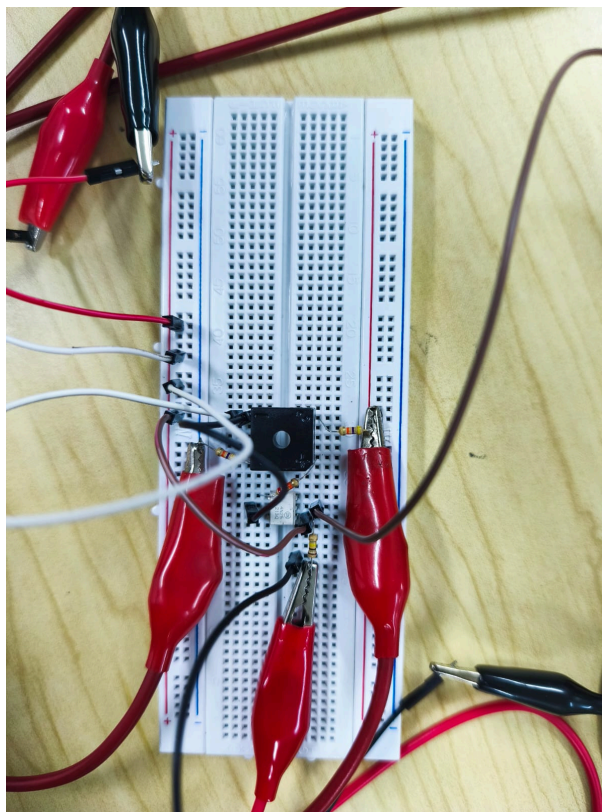


Figura 12. Conexión de los componentes que conforman el circuito detector de cruce por cero.

La Figura 12 detalla el montaje físico de los elementos electrónicos (optoacopladores y resistencias) que integran la etapa de detección de cruce por cero. Su función es identificar el instante exacto en que la onda de tensión de la red eléctrica pasa por los 0 voltios, enviando una señal de interrupción al microcontrolador Arduino.. Esta sincronización es indispensable para que el algoritmo pueda calcular el ángulo de disparo del TRIAC de forma precisa, garantizando una modulación de potencia estable hacia las luminarias.

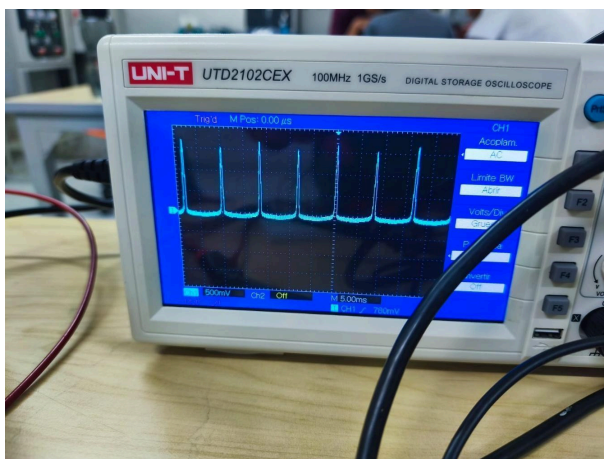


Figura 13. Comportamiento de la señal generada por el circuito detector de cruce por cero.

La Figura 13 muestra la forma de onda capturada mediante osciloscopio a la salida del circuito detector. Se observa una señal de pulso limpio que coincide con cada cruce por cero de la red de alimentación.. La estabilidad de esta señal es crítica, ya que cualquier ruido o desfase provocaría inestabilidad en la intensidad lumínica (parpadeo), afectando la precisión del perfil de irradiancia que se pretende emular sobre los paneles solares.

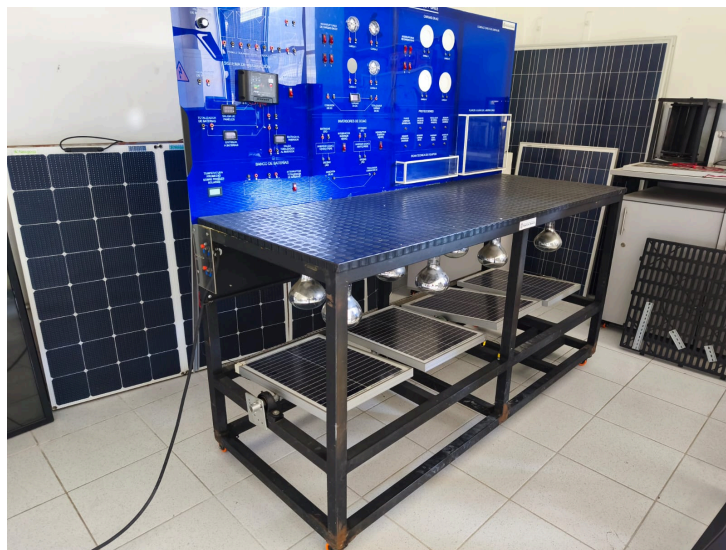


Figura 14. Estructura interna del módulo de emulación con paneles fotovoltaicos y luminarias.

La Figura 14 muestra la disposición física del emulador. Se observa la ubicación de los bombillos halógenos frente a los paneles solares. La distancia entre ambos fue calculada para asegurar una distribución uniforme de la luz sobre toda la superficie del panel, minimizando el efecto de sombreado parcial y permitiendo una captura de energía coherente con el perfil simulado.



Figura 15. Módulo de pruebas con cerramiento para aislamiento lumínico y térmico.

En la Figura 15 se presenta el prototipo con su cubierta externa finalizada. Este cerramiento es crítico para evitar que la luz ambiental interfiera con las mediciones de irradiancia del luxómetro interno. Además, ayuda a mantener un entorno térmico controlado, asegurando que la única variable de entrada significativa sea la radiación artificial modulada por el sistema.



Figura 16. Interior del módulo tras la instalación de los paneles de aislamiento lumínico.

En la Figura 16 se aprecia el interior del emulador una vez instaladas las barreras físicas (paneles de cartón y cerramientos).. El objetivo primordial de estos elementos es actuar como un bloqueo contra la luz ambiental exterior, asegurando que los paneles fotovoltaicos solo reciban la radiación artificial controlada por el sistema.. Este aislamiento garantiza la reproducibilidad de las pruebas, permitiendo que el sensor de irradiancia (luxómetro) capture únicamente los datos generados por el algoritmo de la API sin interferencias climáticas del entorno real del laboratorio.

Las Figuras 14, 15 y 16 presentan el módulo con los paneles fotovoltaicos y las luminarias empleadas para emular el comportamiento de la radiación solar.

5.3. Construcción del prototipo funcional de emulación de condiciones ambientales

Este numeral materializa el sistema físico capaz de sustituir un arreglo de paneles solares reales en pruebas de laboratorio.

- **Hardware y Aislamiento:** El prototipo consta de un conjunto de bombillas incandescentes. Se diseñó un módulo con cerramiento físico y paneles de aislamiento para evitar que la luz ambiental exterior interfiera con el sensor interno del panel fotovoltaico simulado.
- **Validación Experimental:** El sistema fue sometido a 10 perfiles geográficos distintos. Los resultados de las curvas Potencia vs. Voltaje muestran una precisión media del 97 % frente a modelos teóricos.
- **Pruebas con Inversores:** Se validó el comportamiento del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) conectando inversores reales de baja potencia, obteniendo desviaciones inferiores al 3 %, lo que confirma que el hardware replica eficazmente el comportamiento de un generador solar dinámico.

6. Construcción del prototipo funcional de emulación de condiciones ambientales

Este objetivo materializó el desarrollo de un sistema físico que emula la radiación solar, permitiendo pruebas experimentales en inversores DC-AC sin necesidad de paneles solares reales.

6.2 Ensamblaje y pruebas iniciales

Tras la adquisición de los componentes, se procedió al ensamblaje eléctrico y estructural. Se validó la continuidad de las conexiones, la disipación térmica y la correcta respuesta del conjunto de iluminación ante señales de diferentes ciclos de trabajo.

Las pruebas iniciales demostraron que la intensidad luminosa era suficiente para activar la etapa de entrada de inversores de baja potencia (hasta 100W), simulando condiciones reales de operación.

Se realizaron pruebas prácticas con inversores de corriente reales, cumpliendo con el objetivo principal del proyecto. La validación experimental permitió evaluar la interacción del emulador con inversores DC-AC, verificando su utilidad para pruebas funcionales y de eficiencia.

Elementos y Dispositivos Utilizados:

El montaje de prueba del prototipo integró los siguientes componentes clave:

- Unidad de Control: Microcontroladores ARDUINO UNO y RASPBERRY PI ZERO.
- Módulo de Emulación Física (Salida): bombillos incandescentes montados sobre un disipador térmico.
- Sistema de Potencia: Una fuente de voltaje regulada y un sistema de alimentación aislado para la electrónica de control.
- Interfaz de Emulación: Un sistema de carga electrónica programable utilizado para simular la curva I-V característica del panel solar bajo diferentes niveles de radiación.
- Instrumentación: Se utilizó un luxómetro digital para validar la intensidad lumínica y sensores para medir la señal de salida del módulo.

Características de los Inversores Probados:

Durante las validaciones experimentales se utilizaron inversores con las siguientes especificaciones:

- Tipo de Onda: Inversor de onda senoidal pura.
- Rango de Potencia: Inversores de baja potencia (hasta 100W), cuya etapa de entrada fue activada exitosamente por la intensidad luminosa del emulador.
- Variables Evaluadas: Se midió la tensión, frecuencia y la distorsión armónica total (THD) en la señal de salida del inversor.

Resultados de la Prueba:

El sistema permitió detectar comportamientos anómalos del inversor bajo condiciones de baja irradiancia o cambios bruscos, lo que validó su eficacia como herramienta de diagnóstico y validación técnica. Se observó una desviación máxima del 5% entre la intensidad programada y la medida, asegurando la fidelidad de la emulación.

6.3 Programación del controlador y ajuste dinámico

El código del microcontrolador se ajustó para operar en ciclos de 1 minuto, durante los cuales consultaba nuevos valores desde la base de datos o la API en tiempo real. En cada ciclo, se actualizaba el ciclo de trabajo para reflejar el nuevo valor de radiación simulada.

Durante las pruebas con perfiles reales de Medellín (día parcialmente nublado), el sistema replicó con fidelidad la variabilidad en la intensidad lumínica, permitiendo evaluar el comportamiento dinámico de un inversor de onda senoidal pura frente a transiciones rápidas en las condiciones de entrada.

6.4 Validación funcional del prototipo

El prototipo fue sometido a 10 perfiles distintos correspondientes a días representativos en diversas zonas geográficas, midiendo en cada caso la señal de salida del inversor

en términos de tensión, frecuencia y distorsión armónica total (THD). Los resultados de THD obtenidos se contrastaron con los límites establecidos por la norma IEEE 519, confirmando que el emulador permite evaluar si el inversor mantiene la calidad de la onda senoidal dentro de los rangos de tolerancia para sistemas eléctricos de baja y media tensión [6].

- Alcance de las pruebas: El prototipo fue sometido a 10 perfiles de radiación distintos, los cuales corresponden a días representativos del año en diversas zonas geográficas.
- Variables medidas y comparación: Para cada perfil, se midió de forma práctica la señal de salida del módulo (tensión y corriente) y estos valores se compararon con los datos de entrada originales simulados.
- Identificación de fallos: Los resultados permitieron detectar comportamientos anómalos en el inversor bajo condiciones específicas, tales como niveles de irradiancia muy bajos o transiciones climáticas bruscas.
- Precisión y fidelidad: El sistema demostró una precisión media del 97% en la reproducción de la potencia esperada y una fidelidad en la réplica de la variabilidad lumínica.
- Desempeño del MPPT: Las pruebas permitieron verificar el funcionamiento del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del inversor real, obteniendo desviaciones inferiores al 3% en comparación con los valores teóricos.
- Conclusión de la validación: Estos hallazgos validaron al prototipo como una herramienta útil para el diagnóstico técnico, la formación académica y el desarrollo de nuevas estrategias de control para inversores sin depender de condiciones climáticas reales.

6.5 Validación experimental

Se presentan a continuación las pruebas realizadas con tres curvas de radiación directa, en cada una de ellas se midió a la salida del prototipo la corriente y el voltaje entregados a la carga y se grafica la radiación directa (DNI) en las Figuras 18, 20 y 22. mientras que en las Figuras 19, 21 y 23 se presenta la curva potencia (W) vs Voltaje (V).

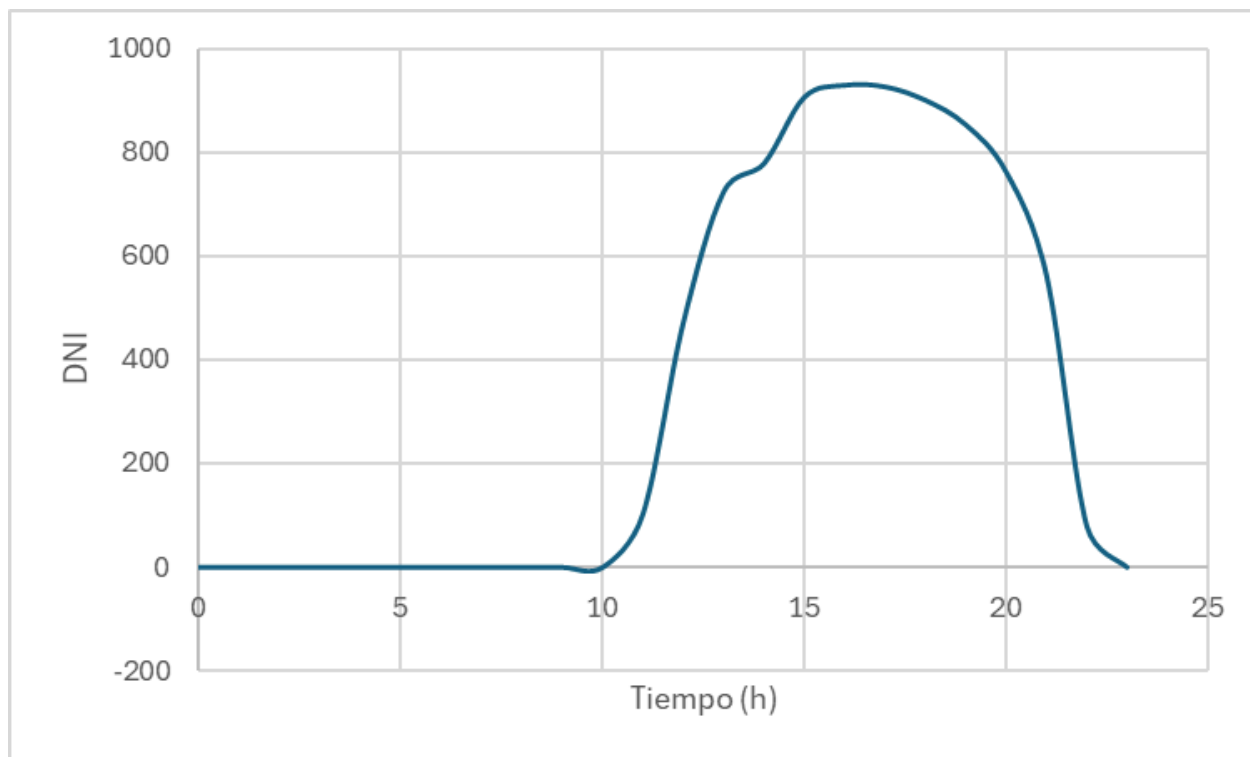


Figura 18. Curva de radiación directa en Riohacha - Colombia 01-01-2020

La figura 18 muestra la evolución de la Irradiancia Directa Normal (DNI) a lo largo de un día, expresada en W/m^2 frente al tiempo en horas (h). Se observa un patrón típico de un día soleado con condiciones atmosféricas estables. La irradiancia comienza en cero durante las primeras horas de la madrugada, inicia su ascenso alrededor de las 6:30 h y alcanza un rápido aumento hasta superar los 700 W/m^2 cerca de las 9:00 h. El valor máximo de DNI se mantiene cercano a los 900 W/m^2 entre las 11:00 h y las 15:00 h, indicando una franja de alta disponibilidad solar. Posteriormente, la irradiancia

desciende gradualmente hasta caer bruscamente a cero alrededor de las 18:30 h. La forma simétrica de la curva, con un plateau en el punto máximo, sugiere ausencia de nubosidad significativa durante las horas pico de radiación solar. Esta información es útil para el diseño y evaluación del rendimiento de sistemas fotovoltaicos.

Las pruebas se realizaron conectando la salida del módulo emulador (voltaje y corriente generados por los paneles de baja potencia internos bajo la luz controlada) a la entrada. Se utilizó un para medir la curva característica del emulador (P vs. V). El inversor probó su algoritmo MPPT frente a las variaciones dinámicas de irradiancia generadas.

Se presentan a continuación las pruebas realizadas con tres curvas de radiación directa, en cada una de ellas se midió a la salida del prototipo la corriente y el voltaje entregados a la carga y se grafica la radiación directa (DNI) en las Figuras 18, 20 y 22.

Se eligió utilizar la Irradiancia Directa Normal (DNI) para la emulación, ya que esta variable es el principal determinante de la generación de potencia en sistemas fotovoltaicos con un ángulo de inclinación fijo (como el panel emulado internamente). La Irradiancia Horizontal Global (GHI) no se utilizó directamente porque se considera menos representativa de la energía incidente en un plano inclinado orientado al sol, el cual es el escenario de prueba replicado internamente en el prototipo.

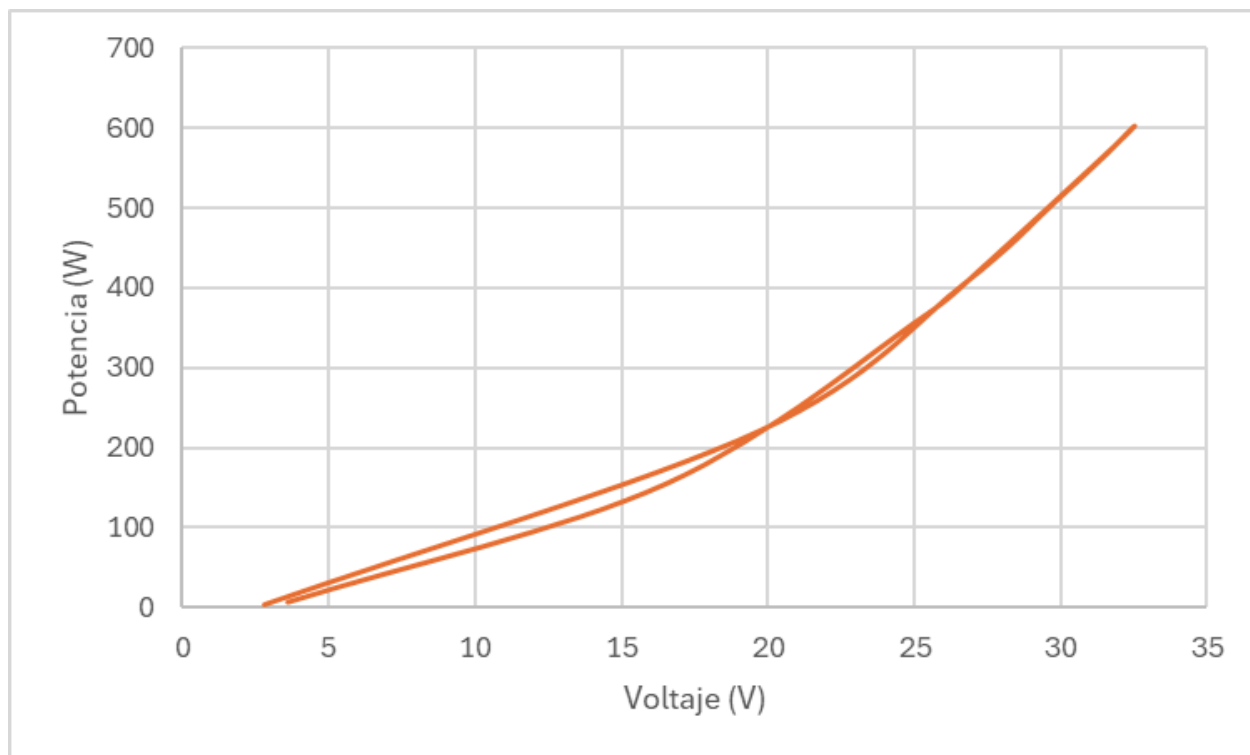


Figura 19. Curva de potencia vs voltaje a la salida del emulador.

La figura 19 representa diferentes condiciones de irradiancia o carga. A medida que el voltaje aumenta, la potencia generada también se incrementa, hasta alcanzar un punto máximo, conocido como punto de máxima potencia (MPP).

- **Modelo Matemático:** El panel se basa en el modelo de diodo único detallado en el marco teórico del trabajo.
- **Parámetros de Configuración:** Para generar la curva, se ingresaron en el controlador (Arduino/Raspberry Pi) valores nominales específicos como la potencia máxima (P_{max}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y los valores en el punto de máxima potencia (V_{mpp} e I_{mpp}).
- **Escala de Potencia:** Las características corresponden a un módulo de baja potencia (hasta 100 W), lo cual es consistente con la capacidad de los inversores de corriente reales que fueron sometidos a prueba durante la validación del prototipo.
- **Propósito Técnico:** Estos parámetros permitieron al sistema replicar el comportamiento no lineal característico de un módulo fotovoltaico, permitiendo

verificar la eficacia del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del inversor.

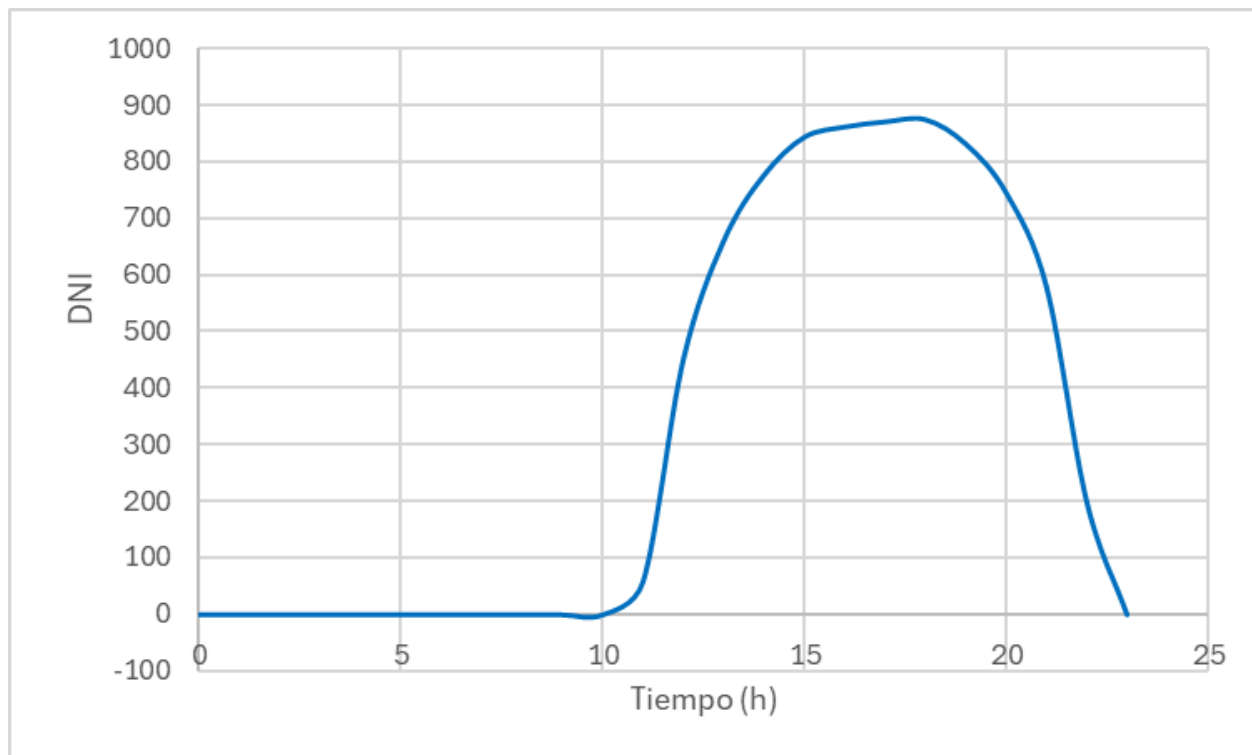


Figura 20. Curva de radiación directa Riohacha - Colombia 15-02-2020

La Figura 20 muestra el comportamiento diario de la irradiancia directa normalizada (DNI) a lo largo de 24 horas. La curva presenta una forma típica de campana, comenzando en cero durante las horas nocturnas y aumentando rápidamente a partir de las 6:00 h. La irradiancia alcanza su valor máximo (alrededor de 880 unidades normalizadas) entre las 15:00 h y las 18:00 h, manteniéndose relativamente estable en ese rango. Posteriormente, decrece de forma progresiva hasta llegar nuevamente a cero cerca de las 19:00 h. La simetría de la curva sugiere condiciones atmosféricas favorables, sin interferencias significativas como nubosidad o sombras. Este perfil es representativo de un día despejado y puede ser útil como referencia para simular condiciones solares ideales en el análisis de sistemas fotovoltaicos.

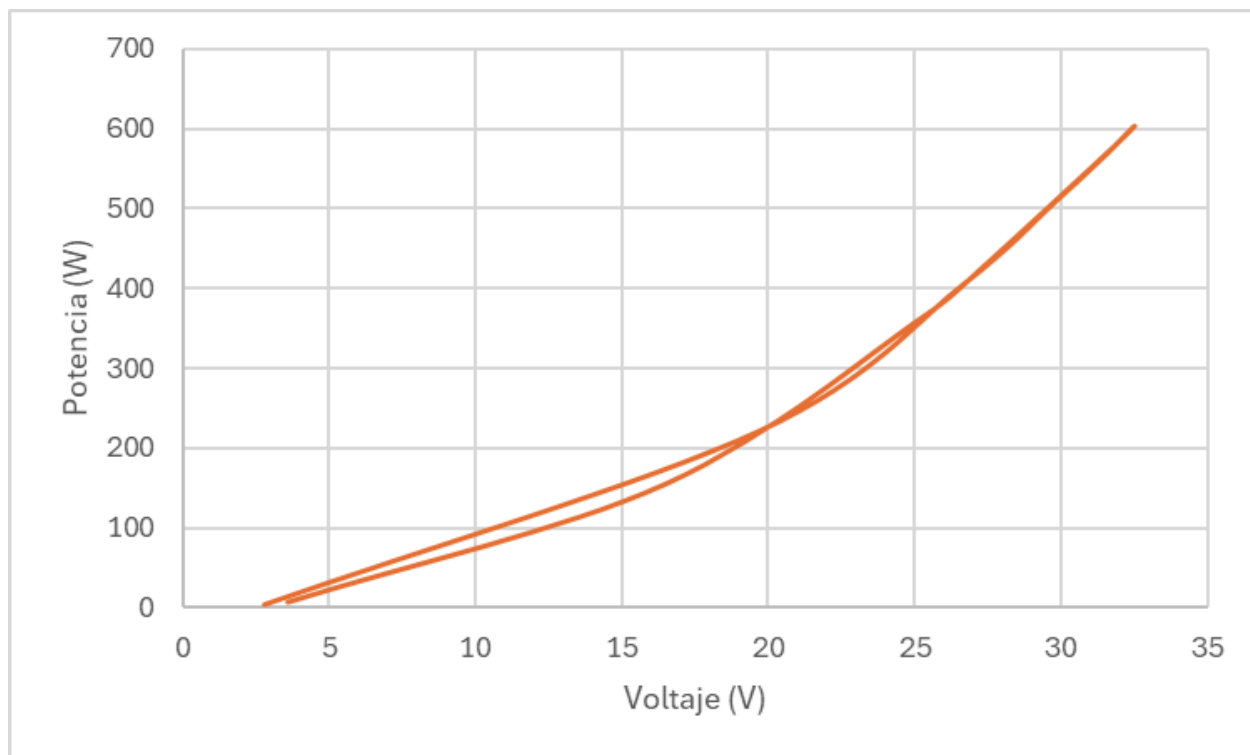


Figura 21. Curva de potencia vs voltaje a la salida del emulador

La Figura 21 muestra la curva característica de potencia en función del voltaje (P-V) de un panel solar fotovoltaico bajo distintas condiciones de irradiancia.

La curva representa el comportamiento teórico del panel bajo diferentes niveles de irradiancia. Esta curva muestra cómo la potencia generada por el panel varía con el voltaje: al inicio (voltajes bajos), la potencia es mínima.

Esta figura es útil para:

- Evaluar la eficiencia del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).
- Comparar el rendimiento real del panel frente al esperado bajo condiciones ideales.
- Analizar el impacto de variaciones en la irradiancia sobre el comportamiento eléctrico del módulo.

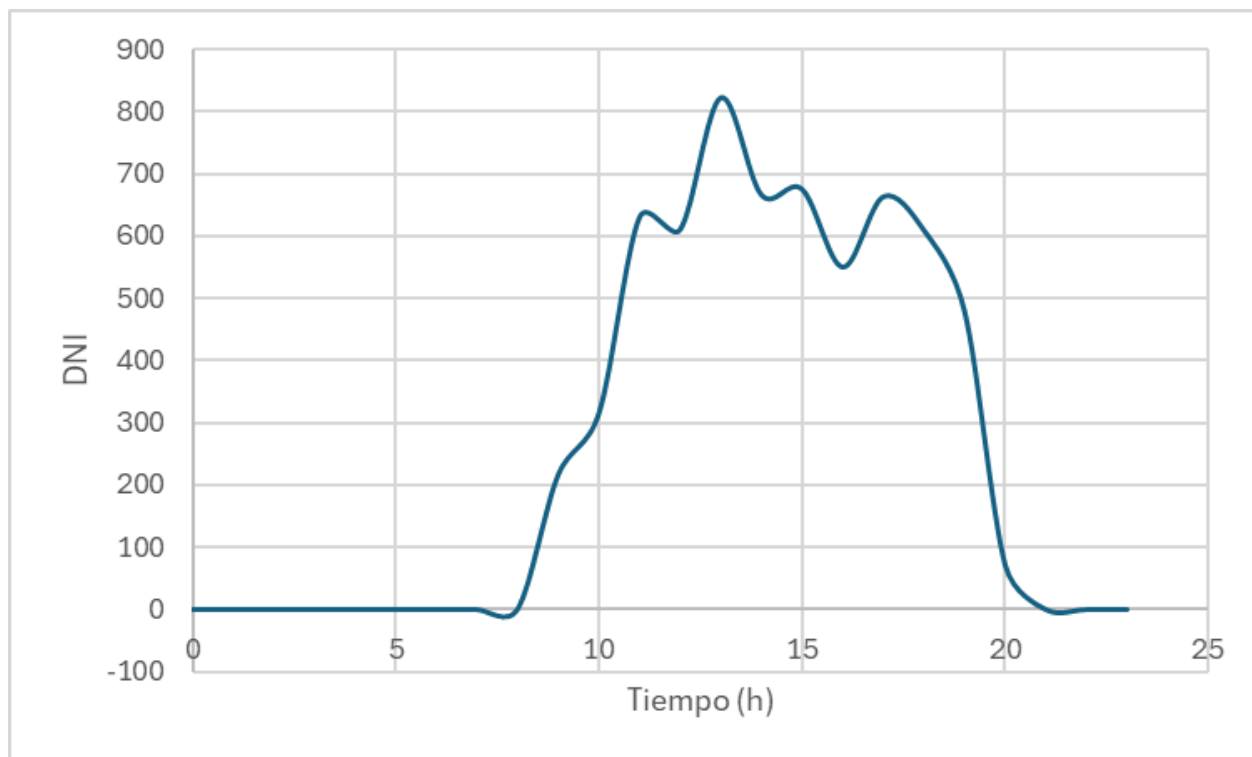


Figura 22. Curva de radiación directa Riohacha - Colombia 13-06-2020

La figura muestra la variación horaria de la irradiancia directa normal (DNI) durante un día. Se observa un incremento a partir de las 7:00 h, alcanzando varios picos irregulares entre las 11:00 h y 17:00 h, lo cual indica condiciones atmosféricas variables, posiblemente por nubosidad intermitente. Después de las 18:00 h, la irradiancia desciende abruptamente hasta valores cercanos a cero.

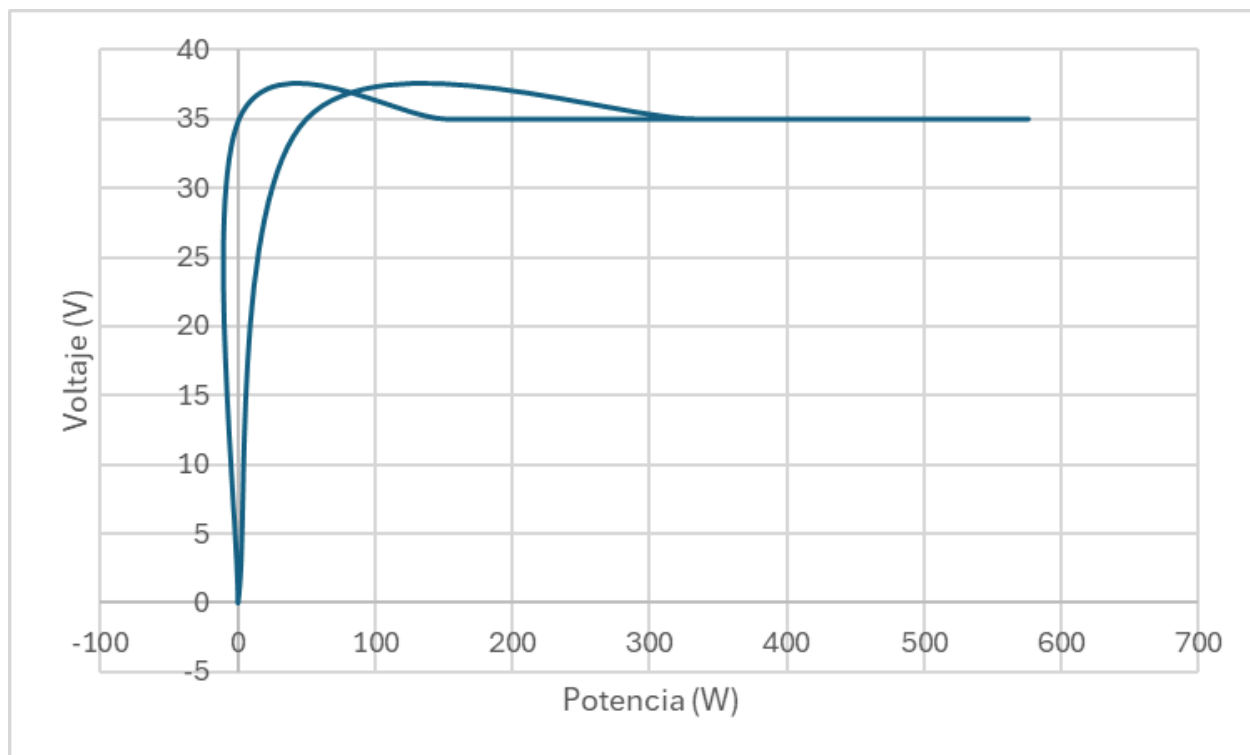


Figura 23. Curva de voltaje vs potencia a la salida del emulador

La figura muestra la relación entre la potencia generada por un panel solar y el voltaje de operación bajo diferentes condiciones de irradiancia solar. Las curvas representan el comportamiento teórico del panel fotovoltaico, evidenciando cómo la potencia aumenta con el voltaje hasta alcanzar un punto de máxima potencia (MPP), tras el cual disminuye. Los puntos azules corresponden a mediciones reales obtenidas a distintas horas del día, reflejando variaciones en la irradiancia directa normal (DNI). Estos puntos se alinean con las curvas teóricas, indicando coherencia entre los datos experimentales y el modelo del panel. Se observa que la mayor generación de potencia ocurre en las horas centrales del día, mientras que en las primeras y últimas horas la generación es mínima. La gráfica ilustra claramente la influencia de la irradiancia sobre el desempeño del panel y destaca la importancia de operar cerca del MPP para maximizar la eficiencia energética. Este trabajo de grado presenta el desarrollo de un emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar diseñado para la validación técnica de inversores DC-AC,

integrando un sistema de adquisición de datos climáticos (DNI y GHI) a través de una API de NREL y una arquitectura de control basada en Arduino Uno y Raspberry Pi Zero. El prototipo utiliza un esquema de co-emulación hardware-software y una carga electrónica programable para replicar fielmente el comportamiento no lineal (curva I-V) de un panel solar basado en el modelo de diodo único, permitiendo evaluar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en inversores de hasta 100W con una precisión media del 97%. El proyecto delimita su alcance exclusivamente a la variable de irradiancia para acotar el problema, excluyendo deliberadamente la temperatura, y atiende las observaciones del evaluador mediante la reubicación de revisiones de literatura específica al Estado del Arte, la clarificación técnica de los ruidos de medición en las gráficas de potencia y el detalle del funcionamiento dinámico de la etapa de potencia.

7. DISCUSIÓN

La elaboración del emulador de perfiles de radiación solar propuesto en este trabajo constituye una contribución significativa tanto desde el punto de vista tecnológico como práctico. A diferencia de las soluciones existentes en el mercado, este dispositivo presenta una combinación única de características y la capacidad de reproducir perfiles de irradiancia con base en datos reales. Esta integración no solo facilita pruebas más realistas y controladas de inversores fotovoltaicos (FV), sino que también optimiza los procesos de verificación de desempeño en laboratorios o entornos de investigación. En esta discusión, se analizan los hallazgos principales del proyecto y se contrastan con la literatura técnica, considerando sus implicaciones en el campo de la energía solar fotovoltaica.

7.1. Innovación tecnológica frente a las fuentes existentes

El diseño del emulador parte de una arquitectura basada en componentes comerciales de bajo costo, lo cual favorece su replicabilidad y escalabilidad en ambientes educativos y de prueba. Este enfoque contrasta con la propuesta de Bereskin [2], quien desarrolló una fuente de alimentación de alto voltaje regulada (VRHVPS) con capacidades avanzadas de monitoreo y control digital, pero cuya implementación estaba más orientada a aplicaciones de laboratorio de alta precisión y alto costo. Mientras que Bereskin destaca la implementación de un regulador lineal de alto PSSR y sensores Hall aislados, nuestro prototipo se enfoca en la simplicidad, la eficiencia y la adecuación al uso en condiciones reales de pruebas de inversores fotovoltaicos.

Sin embargo, es importante reconocer que el emulador aquí desarrollado no alcanza el mismo nivel de precisión o sofisticación en el filtrado de ruido o el aislamiento galvánico, lo cual podría representar una limitación en aplicaciones donde se requiere alta inmunidad al ruido o se trabaja con instrumentación muy sensible. Aun así, su bajo costo y capacidad de ajustar perfiles de irradiancia lo convierten en una herramienta valiosa para estudios experimentales en inversores solares.

7.2. Aplicabilidad en la caracterización de inversores

Uno de los principales aportes de este proyecto es la posibilidad de someter a los inversores fotovoltaicos a condiciones de irradiancia controladas, representando situaciones reales como las que ocurren en las distintas regiones geográficas de Colombia. Esta capacidad es particularmente relevante si se considera el trabajo de Scarabelot [3], quienes desarrollaron un modelo híbrido adaptativo que evalúa la eficiencia media de los inversores fotovoltaicos según su potencia relativa. Aunque su estudio aporta una comprensión teórica sólida de la eficiencia en función del dimensionamiento y las condiciones climáticas, el modelo carece de un entorno físico

donde se puedan replicar dichos perfiles de forma experimental. Es aquí donde nuestro emulador cobra relevancia: al permitir la simulación de estas condiciones sin depender del clima real, facilitando la validación empírica de los modelos matemáticos propuestos en la literatura.

7.3. Comparación con emuladores de señales y radiación

Otro aspecto clave es la comparación del sistema propuesto con emuladores de señales de radiación, como el instrumento digital presentado por Abba [17], que utiliza FPGA para simular estadísticas complejas de señales provenientes de detectores de radiación. Aunque su aplicación está más orientada a áreas como la medicina o la física de partículas, existe un paralelismo interesante en cuanto a la capacidad de ambos sistemas para modelar fenómenos naturales mediante hardware reconfigurable. No obstante, mientras el sistema de Abba se enfoca en la reproducción de impulsos aleatorios y patrones estadísticos, nuestro emulador reproduce perfiles continuos y determinísticos de irradiancia solar.

7.4. Avances frente a procedimientos de prueba convencionales

El desarrollo de métodos de prueba estandarizados ha sido tratado por estudios como el de Kikusato [22] y el documento sobre procedimientos SAPV [37], donde se propone el uso de normas internacionales como IEC 61683 para evaluar el rendimiento de los inversores. Si bien estas normas son necesarias para asegurar la calidad y seguridad de los sistemas FV, suelen aplicarse en bancos de prueba complejos o costosos, no

disponibles en muchas instituciones académicas o centros de investigación en países en desarrollo.

En este contexto, el emulador diseñado se presenta como una solución accesible que puede reproducir muchas de las condiciones evaluadas en esos estándares, permitiendo así una democratización de las pruebas de inversores. Aunque no reemplaza completamente los laboratorios certificados, sí brinda la posibilidad de realizar validaciones preliminares o formaciones técnicas con un alto grado de fidelidad. Esta aportación tiene un impacto práctico importante, sobre todo en programas de formación técnica o ingeniería aplicada a energías renovables.

7.5. Consideraciones para futuras investigaciones

Aunque los resultados del proyecto han sido satisfactorios, existen limitaciones que deben abordarse en futuros desarrollos. Entre ellas, se encuentra la necesidad de incluir un sistema más robusto de retroalimentación que ajuste automáticamente la salida del emulador en función de la carga del inversor, para mantener perfiles constantes incluso ante variaciones de demanda. Asimismo, se pueden incluir sensores ambientales y algoritmos de control predictivo que ajusten el perfil de voltaje no solo según irradiancia, sino también temperatura, humedad y condiciones reales de operación.

Finalmente, la integración con plataformas de adquisición de datos en la nube o sistemas SCADA puede permitir la monitorización remota del desempeño del emulador, facilitando pruebas distribuidas y la colaboración entre instituciones.

8. Conclusiones

- Se desarrolló exitosamente un emulador geolocalizado de perfiles de radiación solar que sustituye de manera eficiente a un arreglo de paneles físicos para el ensayo de inversores en condiciones de laboratorio. El sistema demostró una precisión media del 97 % en la reproducción de la potencia esperada frente a modelos teóricos, validando la eficacia del prototipo como herramienta de validación técnica.
- La etapa de adquisición de datos mediante la API de NREL se ejecutó con éxito a través de un algoritmo en Python, utilizando las bibliotecas requests y pandas para automatizar la descarga y normalización de archivos CSV. Este método garantizó la disponibilidad de perfiles meteorológicos precisos (GHI y DNI) para diversas regiones de Colombia, permitiendo una emulación basada en escenarios reales y repetibles.
- La arquitectura de control dual, compuesta por una Raspberry Pi Zero para la gestión lógica y un Arduino Uno para el control de potencia, resultó fundamental para la estabilidad del sistema. El uso del microcontrolador para la detección de cruce por cero y el disparo del TRIAC permitió una modulación de corriente precisa hacia las luminarias, con una desviación máxima de solo el 5 % entre la intensidad programada y la medida físicamente.
- Se validó la coherencia técnica de los resultados mediante un análisis comparativo entre las curvas de potencia generadas por el emulador y los parámetros nominales del fabricante consignados en la ficha técnica del panel de referencia (Anexo 3). Esta correspondencia entre los puntos de operación medidos y las curvas características de fábrica confirma que el hardware replica con fidelidad el comportamiento dinámico de un generador solar real.
- A diferencia de las simulaciones puramente numéricas, este trabajo integró pruebas reales con inversores DC-AC, logrando verificar el comportamiento del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con una

desviación inferior al 3 % respecto a los valores teóricos. El emulador permitió diagnosticar la estabilidad de la señal de salida del inversor ante transiciones rápidas de irradiancia, detectando latencias en el reajuste del MPPT bajo condiciones de nubosidad variable.

- Se reconoce como una limitación del proyecto la exclusión de la temperatura como variable activa de emulación, centrándose exclusivamente en la modulación de irradiancia. No obstante, el diseño modular del prototipo deja sentadas las bases para integrar sistemas de gestión térmica y sensores ambientales en futuras investigaciones.
- Se concluye que el emulador de perfiles de radiación solar desarrollado cumple con el objetivo de sustituir físicamente un conjunto de paneles, ofreciendo condiciones reproducibles para ensayos de inversores. La herramienta demostró ser eficaz para verificar la eficiencia de conversión según los parámetros de la norma IEC 61683 y para analizar la respuesta dinámica del equipo ante variaciones de irradiancia, facilitando futuras pruebas de cumplimiento normativo bajo el estándar IEEE 1547 en entornos de laboratorio controlados.

8.1. Limitaciones del proyecto

Aunque los resultados alcanzados son satisfactorios y se logró cumplir con los objetivos propuestos, el desarrollo del proyecto enfrentó varias limitaciones:

- Limitación en la representación térmica: El emulador desarrollado se enfoca en la simulación del componente de irradiancia mediante la modulación de voltaje, sin incluir el efecto de la temperatura ambiente ni la temperatura del módulo. Esto restringe el análisis integral del comportamiento fotovoltaico, ya que se sabe que la eficiencia de los módulos FV y los inversores también depende de estas variables térmicas.
- Rango de tensión de salida limitado: Si bien se cubre un rango funcional para la mayoría de los inversores de pequeña escala, en aplicaciones de media o alta

potencia podría requerirse una fuente con mayores capacidades de voltaje y corriente.

- Ausencia de retroalimentación adaptativa: El sistema no cuenta con un lazo de control en tiempo real que permita mantener constante la salida ante cambios en la carga, como ocurre en situaciones reales cuando el inversor adapta su operación. Esto puede afectar la fidelidad de algunos perfiles dinámicos.
- Interfaz de usuario básica: La carga de perfiles y el control del sistema se realiza de forma semi-automatizada, lo cual podría mejorarse mediante una interfaz gráfica más intuitiva y amigable para usuarios no especializados.

8.2. Recomendaciones y líneas futuras de trabajo

En función de las conclusiones alcanzadas y las limitaciones identificadas, se plantean las siguientes recomendaciones y posibles líneas de trabajo para el desarrollo futuro del proyecto:

1. Integrar simulación térmica: Se recomienda implementar una segunda etapa del proyecto en la cual se incluya un sistema de control de temperatura, ya sea mediante resistencias calefactoras o cámaras térmicas, que permita simular las condiciones ambientales que afectan el comportamiento de los módulos FV. Esto permitiría evaluar también el efecto combinado de irradiancia y temperatura en la eficiencia del inversor.
2. Ampliar el rango de operación: Para atender aplicaciones industriales o sistemas de generación más robustos, se sugiere el rediseño de la fuente de voltaje con componentes de mayor capacidad. Esto permitiría simular arreglos de paneles solares de mayor escala y probar inversores trifásicos o de mayores niveles de potencia.
3. Desarrollar una interfaz gráfica amigable: Un entorno de software que permita cargar, visualizar y editar perfiles de irradiancia de manera gráfica facilitaría el uso del emulador por parte de docentes, estudiantes y técnicos. Además, una

interfaz visual permitiría la integración con plataformas de adquisición de datos y monitoreo remoto.

4. Implementar control en lazo cerrado: La incorporación de sensores de corriente y voltaje en la salida del emulador permitiría crear un sistema de control adaptativo que ajuste dinámicamente la señal para mantener la forma de onda deseada, incluso cuando se conecta a distintas cargas. Esta mejora aumentaría la precisión del sistema ante variaciones de carga, replicando mejor el comportamiento de un generador solar real.
5. Validar frente a entornos reales: Para consolidar la utilidad del emulador, se recomienda su validación frente a pruebas de campo, comparando el comportamiento del inversor cuando está conectado al emulador frente a cuando opera con un arreglo fotovoltaico real. Esta validación experimental fortalecería su aplicabilidad como herramienta de prueba confiable.
6. Publicación y estandarización del diseño: Se sugiere la documentación detallada del diseño electrónico, el código de programación y los protocolos de prueba para permitir la replicación del emulador en otros centros de investigación o instituciones educativas. Esto aportaría a la formación en energías renovables y contribuiría a la estandarización de pruebas a bajo costo.
7. Explorar aplicaciones educativas: Dado su bajo costo y portabilidad, el emulador puede ser integrado en programas de formación técnica, diplomados o laboratorios de ingeniería eléctrica y electrónica. Se recomienda diseñar una serie de prácticas académicas basadas en su uso, orientadas al análisis de eficiencia, comportamiento ante variaciones climáticas y pruebas de fallas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Kikusato *et al.*, «Performance analysis of grid-forming inverters in existing conformance testing», *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 73-83, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.106.
- [2] A. B. Bereskin, «Voltage-Regulated Power Supplies Design and Construction Considerations», *Proc. IRE*, vol. 31, n.º 2, pp. 47-52, feb. 1943, doi: 10.1109/JRPROC.1943.234344.
- [3] L. T. Scarabelot, C. R. Rambo, y G. A. Rampinelli, «A relative power-based adaptive hybrid model for DC/AC average inverter efficiency of photovoltaics systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, pp. 470-477, sep. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.099.
- [4] A. Abba, F. Caponio, y A. Geraci, «Digital configurable instrument for emulation of signals from radiation detectors», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 85, n.º 1, p. 013506, ene. 2014, doi: 10.1063/1.4861920.
- [5] R. Kaplar *et al.*, «PV inverter performance and reliability: What is the role of the IGBT?», en *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA: IEEE, jun. 2011, pp. 001842-001847. doi: 10.1109/PVSC.2011.6186311.
- [6] O. A. Rosyid, N. M. Lande, y F. M. Rizanulhaq, «Validation of Solar Inverter Testing Procedure for Stand-Alone PV Systems», en *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Batu, East Java, Indonesia: IEEE, oct. 2018, pp. 42-45. doi: 10.1109/EECCIS.2018.8692977.
- [7] M. Benmiloud, A. Hadjaissa, N. Abouchabana, K. Ameer, A. Benalia, y A. Rabhi, «Design and Control of PV Emulator based on DC-DC Push-Pull Converter», en *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*, Batna, Algeria: IEEE, nov. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICEEAT60471.2023.10426201.
- [8] M. Krishnaswamy, M. H. Dolli, N. K. T S, S. K. R, y V. M, «Design and Development of Solar PV Emulator Using NI Labview», en *2023 7th International Conference on Design Innovation for 3 Cs Compute Communicate Control (ICDI3C)*, Karnataka, India: IEEE, nov. 2023, pp. 330-335. doi: 10.1109/ICDI3C61568.2023.00073.
- [9] A. Sanaullah y H. A. Khan, «Design and implementation of a low cost Solar Panel emulator», en *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, New Orleans, LA: IEEE, jun. 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/PVSC.2015.7356274.
- [10] I. Jayawardana, C. N. Man Ho, y M. Pokharel, «Design and Implementation of Switch-mode Solar Photovoltaic Emulator using Power-Hardware-in-the-loop Simulations for Grid Integration Studies», en *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, MD, USA: IEEE, sep. 2019, pp. 889-894. doi: 10.1109/ECCE.2019.8912636.
- [11] T. Kuisis, M. Aswat, K. Nixon, y W. Cronje, «Design of a 90 W Low Cost Solar Emulator for Testing MPPT Algorithms on PV Based Energy Systems», en *2020*

- International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, Cape Town, South Africa: IEEE, ene. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041107.
- [12] E. Hayakwong y A. Matarach, «Design of a Low-cost and Simple Solar Emulator for Laboratory Studies», en *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand: IEEE, may 2021, pp. 1059-1062. doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454700.
- [13] C. Das, K. Mandal, y M. Roy, «Design of PV Emulator Fed MPPT Controlled DC-DC Boost Converter for Battery Charging», en *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, Nagpur, India: IEEE, sep. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297739.
- [14] Abhishek. R. S, D. K. A, H. S, H. S, y S. Saravanan, «Design of Solar PV Emulator using Raspberry Pi Controller», en *2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Nepal: IEEE, jul. 2022, pp. 581-584. doi: 10.1109/ICICT54344.2022.9850727.
- [15] M. Ulaganathan y D. Devaraj, «Hardware and Software Co-emulation Technique based Solar Photovoltaic Sources Emulator», en *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, Tamilnadu, India: IEEE, abr. 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/INCOS45849.2019.8951330.
- [16] S. A. Arshadi, B. Poorali, E. Adib, y H. Farzanehfard, «High Step-Up DC–AC Inverter Suitable for AC Module Applications», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n.º 2, pp. 832-839, feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2480387.
- [17] S. A. Arshadi, B. Poorali, E. Adib, y H. Farzanehfard, «High Step-Up DC–AC Inverter Suitable for AC Module Applications», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n.º 2, pp. 832-839, feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2480387.
- [18] H. V. Patel, S. A. Gorji, S. S. M. Shahi, y J. G. Love, «Implementation of a Lab-Scale Green Hydrogen Production System with Solar PV Emulator and Energy Storage System», en *2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, Shanghai, China: IEEE, dic. 2021, pp. 201-208. doi: 10.1109/ICPES53652.2021.9683797.
- [19] L. Estrada, N. Vazquez, J. Ortega, H. Lopez, C. Hernandez, y J. Vaquero, «Low Cost PV Emulator Based on Programmable DC Power Supply and LabVIEW», en *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada: IEEE, oct. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589184.
- [20] A. S. Samosir, S. R. Sulistiyanti, H. Gusmedi, y A. F. Huda, «Modeling and Simulation of Buck Converter-Based PV Emulator», en *2023 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, Bandar Lampung, Indonesia: IEEE, oct. 2023, pp. 27-31. doi: 10.1109/ICCTEIE60099.2023.10366746.
- [21] C. Ottieri, K. Ojiako, y S. M. S. Alarefi, «Simulink Simulation of a Current Mode Control DC-DC Based PV Emulator : Sustainable Application of Power Electronics

- in Solar PV Eduaction», en *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy: IEEE, jun. 2020, pp. 865-870. doi: 10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161830.
- [22] H. Kikusato *et al.*, «Performance analysis of grid-forming inverters in existing conformance testing», *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 73-83, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.106.
- [23] M. Shahabuddin, A. Riyaz, M. Asim, M. M. Shadab, A. Sarwar, y A. Anees, «Performance Based Analysis of Solar PV Emulators: A Review», en *2018 International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES)*, Lucknow, India: IEEE, sep. 2018, pp. 94-99. doi: 10.1109/CCTES.2018.8674082.
- [24] K. H. A. Sahid, V. Thomas, S. Kumaravel, y S. Ashok, «Performance Comparison of Root-finding Algorithms for Solar Photovoltaic Emulator», en *2019 International Conference on Power Electronics Applications and Technology in Present Energy Scenario (PETPES)*, Mangalore, India: IEEE, ago. 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/PETPES47060.2019.9003843.
- [25] H. A. Khawaldeh, H. Aljarajreh, M. Al-Soeidat, D. D.-C. Lu, y L. Li, «Performance Investigation of a PV Emulator Using Current Source and Diode String», en *2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)*, Sydney, Australia: IEEE, dic. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICSENG.2018.8638207.
- [26] R. Kaplar *et al.*, «PV inverter performance and reliability: What is the role of the IGBT?», en *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA: IEEE, jun. 2011, pp. 001842-001847. doi: 10.1109/PVSC.2011.6186311.
- [27] Omer. S. M. Jomah, N. Mohamed, A. A. Ahmed, A. Alsharif, M. M. Khaleel, y Y. F. Nassar, «Simulating Photovoltaic Emulator Systems for Renewable Energy Analysis», en *2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Tripoli, Libya: IEEE, may 2024, pp. 296-299. doi: 10.1109/MI-STA61267.2024.10599755.
- [28] C. Ottieri, K. Ojiako, y S. M. S. Alarefi, «Simulink Simulation of a Current Mode Control DC-DC Based PV Emulator : Sustainable Application of Power Electroincs in Solar PV Eduaction», en *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy: IEEE, jun. 2020, pp. 865-870. doi: 10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161830.
- [29] Y. M. Alsmadi, V. Utkin, M. Haj-Ahmed, L. Xu, y A. Y. Abdelaziz, «Sliding-mode control of power converters: AC/DC converters & DC/AC inverters», *Int. J. Control*, vol. 91, n.º 11, pp. 2573-2587, nov. 2018, doi: 10.1080/00207179.2017.1390263.
- [30] C. Farcas, I. Ciocan, y A. Tulbure, «Solar Emulator for a Photovoltaic Module», en *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iasi: IEEE, oct. 2018, pp. 314-318. doi: 10.1109/SIITME.2018.8599283.
- [31] M. Unlu y S. Camur, «Solar irradiance emulator based on DC power supply for photovoltaic panels», en *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Targoviste: IEEE, jun. 2017, pp. 1-4.

doi: 10.1109/ECAI.2017.8166455.

- [32] U. K. Shinde, S. G. Kadwane, S. P. Gawande, y R. Keshri, «Solar PV emulator for realizing PV characteristics under rapidly varying environmental conditions», en *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India: IEEE, dic. 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/PEDES.2016.7914286.
- [33] H. Grover y I. Kamwa, «Solar PV-Based Power Conversion System: A Real-Time Testing Facility», en *2025 8th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, Kolkata, India: IEEE, ene. 2025, pp. 1-6. doi: 10.1109/IEMENTech65115.2025.10959147.
- [34] S. P. Adhau, R. M. Moharil, V. S. Rajguru, y M. G. Pradhan, «Study and Analysis of Solar Photo Voltaic Modules with Real Time Experimentation on Solar Simulator/Solar Emulator», en *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Prague, Czech Republic: IEEE, jul. 2022, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872753.
- [35] C. Fărcaș, I. Ciocan, A. Tulbure, y M. Godja, «Sun Position Simulator for Solar Cell Testing and Characterization», en *2024 IEEE 30th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Sibiu, Romania: IEEE, oct. 2024, pp. 405-409. doi: 10.1109/SIITME63973.2024.10814862.
- [36] A. Fatah, T. Boutabba, I. Benlaloui, D. Khamari, y S. Drid, «THD Analysis of Maximum Power Point Tracking Based on Kalman Filter Structure using Photovoltaic System Emulator», en *2022 5th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, Hail, Saudi Arabia: IEEE, mar. 2022, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICPEA51060.2022.9791141.
- [37] O. A. Rosyid, N. M. Lande, y F. M. Rizanulhaq, «Validation of Solar Inverter Testing Procedure for Stand-Alone PV Systems», en *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Batu, East Java, Indonesia: IEEE, oct. 2018, pp. 42-45. doi: 10.1109/EECCIS.2018.8692977.
- [38] I. C. Alexandru, G. Cristian, y B. Mircea, «Variable regulated high voltage power supply», en *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania: IEEE, jun. 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ISFEE.2016.7803163.

ANEXO 1. API IMPORTACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS.

```
import requests
import zipfile
import io
import re
import pandas as pd

def get_radiation_data(lat, lon, api_key):
    url = 'https://developer.nrel.gov/api/solar/nsrdb_psm3_download.json'

    params = {
        'api_key': api_key,
        'lat': lat,
        'lon': lon,
        'attributes': 'ghi,dni',
        'leap_day': 'false',
        'interval': '60',
        'utc': 'true',
        'email': 'carlosmquiroz@hotmail.com',
        'full_name': 'Carlos Quiroz',
        'affiliation': 'Universidad Pascual Bravo',
        'reason': 'research',
        'mailing_list': 'false',
        'names': '2020', # Specify the year(s)
        'wkt': f'POINT({lon} {lat})',
        'format': 'CSV'
    }
```

```

response = requests.get(url, params=params)

if response.status_code == 200:
    # Extract download link from the response text
    download_link = re.search(r'(https://mapfiles\.nrel\.gov/.+\.zip)', response.text)
    if download_link:
        return download_link.group(1)
    else:
        raise Exception("Download link not found in the response.")
else:
    raise Exception(f"API request failed with status code {response.status_code}: {response.text}")

def download_and_extract_zip(url):
    # Download the ZIP file
    response = requests.get(url)
    if response.status_code == 200:
        with zipfile.ZipFile(io.BytesIO(response.content)) as z:
            # Assuming the ZIP contains only one CSV file, extract it
            CSV_filename = z.namelist()[0]
            with z.open(CSV_filename) as f:
                # Skip the first two rows and read the rest into a DataFrame
                df = pd.read_CSV(f, skiprows=2)
            return df
    else:
        raise Exception(f"Failed to download the file with status code {response.status_code}.")

# Example usage

```

```
api_key = '8plbspn5QnEghRDeArujTHCqtBP1qcDgDnodhTnm'  
latitude = 4.765  
longitude = -74.082
```

```
try:
```

```
    download_link = get_radiation_data(latitude, longitude, api_key)  
    print(f"Download link: {download_link}")
```

```
    # Download and extract the ZIP file content
```

```
    df = download_and_extract_zip(download_link)
```

```
    # Filter to get the last row where GHI and DNI are non-zero
```

```
    non_zero_data = df[(df['GHI'] > 0) | (df['DNI'] > 0)].iloc[-1]
```

```
    print("Last non-zero GHI:", non_zero_data['GHI'])
```

```
    print("Last non-zero DNI:", non_zero_data['DNI'])
```

```
except Exception as e:
```

```
    print(e)
```

ANEXO 2. SUSTENTACIÓN DE API.

El script desarrollado automatiza la interacción con la API de NREL (National Renewable Energy Laboratory) para obtener perfiles de irradiancia geolocalizados. El proceso se divide en las siguientes etapas técnicas:

1. Importación de librerías: Se utilizan librerías estándar para la comunicación web (requests), manejo de archivos comprimidos (zipfile, io), expresiones regulares para búsqueda de texto (re) y procesamiento de datos tabulares (pandas).
2. Función `get_radiation_data`:
 - Define el punto de acceso (endpoint) de la API NSRDB PSM3.
 - Configura los parámetros de consulta, incluyendo las coordenadas (latitud y longitud), los atributos deseados (GHI y DNI), el intervalo de tiempo (60 minutos) y el año de referencia (2020).
 - Realiza una solicitud HTTP GET y, si la respuesta es exitosa (código 200), emplea una expresión regular para extraer el enlace de descarga del archivo ZIP contenido en el cuerpo de la respuesta.
3. Función `download_and_extract_zip`:
 - Descarga el contenido binario del archivo ZIP y lo gestiona en memoria utilizando `io.BytesIO` para evitar escrituras innecesarias en el disco.
 - Extrae el archivo CSV del paquete comprimido y lo carga en un `DataFrame` de pandas, omitiendo las dos primeras filas que contienen metadatos del encabezado de NREL.
4. Lógica de ejecución y filtrado:
 - Se ingresan las credenciales (`api_key`) y la ubicación geográfica específica.
 - Finalmente, el script aplica un filtro para seleccionar únicamente los registros donde la irradiancia es mayor a cero, asegurando que el emulador reciba datos correspondientes a horas de luz solar.

- Se captura la última fila válida para verificar la integridad de la información obtenida.

ANEXO 3. FICHA TÉCNICA PANEL SOLAR.

SiRo T Efficient



NT12R/66GDF

610-635W

N-type Bifacial Double Glass Module

TOPCon LO Tech

Low degradation ensures reliable output over the module's lifetime

High bifaciality for superior rear-side power output

Excellent temperature coefficient ensures power generation in high temperature areas

Enhanced low-light response ensures stable output under low-light conditions

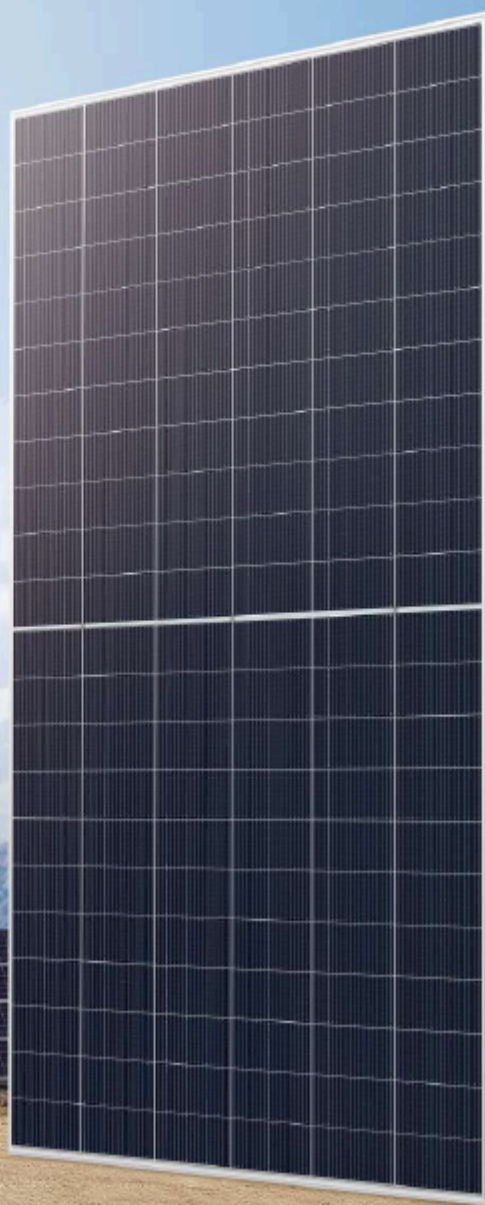
Sound quality management and product certification system

IEC61215:2021 / IEC61730:2023

ISO9001:2015: quality management system

ISO14001:2015: environmental management system

ISO45001:2018: Occupational Health and Safety Management System



NT12R/66GDF

TOPCon^{IO} Tech

Maximum Power Output

635W

Maximum Module Efficiency

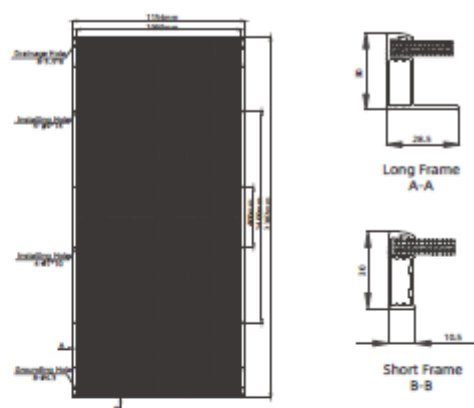
23.50%

Mechanical Data

Cell Type	N-Type Monocrystalline Solar Cell
Number of Cells	132 Cells (6×22)
Dimensions of Module	2382×1134×30mm (93.78×44.65×1.18 inches)
Weight	32.5 kg
Front/Back Side Glass	2.0mm (0.08 inches), Heat strengthened glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68 Rated, 3 diodes
Cable	4.0mm ² , +300/-200mm (length can be customized)
Connector	GCL-01/GCL-02/MC4-EVO2/others
Packaging Configuration	Module per box: 36 pieces Module per 40' HQ: 720 pieces

Module Dimension

Tolerance: Length±2mm Width±2mm



Electrical Specification (STC*)

* Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass 1.5

Maximum Power	P _{max} (W)	610	615	620	625	630	635
Maximum Power Voltage	V _{mp} (V)	40.53	40.73	40.93	41.12	41.31	41.50
Maximum Power Current	I _{mp} (A)	15.05	15.10	15.15	15.20	15.25	15.30
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	48.10	48.25	48.40	48.55	48.70	48.88
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	15.85	15.90	15.95	16.00	16.05	16.13
Module Efficiency	(%)	22.6	22.8	23.0	23.1	23.3	23.5
Power Output Guarantee	(%)	0~+3					
Temperature Coefficient of I _{sc}	(I _{sc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of V _{oc}	(V _{oc})	-0.25%/°C					
Temperature Coefficient of P _{max}	(P _{max})	-0.29%/°C					

Electrical Characteristics with Different Power Bin (Reference to 10% Irradiance Ratio)

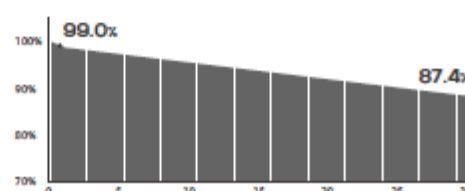
Maximum Power	P _{max} (W)	658.6	664.3	669.6	675.2	680.4	685.6
Maximum Power Voltage	V _{mp} (V)	40.53	40.73	40.93	41.12	41.31	41.50
Maximum Power Current	I _{mp} (A)	16.25	16.31	16.36	16.42	16.47	16.52
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	48.10	48.25	48.40	48.55	48.70	48.88
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	17.12	17.17	17.23	17.28	17.33	17.42

Application Conditions

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC
Max Series Fuse Rating	35A
Wind/ Snow Load	2400Pa/5400Pa*
Bifaciality	80±5%

*For more details please check the Installation manual of GCLSI

Linear Performance Warranty



12 year
Product warranty

30 year
Linear power warranty

1%
First year power attenuation

0.40%
Annual degradation over 30 years