

DISEÑO Y DESARROLLO DE MODULO INALAMBRICO NO INVASIVO PARA MONITOREO DE PRODUCCION ENERGETICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Catarino Aguilar Octavio, Jesús Alberto García Rojas, Norma Elsa Reyes Piña
Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del progreso
Ingeniería Informática
San Felipe del Progreso, Estado de México
7121546934
octavio.ca@sfelipeprogreso.tecnm.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño y desarrollo de un módulo inalámbrico no invasivo y compacto para el monitoreo de la producción energética en sistemas fotovoltaicos. El dispositivo permite la medición de corriente eléctrica sin necesidad de interrumpir o modificar los circuitos existentes, lo que facilita su instalación por personas no especializadas, eliminando riesgos asociados. Esta solución se propone como una alternativa a los sistemas de monitoreo integrados en micro-inversores, ofreciendo una herramienta versátil tanto para usuarios finales como para personal técnico, quienes pueden acceder en tiempo real al estado operativo del sistema fotovoltaico. Gracias a su diseño portátil, el módulo puede instalarse y retirarse con facilidad, adaptándose a diferentes configuraciones. Además, su arquitectura permite operar de manera independiente o integrarse en redes tipo malla, lo cual posibilita la centralización de datos de múltiples módulos, el análisis detallado del rendimiento energético y la detección precisa de fallas en los distintos componentes del arreglo fotovoltaico.

Palabras Clave: Sistema Computacional, Energía renovable, Sistema Embebido, Computacion.

ABSTRACT

This article presents the design and development of a compact, non-invasive wireless module for monitoring energy production in photovoltaic systems. The device enables current measurement without the need to interrupt or modify existing circuits, allowing safe installation by non-specialized personnel. It is proposed as an alternative to conventional monitoring systems integrated into microinverters, offering a versatile tool for both end-users and maintenance staff to access real-time operational data. Its portable design allows for easy installation and removal, making it adaptable to various configurations. Furthermore, the module can operate independently or be integrated into a mesh network of multiple modules, enabling centralized data collection, detailed performance analysis, and accurate fault detection within the photovoltaic array. This approach enhances the system's reliability and contributes to more efficient energy management and maintenance strategies in photovoltaic installations.

Keywords: Computer System, Renewable Energy, Embedded System, Computing.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la creciente demanda de energías renovables y el impulso hacia un futuro más sostenible han fomentado el desarrollo y la adopción de sistemas fotovoltaicos a nivel global [1][2]. Estos sistemas, que convierten la energía solar en electricidad, se han consolidado como una de las principales alternativas para la transición hacia fuentes de energía limpias y la reducción de emisiones de carbono [3]. Países de Europa, Asia y América Latina han implementado políticas públicas, incentivos económicos y marcos regulatorios que impulsan la instalación masiva de paneles solares, tanto en entornos residenciales como industriales [4]. Este crecimiento acelerado, sin embargo, ha puesto de manifiesto nuevos desafíos técnicos y operativos, entre los que destaca la necesidad de mantener un rendimiento óptimo y una gestión eficiente de los sistemas a lo largo del tiempo. La eficiencia y el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas dependen, en gran medida, de la capacidad para monitorear, diagnosticar y anticipar fallos o deficiencias en la operación [5] [6]. Estudios recientes muestran que pérdidas energéticas no detectadas, fallos en módulos individuales y degradación de componentes pueden disminuir sustancialmente la producción anual de energía, repercutiendo en el retorno de inversión y la satisfacción de los usuarios. Por tal motivo, el monitoreo continuo y la detección temprana de anomalías han adquirido un papel fundamental en la gestión moderna de sistemas fotovoltaicos.

Diversos enfoques tecnológicos han surgido para atender esta necesidad. Por ejemplo, Doe y Smith [7] proponen un sistema de monitoreo remoto basado en el Internet de las Cosas (IoT), que emplea sensores para recolectar datos de producción y condiciones ambientales, transmitiéndolos a una plataforma en la nube para su análisis en tiempo real. Este tipo de soluciones han demostrado mejorar la eficiencia operativa, reducir los tiempos de inactividad y optimizar la gestión energética. Sin embargo, requieren instalar sensores en serie con los paneles, implicando una manipulación directa de los circuitos eléctricos. Este aspecto no solo eleva los riesgos para el personal encargado de la instalación y el mantenimiento, sino que puede afectar la

integridad de la infraestructura eléctrica y limitar la adopción en sistemas preexistentes, especialmente donde la intervención en los componentes originales anula garantías de fabricante.

Plataformas avanzadas, como la propuesta por Lee y Park [8], integran tecnologías de blockchain para registrar, verificar y asegurar la integridad de los datos energéticos mediante contratos inteligentes. Esto garantiza la transparencia y la trazabilidad de la información, resultando de gran utilidad en contextos donde la variabilidad tarifaria y la facturación energética requieren registros inalterables. Si bien estas soluciones ofrecen ventajas en seguridad, automatización y confianza de los datos, no abordan directamente la problemática de la instalación física de los sensores, que suele seguir siendo invasiva y demandar conocimientos técnicos avanzados, además de infraestructura tecnológica adicional para el procesamiento y resguardo de la información.

Por otro lado, sistemas inteligentes de monitoreo y control, como el desarrollado por González y Rodríguez [9], incorporan algoritmos de inteligencia artificial para analizar datos en tiempo real, prever el rendimiento y detectar anomalías. Esta tendencia, alineada con la digitalización de la industria energética, permite maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los sistemas. No obstante, la instalación y operación de estos sistemas sigue presentando barreras técnicas y económicas, ya que requieren la incorporación de sensores especializados y personal capacitado para la interpretación de los datos, lo que limita la accesibilidad y el empoderamiento del usuario final.

Incluso en soluciones diseñadas para el entorno residencial, como la plataforma de Nguyen y Tran [10], la instalación de sensores de monitoreo continúa siendo invasiva, con la consiguiente necesidad de intervención de personal calificado y la posible pérdida de garantías o pólizas de servicio. Además, la dependencia de sistemas alámbricos o software propietario puede dificultar la interoperabilidad y la actualización tecnológica de los sistemas monitoreados.

Ante estas limitaciones, la literatura reciente y las tendencias internacionales apuntan hacia la urgencia de soluciones de monitoreo no invasivas, inalámbricas y multiplataforma [6]. El desarrollo de módulos inalámbricos no invasivos representa un avance disruptivo, al eliminar los riesgos asociados a la manipulación de componentes eléctricos y reducir la complejidad y los costos de instalación. Esto no solo facilita la integración universal en una amplia variedad de configuraciones y marcas, sino que también democratiza el acceso a la información relevante para los usuarios, permitiendo el monitoreo en tiempo real, la detección temprana de anomalías y la optimización de la producción energética. De esta manera, se promueve una adopción más amplia, segura y eficiente de las tecnologías de monitoreo, contribuyendo de forma significativa a la sostenibilidad y resiliencia del sector fotovoltaico [6], [8].

2. DESARROLLO

La integración de un sensor de corriente no invasivo en la plataforma propuesta implicó diversos retos técnicos, principalmente relacionados con la selección de un dispositivo compacto, eficiente y de bajo consumo energético, que además fuera compatible con el ESP32. Se evaluaron diferentes alternativas disponibles en el mercado, priorizando aquellas que permitieran una instalación sencilla, sin necesidad de intervenir los conductores eléctricos. La opción más viable resultó ser un sensor basado en el efecto Hall, de funcionamiento similar a las pinzas amperimétricas, el cual ofrece la ventaja de ser “quita y pon”, facilitando su uso en aplicaciones residenciales y de monitoreo temporal. Este tipo de sensor, además de brindar seguridad y preservar la integridad de la instalación, es capaz de proporcionar lecturas fiables de corriente continua y alterna, manteniendo un perfil compacto y un bajo consumo energético, aspectos fundamentales para su integración en sistemas embebidos como el ESP32.

2.1. Incorporación de sensor de efecto hall HSTS016L

El sensor HSTS016L, seleccionado para este desarrollo, es un dispositivo compacto de efecto Hall diseñado específicamente para la medición no invasiva de corriente eléctrica. Este sensor opera detectando el campo magnético generado alrededor de un conductor cuando circula corriente, permitiendo así la medición sin contacto directo ni corte del circuito. Una de las principales ventajas de este componente es su capacidad para medir tanto corriente alterna (CA) como corriente continua (CC), adaptándose a los diferentes requerimientos presentes en los sistemas fotovoltaicos modernos, que suelen involucrar ambos tipos de corriente en distintas etapas de conversión y aprovechamiento energético.

2.2. Adecuación de nivel lógico

Para garantizar la compatibilidad entre la señal analógica del sensor HSTS016L y el microcontrolador ESP32, es fundamental realizar una adecuación de nivel lógico. Dado que el sensor puede entregar una señal de salida de hasta 5 V y el ADC del ESP32 admite un máximo de 3.3 V, se utiliza un divisor de voltaje para reducir la amplitud de la señal sin distorsionarla. Este circuito, conformado por dos resistencias en serie, ajusta la señal de salida del sensor al rango seguro para el microcontrolador, evitando daños y asegurando la correcta adquisición de datos. Esta etapa resulta esencial para la integración de sensores alimentados a 5 V en plataformas que operan a 3.3 V, garantizando la fiabilidad y seguridad del sistema de monitoreo. El diagrama del divisor de voltaje para la adecuación de los niveles lógicos se presenta en la Figura 1.

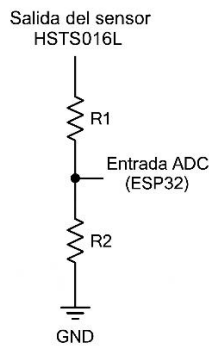


Figura 1: Divisor de voltaje

Su funcionamiento está determinado por la fórmula (1)

$$(1) \quad V_{out} = (V_{in}) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Donde:

V_{out} = Voltaje Nivelado a ESP32

R_1 = Resistencia superior

R_2 = resistencia Inferior

V_{in} = Voltaje de la salida del sensor HSTS016L

Para obtener los valores de R_1 y R_2 , se despeja la fórmula quedando Fórmula (2) para obtener R_1 y Fórmula (3) para obtener R_2

$$(2) \quad R_1 = R_2 \left(\left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right) - 1 \right)$$

$$(3) \quad R_2 = \frac{V_{out} * R_1}{V_{in} - V_{out}}$$

Al ser desconocidos ambos valores tanto de R_1 como de R_2 , se escoge un valor estándar para R_2 , que para este caso fue de $3.3 \text{ k}\Omega$. Que al ser sustituido en la Fórmula (2), y considerando:

$V_{out} = 3.3V$ (Voltaje que acepta ESP32)

$V_{in} = 5V$ (Voltaje que otorga la salida de sensor)

$R_2 = 3.3 \text{ k}\Omega$

$$(4) \quad R_1 = 3.3 \text{ k}\Omega \left(\left(\frac{5V}{3.3V} \right) - 1 \right)$$

$$R_1 \approx 1.8 \text{ k}\Omega$$

Da como resultado un aproximado a los $1.8 \text{ k}\Omega$ al no ser un valor comercial se decidió por incorporar la resistencia más cercana al valor, siendo la de $\text{k}\Omega$ la indicada. Con ello se logra adecuar los niveles lógicos y que tanto el sensor como el esp32 trabajaran de manera coordinada.

2.3. Monitoreo de producción de sistema fotovoltaico mediante corriente.

Para la conocer la producción energética del panel fotovoltaico, se optó por un enfoque práctico y no invasivo basado únicamente

en la medición de la corriente. Debido a que el módulo de monitoreo está diseñado para registrar únicamente la corriente generada, se utilizó el valor de voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}), especificado por el fabricante del panel, como referencia constante. Este valor representa el voltaje típico de operación cuando el panel entrega su máxima potencia bajo condiciones estándar.

El proceso consiste en multiplicar la corriente medida por el valor promedio de V_{mp} para estimar la potencia generada en cada instante. La fórmula de este proceso se presenta en (5).

$$(5) \quad P = V_{mp} * I$$

Donde:

P = Potencia estimada (en watts, W).

V_{mp} = Voltaje de panel especificado por fabricante

I = Corriente medida por el módulo

Esto permite un seguimiento prolongado del desempeño del panel, facilitando la detección de variaciones inusuales en la producción, las cuales pueden ser indicio de degradación, fallas eléctricas o condiciones adversas en el sistema. Aunque el método no considera las fluctuaciones instantáneas del voltaje, ofrece una alternativa sencilla y eficaz para el monitoreo continuo y la detección temprana de posibles anomalías, sin requerir la instrumentación adicional que implicaría la medición directa de voltaje en el circuito.

2.4. Operatividad de los Módulos de monitoreo

Para ampliar la capacidad de medición y monitoreo en múltiples puntos de un sistema fotovoltaico, se diseñó una arquitectura de red tipo maestro-esclavo. En esta configuración, cada módulo esclavo se encarga de realizar la medición en un punto específico y transmitir sus datos de corriente de manera inalámbrica al módulo maestro utilizando comunicación WiFi. El módulo maestro, a su vez, funciona como punto de acceso (Access Point), permitiendo la conexión simultánea de todos los módulos esclavos, y también tiene la capacidad de conectarse a una red WiFi existente para acceder a Internet. De manera experimental y con fines de validación funcional, los datos centralizados se transfieren temporalmente a una hoja de cálculo en Google Sheets para facilitar la verificación remota y el análisis preliminar; adicionalmente, el módulo maestro incorpora una memoria microSD para el almacenamiento local y seguro de la información, asegurando la preservación y el respaldo de los registros aun ante posibles pérdidas de conectividad. Cada módulo cuenta con un arreglo de baterías de litio tipo 3S, que suministran un voltaje de 12 V a 3600 mA , otorgando una autonomía de hasta 22 horas por carga completa. Este diseño permite recargar la batería sin interrumpir el funcionamiento del sistema y, en caso de ser necesario, se contempla la integración

de un banco de baterías comercial como respaldo secundario para garantizar la continuidad operativa. Es importante señalar que el alcance de la comunicación entre módulos, utilizando una red WiFi estándar, puede variar típicamente entre 30 y 100 metros en espacios abiertos, dependiendo de factores ambientales y de infraestructura. Esta solución integral hace posible una integración escalable y flexible, adaptándose tanto a aplicaciones independientes como a sistemas distribuidos que requieren la recopilación, consulta y gestión eficiente de datos en tiempo real desde diversos puntos del arreglo fotovoltaico, el diagrama que muestra la configuración Maestro-Esclavo se muestra en la Figura 2.

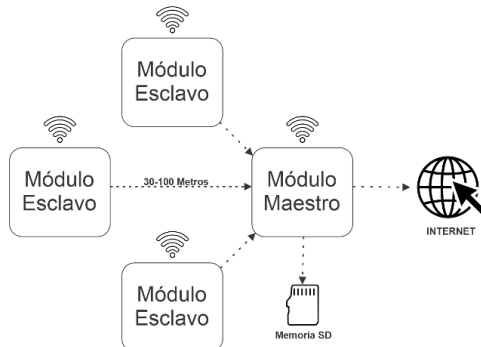


Figura 2: Configuración Maestro Esclavo.

Para que el módulo maestro, pueda operar como punto de acceso (AP) y, simultáneamente, conectarse a una red WiFi existente (modo estación o STA), fue necesario configurar el dispositivo en modo WiFi Dual (AP+STA). Esta funcionalidad permite al ESP32 crear su propia red inalámbrica local, a la cual los módulos esclavos pueden conectarse para enviar sus mediciones, mientras que el propio módulo maestro mantiene una conexión activa a una red WiFi externa con acceso a Internet. La configuración inicial consiste en establecer el modo dual mediante las funciones propias del entorno de desarrollo de ESP32 que en su caso fue el IDE de Arduino, se configuran los parámetros del punto de acceso, como el nombre de red y la contraseña, para la red privada entre el maestro y los esclavos, y se ingresan las credenciales de la red WiFi existente para habilitar el acceso a Internet.

2.3.1. Almacenamiento de las mediciones

Para el almacenamiento de los datos de interés, se implementó una lógica de gestión de conectividad que permite determinar, en tiempo real, la disponibilidad de acceso a Internet. Cuando se detecta una conexión activa, el sistema prioriza el envío de los datos recolectados por los sensores directamente a una hoja de Google Sheets, garantizando el registro y la consulta remota de la información. En caso de ausencia de conectividad, el módulo maestro activa automáticamente el almacenamiento local de los datos en la memoria microSD, asegurando que ninguna medición se pierda y que el respaldo esté disponible para su posterior

sincronización cuando se restablezca la conexión a Internet. Esta estrategia contribuye a la robustez y confiabilidad del sistema de monitoreo bajo diferentes condiciones operativas, en el diagrama que se presenta en la Figura 3 el comportamiento del módulo maestro para el almacenamiento de los datos.

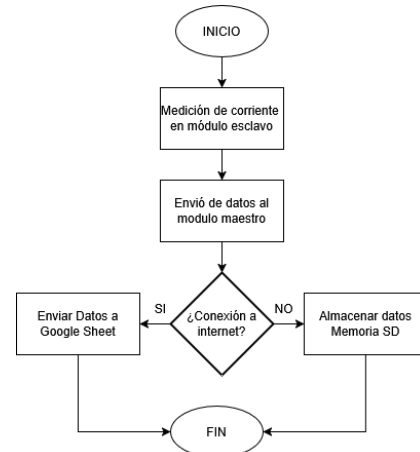


Figura 3: Operatividad del almacenamiento de los datos de interés.

Los datos enviados por los módulos esclavos al módulo maestro deben seguir un formato para poder determinar el origen de los mismos por ello se estableció el siguiente formato

Modulo, Fecha, Hora, Medicion

Donde:

Modulo = identificador unico de modulo esclavo

Fecha = Dia exacto de la medicion (DDMMAAA)

Hora = Hora exacta de la medicion (HH:MM:SS)

Medicion = Magnitud de la corriente

Con ello se garantiza que las mediciones de la variable de interés de cada nodo sean única e irrepetible.

2.3.2. Integración de Google Sheets mediante Apps Script.

Para habilitar el almacenamiento remoto de datos en una hoja de Google Sheets, se implementó un Google Apps Script que actúa como un servicio web intermediario. Este script se despliega como una aplicación web, permitiendo que el módulo maestro, tras verificar la conectividad a Internet, envíe los datos recolectados mediante solicitudes HTTP POST. El Apps Script recibe estas peticiones, procesa y valida los datos (fecha, hora, identificación del módulo y valores de medición) y los inserta automáticamente en una nueva fila de la hoja de cálculo, asegurando el orden y la integridad del registro.

Desde el punto de vista técnico, el Apps Script expone una función principal que maneja los eventos doPost(e), extrayendo los parámetros de la solicitud. Estos parámetros se asignan a las columnas correspondientes en la hoja de Google Sheets

predefinida. Además, se pueden implementar controles de autenticación, filtros para evitar registros duplicados y respuestas personalizadas para que el nodo maestro confirme la correcta transmisión de datos o gestione reintentos en caso de error. Esta integración aprovecha los recursos gratuitos y escalables de Google, facilitando la consulta, el análisis en tiempo real y la visualización remota de la información recolectada, sin la necesidad de servidores adicionales ni infraestructuras complejas.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para validar la operatividad y desempeño del sistema desarrollado, se llevaron a cabo dos pruebas experimentales. La primera consistió en la evaluación de un módulo independiente instalado en un panel de 550 W policristalino, permitiendo analizar su funcionamiento en modo autónomo. La segunda prueba implementó la topología maestro-esclavo, integrando dos paneles de 550 W policristalinos, en la que se utilizó un módulo maestro y un módulo esclavo para monitorear y centralizar las mediciones en tiempo real. Estas pruebas permitieron comparar la flexibilidad del sistema tanto en configuraciones individuales como en arreglos de mayor escala, las características generales del panel usado se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones de panel usado para pruebas.

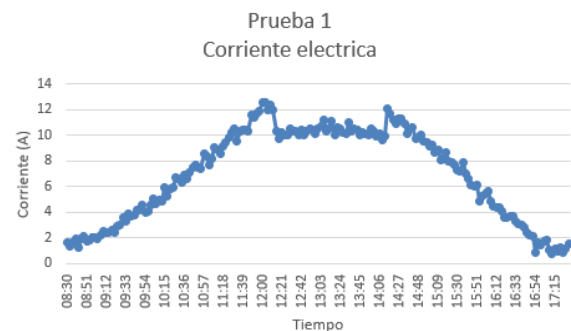
Especificación	Valor
Potencia máxima (Pmax)	550 W
Voltaje en punto de máxima potencia (Vmp)	41.1 V
Corriente en punto de máxima potencia (Imp)	13.38 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	49.3 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	14.08 A
Eficiencia del módulo	20.5 %
Tipo de célula	Policristalino
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	2278 x 1134 x 35 mm
Peso	28.5 kg
Tolerancia de potencia	0 / +5 W
Temperatura de operación	-40°C a +85°C
Coefficiente de temperatura Pmax	-0.35 % / °C
Fabricante	Canadian Solar

3.1. Prueba de monitoreo con modulo único

Para la primera prueba experimental, se realizó la medición de la producción energética utilizando un solo módulo de monitoreo, el cual fue instalado en un panel solar policristalino de 550 W cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 1. La prueba tuvo una duración total de 9 horas, cubriendo el periodo comprendido entre las 8:00 y las 17:00 horas. Este rango horario se seleccionó con base en la literatura, que indica que la mayor parte de la producción diaria de energía solar ocurre entre el amanecer y el atardecer, concentrándose el pico de generación alrededor del mediodía solar [11]. Durante este intervalo, el

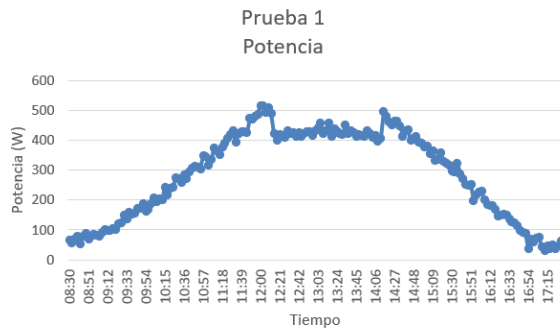
sistema registró de manera continua la corriente generada por el panel bajo condiciones de operación reales. Para verificar la sensibilidad y la capacidad de detección del sistema ante cambios en la irradiancia, se simuló la presencia de sombra colocando una sección de material opaco que obstaculizaba el paso de la luz solar sobre aproximadamente el 20% de la superficie del panel durante un periodo específico del día, observando la correspondiente disminución en las mediciones de corriente. Este procedimiento permitió validar la precisión del módulo y su utilidad para identificar posibles anomalías o pérdidas en la producción energética a lo largo de la jornada.

En la Gráfica 1, se muestra la evolución de la corriente eléctrica generada por la producción del panel fotovoltaico, se puede notar como la producción aumenta con las primeras horas del día, así mismo se percibe como disminuye con el ocaso, se puede observar claramente como el modulo tuvo la capacidad de detectar cuando se colocó un objeto que disminuyó la zona de captación del panel solar.



Gráfica 1: Evolución de corriente eléctrica de Prueba 1

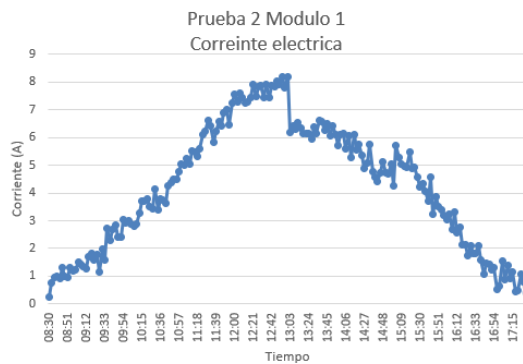
En la Gráfica 2 se presenta la evolución de la potencia generada por el panel solar a lo largo de la prueba de 9 horas. Para el cálculo de la potencia en cada intervalo, se utilizó la corriente monitoreada y el valor de Vmp reportado en la Tabla 1, aplicando la expresión mostrada en la Fórmula (5). Esta metodología permitió estimar la producción energética en tiempo real y analizar el impacto de las variaciones operativas registradas durante el experimento. Asimismo, es posible observar el descenso en la producción durante el periodo en que una porción del panel solar fue intencionalmente tapada.



Gráfica 2: Comportamiento de la potencia en prueba 1

3.2. Prueba de monitoreo Multipunto.

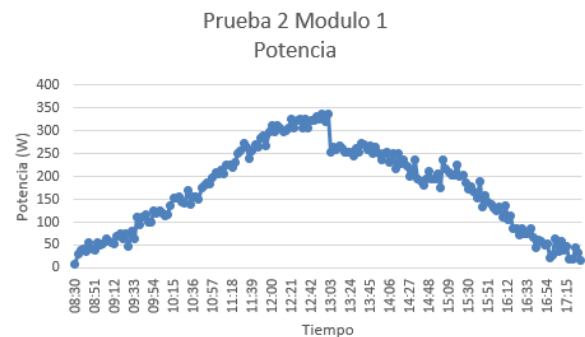
Se llevó a cabo una prueba de monitoreo implementando la topología maestro-esclavo, con el objetivo de validar la capacidad del sistema para realizar mediciones simultáneas en diferentes puntos del arreglo fotovoltaico. Para ello, se instalaron dos módulos de monitoreo, cada uno acoplado a un panel solar de las mismas características descritas en la Tabla 1. La prueba se desarrolló a lo largo de 9 horas bajo condiciones de clima nublado, circunstancia que resultó relevante para evaluar el desempeño y la robustez de los módulos ante variaciones de irradiancia. Durante el ensayo, se cubrió intencionalmente el 20% de la superficie de uno de los paneles, mientras que el segundo panel permaneció operando sin ningún tipo de perturbación, con el objetivo de comparar la respuesta de los módulos ante eventos de sombreado y validar la capacidad del sistema para detectar y registrar de manera precisa las fluctuaciones de producción asociadas tanto a las condiciones ambientales como a intervenciones controladas.



Gráfica 3: Corriente eléctrica Prueba 2 Módulo 1

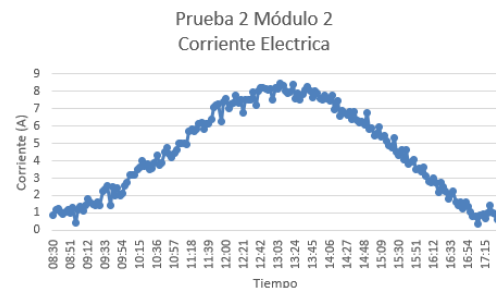
La Gráfica 4 ilustra el comportamiento de la potencia del panel solar a lo largo de la prueba, donde se empleó la corriente monitoreada junto con el valor de V_{mp} de la Tabla 1, siguiendo la metodología descrita en la Fórmula (5) para la estimación de potencia en cada intervalo. Esta representación permite observar en tiempo real la evolución de la producción energética y pone de manifiesto la capacidad del sistema de monitoreo para

identificar variaciones significativas. En particular, se aprecia una reducción en la potencia generada durante un total de 3 horas, periodo en el que una sección del panel fue parcialmente cubierta de manera controlada. Cabe destacar que la literatura reporta que el efecto combinado de sombra parcial y condiciones de nubosidad puede causar una disminución aún más pronunciada en la producción de energía eléctrica, debido a la limitada radiación solar y a las características no lineales de la respuesta de los módulos fotovoltaicos ante estas perturbaciones [12]. Estos resultados confirman la eficacia del sistema para detectar eventos de sombreado parcial y registrar su impacto en la producción eléctrica del panel, incluso bajo condiciones ambientales adversas.



Gráfica 4: Potencia de prueba 2 Módulo 1

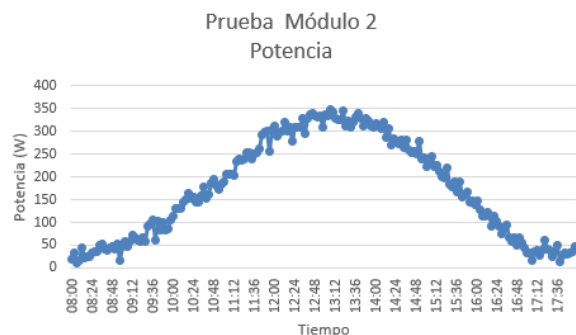
Los resultados obtenidos se contrastaron con las mediciones registradas por el panel que operó sin perturbaciones de sombra, utilizando para ello el módulo esclavo integrado al sistema. Como se muestra en la Gráfica 5, los datos recopilados por este módulo presentan un comportamiento muy similar al esperado bajo las mismas condiciones ambientales, sin evidencia de descensos abruptos en la producción energética. Esta comparación permite destacar la consistencia y precisión del sistema de monitoreo, así como su capacidad para diferenciar con claridad entre la operación normal del panel y los efectos asociados a eventos de sombreado parcial.



Gráfica 5: Corriente eléctrica de prueba 2 Módulo 2.

La potencia obtenida en esta prueba se presenta en la Gráfica 6, utilizando los mismos criterios de cálculo previamente descritos

en la tabla 1 y la Formula (5) para la estimación a partir de la corriente monitoreada y el valor de V_{mp} .



Gráfica 6: Potencia de prueba 2 Módulo 1.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del módulo inalámbrico no invasivo para el monitoreo de la producción energética en sistemas fotovoltaicos demostró ser una alternativa eficiente, flexible y segura en comparación con las soluciones convencionales que requieren la intervención directa de los circuitos eléctricos. Los resultados experimentales confirmaron que, a pesar de que la estimación de la potencia generada se realizó únicamente a partir de la medición de la corriente eléctrica y el valor de V_{mp} proporcionado por el fabricante, el sistema es capaz de proporcionar información confiable y de utilidad práctica para el seguimiento de la producción y la detección de anomalías o caídas de rendimiento. Es importante destacar que, conforme a lo constatado en la segunda prueba bajo condiciones de nubosidad, el módulo mantuvo una alta eficiencia en la medición y registro de datos, detectando con precisión las fluctuaciones asociadas tanto a la reducción de irradiancia como a eventos de sombreado parcial. Esto valida la robustez y capacidad del sistema para operar en escenarios reales donde las condiciones ambientales pueden variar significativamente a lo largo del día.

Si bien es técnicamente viable integrar un sensor de voltaje adicional para obtener un cálculo más preciso de la potencia instantánea, esta opción iría en contra del objetivo principal del proyecto, que es mantener la naturaleza no invasiva del sistema y garantizar que cualquier usuario, sin conocimientos técnicos avanzados, pueda instalar y operar el módulo sin riesgos o complicaciones asociadas a la manipulación de circuitos energizados.

La arquitectura multipunto basada en la topología maestro-esclavo representa un aporte relevante, ya que facilita la monitorización simultánea en distintos puntos de un mismo arreglo fotovoltaico o en varias instalaciones cercanas,

centralizando los datos y permitiendo un análisis integral del desempeño global. La configuración dual del módulo maestro, con almacenamiento tanto en la nube como en local, proporciona robustez ante fallas de conectividad y asegura la integridad del registro histórico de las mediciones.

El presente trabajo sienta las bases para futuras mejoras, entre las que se contempla el desarrollo de una interfaz local en cada nodo que permita a los usuarios establecer criterios clave de monitoreo según sus necesidades específicas, así como la creación de una plataforma centralizada de consulta y análisis accesible vía web o dispositivos móviles. Estas acciones permitirán fortalecer el carácter universal, accesible y escalable del sistema, contribuyendo al avance en la gestión inteligente de la energía solar y al empoderamiento de los usuarios en la supervisión de sus propios sistemas fotovoltaicos.

5. REFERENCIAS

- [1] S. Ahmad, M. Iqbal, M. A. Khan, M. T. Nawaz, y R. M. Meo, "A Review of Monitoring Technologies for Solar PV Systems Using Data Processing Modules and Transmission Protocols," *Sustainability*, vol. 13, Jul. 2021.
- [2] Sharma, M., & Kumar, V. (2021). Monitoring systems for photovoltaic installations: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110-121.
- [3] Miller, T., & Johnson, M. (2022). Impact of advanced technologies on solar energy management. *Journal of Clean Energy Technologies*, 10(3), 187-198.
- [4] M. Aghaei, M. Kolahi, A. Esmailifar, y A. Moradi Sizkouhi, *Autonomous Intelligent Monitoring of Photovoltaic Systems: An In-Depth Multidisciplinary Review*, 2025.
- [5] Wang, Y., & Chen, Z. (2022). Data analysis of monitoring for optimization of photovoltaic systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 144(1), 77-91.
- [6] Lee, J., & Kim, J. (2020). Non-invasive monitoring systems: Technologies and applications. *Sensors*, 20(14), 3880.
- [7] Doe, J., & Smith, A. (2020). Remote monitoring of photovoltaic systems based on IoT. *Journal of Renewable Energy Systems*, 15(3), 245-260.
- [8] Lee, K., & Park, H. (2019). Blockchain-based monitoring system for solar energy. *Energy Informatics Journal*, 12(1), 33-47.
- [9] González, M., & Rodríguez, L. (2021). Intelligent monitoring and control system for photovoltaic plants. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 10(2), 124-138.
- [10] Nguyen, T., & Tran, V. (2018). Real-time monitoring platform for residential photovoltaic systems. *Renewable Energy Journal*, 45(2), 220-234.
- [11] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 2nd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013, pp. 431-433.
- [12] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power-Electronics Simulation Studies," *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, Mar. 1999.