



DISEÑO IoT Y VALIDACIÓN DE SISTEMA DE MEDIDA PARA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

DESIGN AND VALIDATION OF IoT MEASUREMENT SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION

Thiago Angelino dos Santos^{1,*} , Filipe Gomes de Freitas¹ ,
 Diego Lima Carvalho Gonçalves¹ , Luis Miguel Fernández-Ramírez² 

Recibido: 14-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 18-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

El uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para la generación de electricidad está en constante crecimiento en Brasil. Con la reducción del precio de los módulos FV y la implementación del sistema de compensación de energía eléctrica por parte del distribuidor de energía, el consumidor está invirtiendo en microgeneración FV para reducir la factura de energía. El objetivo del presente artículo es desarrollar un sistema embebido en el contexto de Internet de las cosas (IoT). Tener un sistema de monitoreo IoT aplicado a un sistema FV conectado a la red en una institución educativa ayuda a enseñar conceptos tanto de IoT como de generación FV. El sistema se basa en la placa de desarrollo ESP32 para la adquisición de tensión y corriente continua generada por un sistema FV de 1,35 kWp conectado a la red e instalado en el IFCE. Esta propuesta ofrece una solución educativa de bajo costo, con código abierto y hardware programable, que envían los datos a una base de datos en la nube, lo que permite el acceso remoto desde cualquier parte del mundo. Posteriormente, con una metodología de análisis de datos fue posible validar los valores medidos con el inversor instalado con un error inferior al 1 % para la tensión y la corriente adquiridas durante un día. Con este resultado se concluye que el sistema IoT diseñado puede ser utilizado para la medición en sistemas FV.

Palabras clave: ESP32, IoT, medida, fotovoltaica, energía, generación

Abstract

The use of photovoltaic (PV) systems for electricity generation is constantly growing in Brazil. With the reduction in the price of PV modules and the implementation of the electric power compensation system by the power distributor, the consumer is investing in PV microgeneration to reduce the electricity bill. This article aims to develop an embedded system in the context of the Internet of Things (IoT). Having an IoT monitoring system applied to a grid-connected PV system in an educational institution helps teach concepts such as IoT and PV generation. The system is based on the ESP32 development board for acquiring DC voltage and current generated by a 1.35 kWp PV system connected to the grid and installed at the IFCE. This proposal offers a low-cost educational solution using open source and programmable hardware, which sends the data to a database in the cloud, enabling remote access worldwide. Then, using the data analysis methodology, it was possible to validate the values measured with the inverter installed with an error below 1

Keywords: ESP32, IoT, measurement, photovoltaic, energy, generation

^{1,*} Academic Master's Degree in Renewable Energy (PPGER). Federal Institute of Ceará (IFCE). Maracanaú Campus, Ceará, Brazil. Autor para correspondencia ✉: thiagoangelinos@gmail.com

² Research Group in Electrical Technologies for Sustainable and Renewable Energy. Department of Electrical Engineering, University of Cadiz (UCA). Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Cádiz, Spain

Forma sugerida de citación: Dos Santos, T. A.; De Freitas, F. G.; Carvalho Gonçalves, D. L. y Fernández-Ramírez, L. M. "Diseño IoT y validación de sistema de medida para generación fotovoltaica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 44-52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.04>.

1. Introducción

La primera celda solar moderna, que tiene un área de dos centímetros cuadrados, fue introducida en 1954 con una eficiencia de 6 % y una potencia de 5 mW, tal como se describe en [1]. Se observó un avance significativo en el desarrollo del mercado de PV, identificado en [2], a partir de incremento en la producción china. Por octavo año consecutivo, Asia eclipsó a todas las otras regiones en nuevas instalaciones, con cerca del 58 % de las adiciones globales; aun excluyendo a China, Asia fue responsable de alrededor de 23 % de la nueva capacidad instalada en 2020. Asia fue seguido por América (18 %), que se ubicó por delante de Europa (16 %). China continuó dominando el mercado global (y de fabricación de FV solares), con una participación cercana al 35 % (elevándose desde 27 % en 2019). En 2021, la capacidad global estimada fue 760 gigawatts, como se muestra en [3].

Además de reducir el costo de los módulos FV, la generación distribuida en Brasil se ha convertido en una inversión atractiva en energía solar. Actualmente, el consumidor puede generar electricidad y usar el sistema de compensación para reducir el costo de energía consumida directamente en la factura. La compensación permite que la energía que excede el consumo para ese mes pueda utilizarse dentro de un período máximo de cinco años. Las condiciones para conectarse a la estructura convencional de distribución de electricidad fueron establecidas el 12 de abril de 2012, por la Agencia Nacional de Energía Eléctrica [4].

Saber cuánto generará el sistema FV por mes es una de las primeras preocupaciones del consumidor final. El ingeniero diseña el sistema, pero factores externos tales como el polvo, las fallas en el sistema, el desgaste de material y las condiciones del clima pueden alterar la generación de energía estimada en el diseño original. Con un sistema de monitoreo aplicado al de generación FV, es posible monitorear la producción y el consumo de electricidad. De esta manera, se identifican comportamientos atípicos para ese sistema: Cuanto más rápida sea esta identificación, menor será el daño al consumidor final.

Con respecto al monitoreo de datos vía Internet, el número de dispositivos conectados a la nube está aumentando y, en consecuencia, el volumen de datos ha crecido sustancialmente. Nuestras vidas diarias están rodeadas de información que es actualizada constantemente. Cuando se cambia un estado en una red social, se produce un flujo de información que genera actualizaciones a la base de datos del usuario. Esta forma dinámica de obtener información rápidamente, de manera accesible y actualizada no aplica solamente a las redes sociales o al periodismo. Considerada la cuarta revolución industrial, la Industria 4.0 ha venido ganando prominencia y promete tener un impacto más profundo y exponencial que las revoluciones indus-

triales previas. De acuerdo con Vitalli [5], uno de los pilares de la Industria 4.0 es el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things* por sus siglas en inglés). Entre los dispositivos disponibles en el mercado para aplicaciones IoT están el ESP32 y el ESP-WROOM (modelo usado en este trabajo), que son utilizados constantemente en investigación académica debido a su fácil programación.

Los sistemas IoT son aplicados para facilitar la comunicación entre los equipos y los seres humanos en varias áreas, tales como hospitales [6], procesos de manufactura [7], gestión de desechos [8], así como también energías renovables [9], [10].

La plataforma de desarrollo ESP32 ha sido utilizada en proyectos IoT alrededor del mundo. Este dispositivo se usó para constituir un sistema de comunicación híbrido y un sistema de transmisión de datos en redes IoT [11]. Además de la comunicación wifi, el ESP32 también ofrece comunicación Bluetooth. Un sistema de control de ventanillas de vehículos fue desarrollado en [12] con comunicación Bluetooth.

Asimismo, el ESP32 fue empleado en una red de monitoreo de temperatura, humedad y calidad del aire en un centro de datos, para automatizar la activación y desactivación del sistema de enfriamiento, ventilación y filtrado del aire [13].

1.1. Trabajos relacionados

El ESP32 y el ESP8266 fueron considerados en [14] para construir una red IoT para medir datos de clima y la temperatura de módulos FV. La comunicación usada entre el ESP32 y el ESP8266 fue wifi.

En [15] se presenta un análisis comparativo y una aplicación práctica del módulo microcontrolador ESP32 para IoT. El artículo demostró que el ESP32 es una excelente opción para sistemas IoT, ya que presenta ventajas en desempeño y precio en comparación con los otros analizados. Su desempeño refleja su confiabilidad, asegurando que el sistema siempre esté operativo y corriendo. Por lo tanto, ellos pueden ser usados en sistemas críticos tales como el propuesto en [16] para monitorear fugas de gas licuado de petróleo (*liquefied petroleum gas*, LPG, por sus siglas en inglés).

En sistemas FV, el ESP32 fue utilizado en un sistema de control de bombeo de agua alimentado por un generador solar [17]. En [18] se desarrolló un servidor web con un ESP32 para monitorear y recolectar data de un sistema FV. La data fue almacenada en un archivo de texto y grabada directamente en la tarjeta de memoria SD. Los datos pueden ser recuperados, y el archivo de texto descargado a una página web.

Fue posible verificar el comportamiento real de los módulos FV a través de componentes de bajo costo, como puede verse en las curvas del sistema de seguimiento IV (corriente-voltaje) y PV (potencia-voltaje) construidas en [19]. También es posible moni-

torear el sistema FV con equipos de bajo costo [20], [21]. Este trabajo propuso el desarrollo y validación de un sistema IoT didáctico con hardware programable y de código abierto, apuntando a una mayor flexibilidad en la recolección y envío de datos a una base de datos. La validación fue hecha desde un inversor comercial con tecnología IoT. Así como el software sirvió para apoyar la enseñanza [22]. El sistema diseñado en esta investigación puede ser empleado en el salón de clase para enseñar sobre sistemas embebidos, internet de las cosas o energías renovables, como ejemplo de un sistema de monitoreo didáctico.

La Tabla 1 reúne algunos artículos que usan sistemas de monitoreo, aplicados o no a generación FV. Se observó el empleo de conexiones a internet a través de diferentes dispositivos para comunicación, procesamiento y envío de datos. La mayoría de los artículos presentados (67 %) no utilizaron un sistema de validación para los datos recolectados, especialmente en sistemas para medir variables eléctricas (voltaje y corriente, por ejemplo), como en el caso de este trabajo, mostrando la contribución de este artículo en esta área.

Tabla 1. Comparación de artículos de monitoreo similares

Artículo	Dispositivo	Método de validación
[23]	SamD21G	No aplicable
[24]	Arduino Mega 2560 + ESP8266	No aplicable
[25]	ESP32	Por equipo comercial
[26]	34970A	No aplicable
[20]	Raspberry Pi	No aplicable
[21]	SanUSB + Wi-Fi modem	Sensor de temperatura VA6510

Alves *et al.* [27] analizaron una situación a través de la ingeniería de entrenamiento didáctico (*Didactic Training Engineering*, DTE, por sus siglas en inglés), y encontraron que esta estructura facilita la mediación y el aprendizaje didáctico. El sistema propuesto puede ser usado para DTE en energías renovables, programación o sistemas embebidos. Otra aplicación para este proyecto es didáctica profesional (*Professional Didactics*, PD, por sus siglas en inglés). Alves [28] resaltó el uso de tecnología para proveer un entendimiento de las nociones discutidas en clase. De forma similar, los profesores podían iterar con los estudiantes utilizando el sistema propuesto en este trabajo.

Esta investigación apunta a diseñar, desarrollar y validar un sistema IoT didáctico para monitorear el voltaje y la corriente generados por los módulos FV. El objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema didáctico fácil de reproducir, para diseminar el conocimiento en esta área de investigación, facilitando la adquisición de datos en plantas de generación solar fotovoltaica. Se aplican sensores de bajo costo para medir la corriente y el voltaje del sistema FV. Los datos obtenidos fueron comparados con los datos recolectados por el inversor FV instalado, verificando el error entre los sistemas para validar el sistema desarrollado.

Por ejemplo, el sistema desarrollado en esta investigación puede ser aplicado para verificar la potencia real generada por plantas FV en [29].

2. Materiales y métodos

2.1. Problema y metodología

Esta sección presenta las etapas de desarrollo del proyecto, presentando los materiales y métodos empleados. El sistema propuesto puede dividirse en cinco partes:

1. Sistema embebido con conexión wifi
2. Almacenamiento de datos en la nube
3. Detección
4. Data suministrada por el inversor
5. Programación del sistema embebido

2.1.1. Sistema embebido con conexión wifi

Varios dispositivos de bajo costo pueden proveer conexión a internet y realizar acciones preprogramadas. Con estos dispositivos es posible transformar un sistema de adquisición de datos local en un sistema IoT que alimente constantemente una base de datos en la nube.

La familia de dispositivos Raspberry Pi, desarrollada en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, tiene el hardware integrado en una sola tarjeta y ranura de tarjeta de memoria, interfaz USB, HDMI, pines de entrada/salida, interfaz serial y módem wifi [30]. Estos dispositivos pueden integrarse fácilmente en una red IoT. En [31] se utilizó un Raspberry para monitorear corriente y voltaje en una planta FV de bombeo.

Algunos dispositivos de la plataforma Arduino [32], tales como ARDUINO UNO wifi REV2, están especialmente diseñados para aplicaciones IoT. Estos dispositivos tienen una plataforma de programación (Arduino IDE) amigable con el usuario en C++ con modificaciones menores.

Otros dispositivos ampliamente considerados, por su bajo costo, son los microcontroladores fabricados por Espressif [33]. Estos controladores, como el ESP32, permiten a los microcontroladores conectarse a una red inalámbrica. El fabricante suministra algunas versiones de hardware para ser usadas como se requiera.

La Tabla 2 muestra una comparación entre el ESP32 y una versión previa de los módulos IoT ESP8266 de Espressif (2014).

Tabla 2. Comparación entre ESP32 y ESP8266

ITEM	ESP32	ESP8266
<i>Clock</i>	160 MHz	80 MHz
<i>Wi-Fi</i>	Si	Si
<i>Bluetooth</i>	Si	No
RAM	512 KB	160 KB
<i>FLASH</i>	16 Mb	16 Mb
ADC	18	1
DAC	2	0

ADC – Analógico/Digital
 DAC – Convertidor Digital/Analógico

Note que el ESP32 tiene mayor poder de procesamiento y almacenamiento en comparación al ESP8266. Por tanto, en esta investigación se utilizó el ESP32 para el sistema de monitoreo propuesto con conexión a internet.

2.1.2. Almacenamiento de datos en la nube

Algunas soluciones disponibles en el mercado son AWS IoT Services (Amazon Web Services), CloudMOTT y Ubidots. AWS IoT es un servicio especializado en tecnología IoT, del borde a la nube, ofrecidos por la compañía Amazon [34].

CloudMQTT apunta a facilitar el envío de mensajes, a través del protocolo MQTT, entre dispositivos en un sistema IoT. El soporte 24/7 ofrece conexión gratis para cinco usuarios a una velocidad de 10 Kbit/s [35].

Ubidots es una plataforma que permite conectar hardware y/o servicios digitales de datos a la nube, con su API de fácil integración. Tiene una plataforma editable para las necesidades del proyecto y una aplicación móvil gratuita. La licencia educativa otorga el derecho de conectar hasta veinte dispositivos con hasta diez sensores cada uno [36].

Sin embargo, este trabajo propone la creación de un sistema similar al utilizado en [7], pero sin el uso de almacenamiento local en una tarjeta SD. Toda la data es enviada a un servidor en la nube para ser comparada con la suministrada por el inversor instalado en el sistema FV.

ThingSpeak™ [37] es un servicio gratuito y configurable de plataforma de analítica empleada frecuentemente para el prototipaje de sistemas IoT, que permite acumular, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real con almacenamiento en la nube. ThingSpeak proporciona vistas instantáneas de los datos enviados por sus dispositivos a la base de datos de ThingSpeak a través de la plataforma web disponible para los usuarios. Por lo tanto, este trabajo usó la plataforma ThingSpeak para almacenamiento de datos en la nube.

2.1.3. Detección

Dos variables son esenciales para analizar la potencia: voltaje y corriente. El sistema FV empleado en este trabajo consta de un conjunto (secuencia) de cinco módulos PV en serie, totalizando 1.35 kWp. Algunas características técnicas de los módulos FV Jinkosolar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características eléctricas del módulo FV utilizado en este trabajo

ITEM	STC	NOCT
<i>Potencia máxima (Pmax)</i>	270 Wp	200 Wp
<i>Voltaje para la potencia máxima (Vmp)</i>	31.7 V	29.4 V
<i>Corriente para la potencia máxima</i>	8.52 A	6.80 A
<i>Voltaje de circuito abierto (Voc)</i>	38.8 V	35.4 V
<i>Corriente de cortocircuito</i>	9.09 A	7.38 A
<i>Máxima corriente del fusible en serie</i>	15 A	15 A

STC - Condiciones de la prueba estándar
 NOCT - Temperatura nominal de operación de la celda

La medición del voltaje de los módulos se hizo en la entrada DC del inversor. El voltaje de circuito abierto, el voltaje más alto suministrado por el sistema, puede calcularse mediante la Ecuación (1):

$$V_{OUTPUT(max)} = 5 * 38.8 = 194V \tag{1}$$

La diferencia de voltaje generada por la secuencia en el panel FV (V_{FV}) se mide mediante un divisor de voltaje. Si se toma en cuenta que el voltaje en la entrada analógica del ESP32 puede ser hasta 3.3 V (V_{OUT}), los resistores del divisor de voltaje pueden calcularse utilizando la Ecuación (2):

$$R_1 = \frac{(V_{FV}V_{OUT})}{V_{OUTPUT(max)}}R_2 \tag{2}$$

Para este caso $R_1 = 57.78 * R_2$. R_1 y R_2 son resistores para el divisor de voltaje mostrado en la Figura 1.

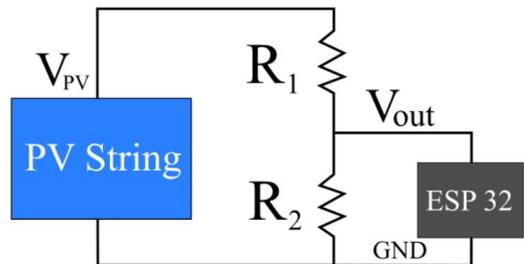


Figura 1. Esquema del divisor de voltaje usado en el sistema para leer el voltaje FV

El V_{out} está conectado directamente al pin ESP32 para medir el voltaje proporcional al voltaje de la secuencia del módulo FV. La relación entre ellos es $V_{PV} = 58.79 * V_{out}$.

La medición de corriente se hace con el módulo sensor de corriente ACS712-20A. Este módulo se muestra en la Figura 2, resaltando las conexiones de sus pines. El arreglo escogido para el sensor es entre la entrada DC del inversor y la caja de interruptores de circuito, de manera que la medición se haga en paralelo con el inversor y lo más cercana posible. Por lo tanto, el proyecto del sistema de detección mide la potencia suministrada por la secuencia FV, y la compara con la registrada por el inversor para validar el sistema.

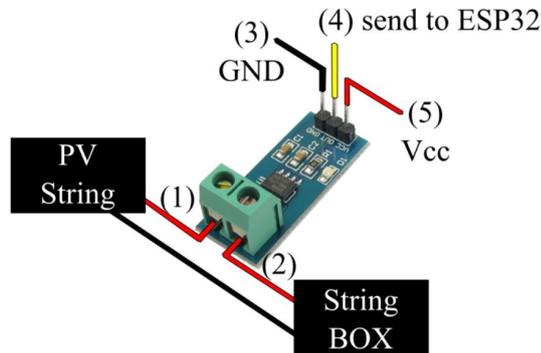


Figura 2. Esquemático de la instalación del ACS712-20A

Este sensor tiene una salida analógica con una ganancia de 66 mV/A, que puede ser leída en el pin de salida del módulo, indicado por el número (4) en la Figura 2. El voltaje de operación del módulo es 5VDC (5). Los pines (1) y (2) corresponden a la entrada DC del inversor y al interruptor del circuito de la caja de secuencia. El pin (3) corresponde a la referencia cero de la fuente (GND) que alimenta al sensor.

2.1.4. Data suministrada por el inversor

El inversor utilizado en este trabajo para comparar y validar el sistema con hardware es el modelo PHB1500-NS, del fabricante PHB (2020). Este equipo tiene un sistema de monitoreo wifi con data en tiempo real disponible para el usuario en la página del fabricante por medio de login y password. Algunas características de este inversor conectado a la red se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del inversor PHB1500- NS

DESCRIPCIÓN	VALOR
Potencia máxima	1950 W
Voltaje máximo	450 V
Voltaje Inicial de Generación (DC)	80 V
Corriente (DC) máxima	10 A
MPPT	1/1
Potencia AC	1500 W
Voltaje AC de salida	60 Hz; 220 V
Interfaz	Wi-Fi, USB and RS485

Note que este modelo tiene, además de las interfaces para configurar la operación, una interfaz wifi utilizada en el sistema de monitoreo, que envía la data

recolectada al servidor del fabricante. El fabricante proporciona una página web para acceder a la data de generación recolectada por el inversor.

Con el sistema propuesto en este trabajo, es posible programar el protocolo de cómo la data se recolecta y se envía a la nube, permitiendo su integración con el servidor preferido por el usuario. De esta manera, el usuario puede programar el intervalo de tiempo en que quiere enviar esta data a cualquier servidor, por ejemplo, para investigar la detección de fallas con algoritmos inteligentes o cualquier investigación donde sea necesaria la adquisición de datos.

2.1.5. Programación del sistema embebido

El uso del hardware programable (ESP32) permite la selección de este tiempo de acuerdo con la necesidad del usuario y el servidor para enviar la data, permitiendo investigaciones futuras. El firmware desarrollado y grabado en el ESP32 consiste de una rutina para enviar el promedio de las mediciones cada minuto. Esto se muestra en el diagrama en la Figura 3.

Puede observarse en el diagrama de flujo de la Figura 3 que el programa comienza conectando el dispositivo al internet vía wifi para acceder al servidor NTP donde tienen acceso al tiempo local y, posteriormente, enviar el valor promedio de las mediciones a un servidor en la nube, el ThingSpeak en este caso, cada minuto.

El uso del ESP32 también permite reportar información acerca de la generación y fallas eventuales en tiempo real, de una manera personalizada. Sin embargo, este trabajo se centra en validar el sistema a través de la comparación con la data del inversor, dejando esta funcionalidad para trabajos futuros.

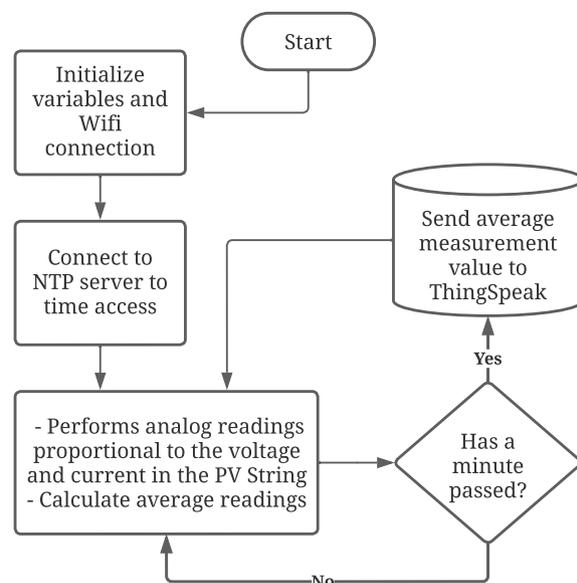


Figura 3. Diagrama de flujo del código fuente (firmware)

3. Resultados y discusión

Con el fin de asegurar la medición correcta de las variables eléctricas, voltaje y corriente, se realizaron pruebas para calibrar los sensores con el ESP32 con un multímetro digital, como se observa en la Figura 4.

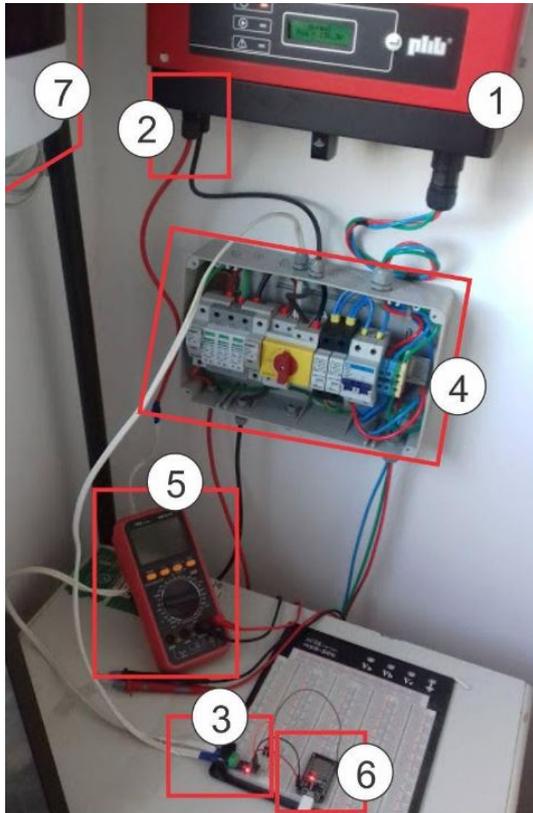


Figura 4. Esquema de la instalación del módulo sensor de corriente ACS712-20A

El sensor de corriente y el divisor de voltaje generan voltajes proporcionales a los valores de corriente y voltaje de la secuencia FV, respectivamente. Las pruebas buscan calibrar el sensor de corriente y el divisor de voltaje con resistores para asegurar la correcta proporcionalidad entre el valor enviado al ESP32 y el valor de corriente y voltaje generado por la secuencia FV. Una vez calibrados, esta data se compara con los valores de voltaje y corriente leídos y almacenados por el inversor comercial del sistema FV.

El montaje que se observa en la Figura 4 muestra el sensor de corriente (3) en serie con un multímetro (5) entre la entrada DC (2) del inversor (1) y la caja de protección (4), que contiene interruptores de circuito y el interruptor principal. La corriente, generada por la secuencia FV, pasa a través de la caja protectora y es leída por el sensor, que a su vez envía un voltaje proporcional a la corriente a uno de los puertos de entrada analógicos de la tarjeta de desarrollo ESP-WROOM-32 (6). Este sistema será instalado en un marco de protección fijado a la pared (7), para albergar el sistema

desarrollado en este trabajo. Este montaje constituye un prototipo inicial para ser probado en el laboratorio. Posteriormente, se ensambló una placa para extender las conexiones del ESP-WROOM-32 para el divisor de voltaje y el sensor de corriente, como se observa en la Figura 5.

Esta placa de extensión (Figura 5b) fue desarrollada para conectar el divisor de voltaje para adquirir el voltaje de la secuencia FV, y el sensor de corriente para adquirir la corriente generada por la secuencia FV, hacia el ESP32. La potencia para alimentar la tarjeta viene de una fuente externa de 5 V (Figura 5a) conectada a la tarjeta de desarrollo ESP-WROOM-32. El divisor de voltaje y el sensor de corriente fueron instalados dentro de la caja de protección y el interruptor principal presentado en el ítem 4 de la Figura 4, y conectados a la tarjeta de conexión del ESP32 vía un cable de red (Figura 5b).

Con el sistema IoT de bajo costo, desarrollado en este trabajo, es posible obtener data de corriente y voltaje generados por la secuencia de cinco módulos FV en serie, para compararlos con la data enviada a la nube por el inversor instalado en la planta FV. En la Figura 6 puede verse el gráfico comparativo entre los valores de corriente adquiridos por el inversor y el sistema IoT desarrollado en este trabajo.

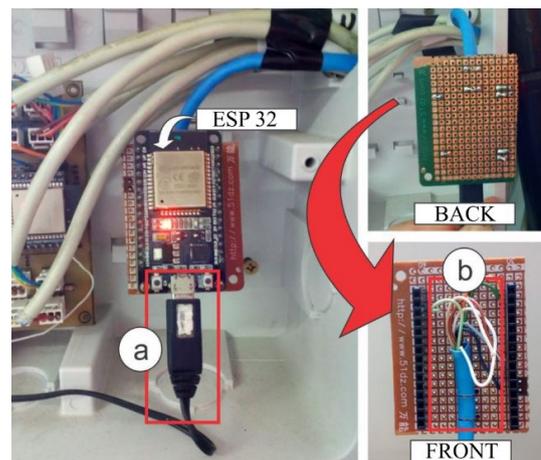


Figura 5. ESP32 y placa de extensión

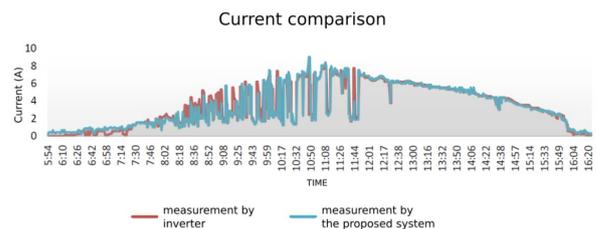


Figura 6. Comparación de corriente entre el inversor y el sistema propuesto

De forma similar a la corriente, la comparación de voltaje puede verse en la Figura 7.

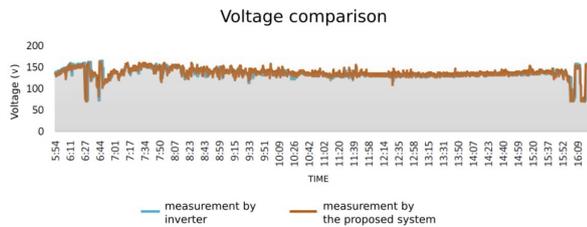


Figura 7. Comparación de voltaje entre el inversor y el sistema propuesto

A partir de la data recolectada por el inversor y el sistema de bajo costo, además de generar los gráficos mostrados en la Figura 6 y en la Figura 7, se calculó el error como la suma de una cantidad definida de la data recolectada por cada sistema en el mismo intervalo de tiempo. Se obtuvo un error porcentual menor a 1 % para corriente y voltaje a lo largo del día. En el día mostrado en los gráficos de la Figura 6 y la Figura 7, se observó un error de 0,26 % para el voltaje y de 0,56 % para la corriente.

4. Conclusiones

La investigación y uso de los sistemas IoT de monitoreo aplicados a microgeneración FV está creciendo de manera importante, y su desarrollo es necesario en la medida que los sistemas FV siguen convirtiéndose en una manera viable de generar electricidad. Los inversores FV modernos tienen tecnología IoT para enviar data de generación al servidor del fabricante. Sin embargo, con el sistema propuesto en este trabajo, es posible configurar cómo esta información es recolectada y dónde se publica en la nube, generando flexibilidad en la recolección de datos para investigaciones futuras.

En este trabajo se implementó un sistema didáctico de bajo costo utilizando la tarjeta de desarrollo con microcontrolador ESP32, el sensor de corriente ACS712-20A y los resistores del divisor de voltaje. Con el sistema en operación, la data recolectada fue comparada con la data suministrada por el inversor FV, permitiendo la validación del sistema propuesto.

De los resultados obtenidos, considerando que la validación arrojó un error menor a 1 %, puede concluirse que el sistema didáctico de bajo costo con el ESP32 puede ser usado para medir plantas FV similares a esta. Este sistema propuesto ayuda a enseñar conceptos tanto de IoT como de generación FV, y alienta a la comunidad académica a investigar sobre energías renovables en cursos técnicos y universitarios.

Para trabajos futuros, puede aplicarse inteligencia artificial a los datos para detectar fallas. Adicionalmente, el proyecto propuesto puede ayudar a medir y reportar a usuarios y mantenedores, en tiempo real y de manera personalizada, el desempeño y cualquier falla en la generación eléctrica de los sistemas FV analizados.

Finalmente, puede concluirse que es posible desarrollar y aplicar un sistema de monitoreo didáctico, con la calibración y validación apropiadas para asistir la investigación y enseñanza académica relacionadas con los sistemas IoT de monitoreo aplicados a plantas FV instaladas.

Referencias

- [1] A. M. Vallêra and M. C. Brito, “Meio século de história fotovoltaica,” *Gazeta de Física*, vol. 1, no. 2, p. 17, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WgwXgP>
- [2] J. T. Pinho, M. A. Galdino *et al.*, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPEL - CRESEB, 2014, vol. 1. [Online]. Available: <https://bit.ly/3OAYu3Z>
- [3] H. E. Murdock, D. Gibb, T. Andre, J. L. Sawin, A. Brown, L. Ranalder, U. Collier, C. Dent, B. Epp, C. Hareesh Kumar *et al.*, “Renewables 2021-global status report,” *Global ENR Report 2022*, 2021. [Online]. Available: <https://t.ly/PW1K>
- [4] B. Rubim, “Tudo o que você precisa saber sobre a revisão da ren 482,” *Ecori Energia Solar*, vol. 20, p. 12, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3btlyTZ>
- [5] R. Vitalli, “Os 10 pilares de indústria 4.0 - artigos - indústria 4.0,” 2018, accessed: 2022-05-14. [Online]. Available: <https://t.ly/J9i6>
- [6] A. Prudenzi, A. Fioravanti, and M. Regoli, “A low-cost iot solution for power availability improvement in hospitals,” in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18), Salamanca (Spain), 21th to 23th March*, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj16.389>
- [7] C. Gamarra, M. Ortega, E. Montero, and J. Guerrero, “Innovative planning synergies between manufacturing processes and microgrids,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 939–944, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj14.526>
- [8] N. S. Kumar, B. Vuayalakshmi, R. J. Prarthana, and A. Shankar, “Iot based smart garbage alert system using arduino uno,” in *2016 IEEE region 10 conference (TENCON)*. IEEE, 2016, pp. 1028–1034. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848162>
- [9] F. T. Brito, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, “Controllogger: A remote monitoring system

- for decentralized renewable energy sources,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 10, p. 432, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj10.432>
- [10] R. I. Pereira, P. C. Carvalho, and S. C. Jucá, “Wifi data acquisition system and online monitoring applied to thermoelectric microgeneration modules,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, no. 13, pp. 1–6, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj13.370>
- [11] A. Saveliev, D. Malov, M. Tamashakin, and V. Budkov, “Service and multimedia data transmission in iot networks using hybrid communication devices,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 113. EDP Sciences, 2017, p. 02010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711302010>
- [12] J. Purba and D. Wahyudin, “Bluetooth low energy (ble) based power window system,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 384, no. 1. IOP Publishing, 2018, p. 012029. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/384/1/012029>
- [13] J. I. Vega-Luna, F. J. Sánchez-Rangel, G. Salgado-Guzmán, J. F. Cosme-Aceves, V. N. Tapia-Vargas, and M. A. Lagos-Acosta, “Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 24, pp. 87–96, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.09>
- [14] R. I. Pereira, S. C. Jucá, P. C. Carvalho, and C. P. Souza, “Iot network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8896816>
- [15] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things,” in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. IEEE, 2017, pp. 143–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- [16] A. H. Abdullah, S. Sudin, M. I. M. Ajit, F. S. A. Saad, K. Kamaruddin, F. Ghazali, Z. A. Ahmad, and M. A. A. Bakar, “Development of esp32-based wi-fi electronic nose system for monitoring lpg leakage at gas cylinder refurbish plant,” in *2018 international conference on computational approach in smart systems design and applications (ICASSDA)*. IEEE, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSDA.2018.8477594>
- [17] I. Allafi and T. Iqbal, “Design and implementation of a low cost web server using esp32 for real-time photovoltaic system monitoring,” in *2017 IEEE electrical power and energy conference (EPEC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286184>
- [18] S. B. Biswas and M. T. Iqbal, “Solar water pumping system control using a low cost esp32 microcontroller,” in *2018 IEEE Canadian conference on electrical & computer engineering (CCECE)*. IEEE, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2018.8447749>
- [19] V. Leite, J. Batista, F. Chenlo, and J. L. Afonso, “Low-cost instrument for tracing current-voltage characteristics of photovoltaic modules,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24084/repqj10.565>
- [20] R. I. Pereira, I. M. Dupont, P. C. Carvalho, and S. C. Jucá, “Iot embedded linux system based on raspberry pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant,” *Measurement*, vol. 114, pp. 286–297, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033>
- [21] R. I. S. Pereira, S. C. S. Juca, and P. C. M. de Carvalho, “Online monitoring system for electrical microgeneration via embedded wifi modem,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3124–3129, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7587611>
- [22] E. Perge, “Practical application of computer software in visual education.” *Acta Didactica Napocensia*, vol. 1, no. 2, pp. 50–55, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/39Nx4sZ>
- [23] M. Muttillio, T. de Rubeis, D. Ambrosini, G. Barile, and G. Ferri, “Sensor monitoring system for pv plant with active load,” in *2019 IEEE 8th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*. IEEE, 2019, pp. 124–127. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IWASI.2019.8791248>
- [24] N. Rouibah, L. Barazane, A. Mellit, B. Haggi, and A. Rabhi, “A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using iot technique,” in *2019 International conference on wireless technologies, embedded and intelligent systems (WITS)*. IEEE, 2019, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723724>

- [25] R. I. Pereira, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, "Iot embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants," *Measurement*, vol. 142, pp. 195–212, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.085>
- [26] F. Harrou, A. Dairi, B. Taghezouit, and Y. Sun, "An unsupervised monitoring procedure for detecting anomalies in photovoltaic systems using a one-class support vector machine," *Solar Energy*, vol. 179, pp. 48–58, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.045>
- [27] F. R. V. Alves, R. C. de SOUSA, and F. C. F. Fontenele, "Didactical engineering of the second generation: A proposal of the design and a teaching resource with the support of the geogebra software in brazil." *Acta Didactica Napocensia*, vol. 13, no. 2, pp. 142–156, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24193/adn.13.2.10>
- [28] F. R. V. Alves, "The professional didactics (pd) and didactics of sciences (ds) in brazil: some implications for the professionalization of the science teacher." *Acta Didactica Napocensia*, vol. 11, no. 2, pp. 105–120, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24193/adn.11.2.9>
- [29] W. Pavon, E. Inga, and S. Simani, "Optimal distribution network planning applying heuristic algorithms considering allocation of PV rooftop generation," *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272062>
- [30] RASPBERRY, "Buy a Raspberry Pi - Raspberry Pi," accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/66e0>
- [31] I. Costa, J. R. Sousa, S. C. Jucá, R. Pereira, and A. Alexandria, "Monitoramento iot de planta de bombeamento fotovoltaico utilizando sistema embarcado linux," *Enciclopedia Biósfera*, vol. 18, no. 37, pp. 349–363, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2021C30
- [32] ARDUINO, "Arduino hardware | arduino," 2022, accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/2qmR>
- [33] ESPRESSIF, "Development boards | espressif systems," accessed: 2022-06-16. [Online]. Available: <https://t.ly/mIGV>
- [34] AWS, "Aws iot - internet of things - amazon web services," 2022, accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/gyWf>
- [35] CLOUDMQTT, "Cloudmqtt - hosted message broker of internet of things," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/FTrN>
- [36] UBIDOTS, "Iot platform | internet of things | ubidots," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/RYIE>
- [37] THINGSPEAK, "Iot analytics - thingspeak internet of things," accessed: 2022-05-02. [Online]. Available: <https://t.ly/tnqU>