

Implementación de un sistema electrónico didáctico para la captación de energía solar fotovoltaica

Manotoa Lema, Gissela Beatriz.

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnóloga Superior en Automatización e Instrumentación

Mgtr. Calvopiña Osorio, Jenny Paola

27 de agosto de 2026

Informe de análisis
Compilatio Magister+ | ESPF-ECU

tesis_v1
ID : ca13db1c3e04d3a11bcf3fc89acb76acb2f38926

6%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : tesis_v1.txt
Tamaño del archivo original : 11,81 MB
Número de palabras : 19.840

Depositante : JENNY PAOLA CALVOPIÑA OSORIO
Fecha de depósito : 26 de agosto de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 26 de agosto de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 2%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 2%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 2%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 1%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Firmado electrónicamente por:
JENNY PAOLA
CALVOPIÑA OSORIO

Mgtr. Calvopiña Osorio, Jenny Paola
Directora
C.C.: 0503390239

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Implementar Un Sistema Electrónico Didáctico Para La Captación De Energía Solar"** fue realizado por la señorita **Manotoa Lema, Gissela Beatriz,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga,27 de agosto del 2026

JENNY PAOLA CALVOPIÑA OSORIO

Mgtr. Calvopiña Osorio, Jenny Paola

Directora

C.C.: 0503390239

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Manotoa Lema, Gissela Beatriz**, con cédula de ciudadanía n°1850091123, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación**: Implementación de un sistema electrónico didáctico para la captación de energía solar fotovoltaica** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 27 de agosto del 2026



Manotoa Lema, Gissela Beatriz

C.C.:1850091123

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación

Autorización de Publicación

Yo **Manotoa Lema, Gissela Manotoa**, con cédula de ciudadanía n°1850091123, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo integración curricular: **Implementar Un Sistema Electrónico Didáctico Para La Captación De Energía Solar Fotovoltaica** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 27 de agosto del 2026

GISSELA BEATRIZ
MANOTOA LEMA

Manotoa Lema, Gissela Beatriz

C.C.:1850091123

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para continuar en cada etapa de este camino. A mi madre, Yolanda Lema, por su amor, esfuerzo, apoyo y confianza, quien ha sido mi principal motivación para seguir adelante y alcanzar esta meta. A mis queridos abuelitos, por su cariño, consejos y por su apoyo incondicional, siendo una parte fundamental en mi vida y en este camino. A mis amigos, por acompañarme durante este proceso, por sus palabras de ánimo, apoyo y por compartir conmigo momentos que hicieron más llevadero este camino. Y especialmente a mi amiga, la pequeña Eve, mi compañera de aventuras, por estar presente y hacer más especiales tantos momentos. Finalmente, dedico este logro a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que pudiera alcanzar esta meta.

Manotoa Lema Gissela Beatriz

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta etapa de mi formación académica. A mi madre por su amor, esfuerzo, apoyo y confianza, que han sido fundamentales para seguir adelante y alcanzar esta meta.

De manera especial, agradezco a todos los ingenieros que, mediante sus conocimientos, enseñanzas y experiencias, han contribuido a mi formación académica y profesional. En especial, a mi tutora académica, Ing. Paola Calvopiña, por su apoyo, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo, así como por compartir sus conocimientos y motivarme a superar cada desafío. A mis dos grandes amigos, Evelyn y Rafael, por su amistad, sus consejos, apoyo y por estar presentes en los momentos buenos y difíciles, haciendo de este camino una experiencia más especial. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto.

Manotoa Lema Gissela Beatriz

Índice de contenidos

Carátula 1
Reporte de verificación de contenido 2
Certificación 3
Responsabilidad de Autoría 4
Autorización de Publicación 5
Dedicatoria 6
Agradecimiento 7
Índice de contenidos 8
Índice de tablas 11
Índice de figuras 13
Resumen 15
Abstract 16
Capítulo I 17
Introducción 17
Planteamiento del problema 19
Formulación del problema o pregunta de investigación 23
Objetivos 23
Objetivo general *23*
Objetivos específicos *23*
Justificación 24
Capítulo II 26
Estado del arte 26
Marco teórico 31

Energía solar fotovoltaica 31
Sistema fotovoltaico autónomo 31
Panel fotovoltaico 33
Controlador de carga PWM 33
Batería y almacenamiento de energía 33
Inversor DC/AC 34
Cargas eléctricas de corriente alterna 35
Variables eléctricas 35
Analizador de energía SENTRON PAC3100 36
Microcontrolador ESP32 37
Sensor DHT11 38
Pantalla LCD 38
Arduino IDE 38
Internet de las Cosas (IoT) 39
Adafruit IO y monitoreo remoto 39
Elementos y Componentes del Sistema Fotovoltaico 40
Dashboard 40
Panel Solar Fotovoltaico 41
Nombre del elemento: Panel solar fotovoltaico de 50 W. 41
Regulador de Carga PWM 42
Batería AGM 43
Convertidor Reductor DC-DC 45
Inversor de Corriente DC/AC 47
Analizador de Redes Siemens SENTRON PAC3100 48
Sistema de Adquisición de Datos ESP32 50
Distribución de Pines del ESP32 52

Pantalla LCD 16×2 con I2C 53
Plataforma de Monitoreo Adafruit IO 55
Marco conceptual 57
Capítulo III 59
Metodología 59
Dimensionamiento del módulo 59
Implementación del sistema fotovoltaico 63
Implementación del sistema de monitoreo remoto mediante Adafruit IO 64
Implementación del sistema de instrumentación y adquisición de datos 64
Validación de la comunicación y monitoreo 72
Validación experimental del módulo 73
Capítulo IV 83
Análisis y discusión de los resultados 83
Capítulo V 99
Conclusiones 99
Recomendaciones 101
Referencias 102
Apéndices 106

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de trabajos de los sistemas fotovoltaicos 29

Tabla 2 Características técnicas del panel solar fotovoltaico 42

Tabla 3 Características técnicas del regulador de carga PWM 43

Tabla 4 Características técnicas de la batería 44

Tabla 5 Características técnicas del convertidor reductor DC-DC 46

Tabla 6 Características técnicas del inversor DC/AC 48

Tabla 7 Características técnicas del Siemens SENTRON PAC3100 49

Tabla 8 Características técnicas de la placa ESP32 51

Tabla 9 Distribución pines 53

Tabla 10 Características técnicas de la pantalla LCD 16×2 I2C 55

Tabla 11 Características de la plataforma de monitoreo Adafruit IO 56

Tabla 12 Distribución de pines del ESP32 utilizados en el sistema 63

Tabla 13 Datos de 3 focos incandescentes 75

Tabla 14 Datos plancha de cabello 76

Tabla 15 Datos rizadora de cabello. 76

Tabla 16 Datos entre rizadora de cabello y plancha de cabello 77

Tabla 17 Datos Calefactor 77

Tabla 18 Datos entre la plancha de cabello y 3 focos 78

Tabla 19 Datos Cautín 78

Tabla 20 Datos cargador de computador 79

Tabla 21 Datos cargador de celular 79

Tabla 22 Datos Foco 1 80

Tabla 23 Datos foco 2 80

Tabla 24 Datos foco3 81

Tabla 25 Datos entre foco 1 y foco 3 81

Tabla 26 Datos entre foco 1 y foco 2 82

Tabla 27 Consumo de corriente de las diferentes cargas 83

Tabla 28 Potencias y factor de potencia de las diferentes cargas 85

Tabla 29 Comparación de las potencias y el factor de potencia 87

Tabla 30 Resumen estadístico de los valores de voltaje 90

Tabla 31 Resumen estadístico de los valores de humedad 93

Tabla 32 Resumen estadístico de los valores de temperatura 95

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo del sistema fotovoltaico autónomo. 32

Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de comunicación 37

Figura 3 *Panel solar fotovoltaico* 41

Figura 4 Regulador de carga PWM 43

Figura 5 Batería AGM 44

Figura 6 Convertidor reductor DC-DC 46

Figura 7 Inversor DC/AC 47

Figura 8 Analizador de redes Siemens SENTRON PAC3100 49

Figura 9 ESP32 DevKit 51

Figura 10 Distribución de pines del ESP32 52

Figura 11 LCD 16×2 I2C 54

Figura 12 Características de la plataforma de monitoreo Adafruit IO 56

Figura 13 Arquitectura general de un sistema fotovoltaico 60

Figura 14 Banco de pruebas de iluminación y panel de control frontal. 61

Figura 15 Diagramas de conexión entre componentes electrónicos 62

Figura 16 Flujo general de adquisición y monitoreo de datos 65

Figura 17 Declaración de librerías, sensor DHT11, pantalla LCD. 66

Figura 18 Inicialización de los dispositivos y conexión con Adafruit IO. 67

Figura 19 Lectura y validación de las variables del sensor DHT11. 68

Figura 20 Visualización de temperatura y humedad en la pantalla LCD I2C. 68

Figura 21. Función de conversión de la lectura analógica a voltaje 69

Figura 22 Lectura y cálculo del voltaje mediante el ADC del ESP32 69

Figura 23 Configuración de la comunicación Wi-Fi con Adafruit IO. 70

Figura 24 Envío de las variables de monitoreo hacia Adafruit IO. 71

Figura 25 Visualización de las variables del sistema en la plataforma Adafruit IO 72

Figura 26 Dispositivos y cargas eléctricas (AC/DC).....74

Figura 27 Comparación del consumo de corriente de las diferentes cargas 84

Figura 28 Comparación de las potencias y el factor de potencia 86

Figura 29 Cargas eléctricas utilizadas durante las pruebas 87

Figura 30 Comparación de los voltajes registrados.....88

Figura 31 Comportamiento general del voltaje 89

Figura 32 Comportamiento general de la humedad.....92

Figura 33 Comportamiento general de la temperatura 94

Figura 34 Comportamiento de la irradiancia solar global horizontal (GHI) 98

Figura 35 Monitoreo del voltaje de mediante Adafruit IO. 98

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo implementar un módulo electrónico didáctico para la enseñanza del proceso de conversión, almacenamiento y aprovechamiento de energía solar fotovoltaica, orientado al desarrollo de actividades prácticas en la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación. El sistema integra un panel solar fotovoltaico de 50 W, un controlador de carga PWM, una batería para almacenamiento de energía y un inversor para alimentar diferentes cargas en corriente alterna. Para caracterizar eléctricamente las cargas, se incorporó un analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100, mediante el cual se obtuvieron variables como corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia. Adicionalmente, se implementó un sistema basado en ESP32 para adquirir el voltaje mediante un divisor resistivo y medir temperatura y humedad mediante un sensor DHT11. Las variables fueron visualizadas localmente mediante una pantalla LCD y remotamente a través de la plataforma Adafruit IO. La metodología comprendió el dimensionamiento e integración de las etapas de generación, regulación, almacenamiento y conversión, junto con la implementación del sistema de adquisición y monitoreo y la ejecución de pruebas experimentales con diferentes cargas eléctricas. Los ensayos permitieron analizar el comportamiento energético de las cargas y las variaciones de voltaje. Durante el monitoreo se obtuvieron 17 160 registros de voltaje, con un promedio de 13,05 V y una desviación estándar de 0,60 V. Los resultados verificaron el funcionamiento integrado del módulo, su capacidad para alimentar cargas y monitorear variables, constituyéndose en un recurso experimental para prácticas relacionadas con energía fotovoltaica, instrumentación y sistemas embebidos.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, módulo didáctico, monitoreo energético, Sistemas embebidos, instrumentación eléctrica.

Abstract

The objective of this work was to implement a didactic electronic module for teaching the process of conversion, storage, and utilization of photovoltaic solar energy, aimed at developing practical activities in the Higher Technology Program in Automation and Instrumentation. The system integrates a 50 W photovoltaic solar panel, a PWM charge controller, a battery for energy storage, and an inverter to supply different alternating-current loads. To electrically characterize the loads, a Siemens SENTRON PAC3100 power analyzer was incorporated, allowing variables such as current, active power, reactive power, apparent power, and power factor to be obtained. Additionally, an ESP32-based system was implemented to acquire voltage through a resistive voltage divider and measure temperature and humidity using a DHT11 sensor. The variables were displayed locally on an LCD screen and remotely through the Adafruit IO platform. The methodology included the sizing and integration of the generation, regulation, storage, and conversion stages, together with the implementation of the data acquisition and monitoring system and experimental tests using different electrical loads. The tests made it possible to analyze the energy behavior of the loads and voltage variations. During monitoring, 17,160 voltage records were obtained, with an average of 13.05 V and a standard deviation of 0.60 V. The results verified the integrated operation of the module, its ability to supply loads and monitor variables, establishing it as an experimental resource for practical activities related to photovoltaic energy, instrumentation, and embedded systems.

Keywords: Photovoltaic solar energy, didactic module, energy monitoring, embedded systems, eléctrica instrumentation.

Capítulo I

Introducción

El aprovechamiento de fuentes renovables de energía constituye una alternativa para diversificar los sistemas de generación eléctrica y promover el uso de tecnologías con menor impacto ambiental. Dentro de estas fuentes, la energía solar fotovoltaica permite transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos y, al incorporar elementos de regulación, almacenamiento y conversión, posibilita su utilización para alimentar diferentes tipos de cargas. El estudio de estas etapas resulta de interés en la formación tecnológica, debido a que integra conocimientos de electricidad, electrónica de potencia, instrumentación, sistemas embebidos y automatización.

En la formación de los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se desarrollan contenidos relacionados con energías renovables, electrónica de potencia, sistemas embebidos y automatización. Actualmente, algunas actividades prácticas permiten realizar mediciones de variables eléctricas en paneles solares y analizar individualmente dispositivos destinados a la conversión de energía; sin embargo, estas experiencias se desarrollan de manera independiente y no mediante una plataforma que integre las diferentes etapas que conforman un sistema fotovoltaico, desde la generación y almacenamiento hasta la conversión y alimentación de cargas eléctricas.

Como antecedente, dentro del proyecto de vinculación “Talleres de aprendizaje de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) con módulos didácticos y aplicaciones móviles para niños y jóvenes de las unidades educativas de la provincia de Cotopaxi” se dispone de un módulo demostrativo de energías renovables que utiliza un panel fotovoltaico de

pequeña capacidad para alimentar cargas básicas, como diodos emisores de luz (LED). Este recurso permite demostrar principios elementales de generación fotovoltaica; no obstante, por su propósito y características, no incorpora etapas de almacenamiento de energía ni conversión para la alimentación de cargas en corriente alterna. Asimismo, en otros laboratorios de la institución existen equipos relacionados con energía fotovoltaica, pero en los laboratorios no se dispone de un módulo orientado a integrar estos procesos para las prácticas de los estudiantes de la carrera.

Ante esta necesidad, el presente Trabajo de Integración Curricular plantea la implementación de un módulo didáctico que integre las etapas de generación, regulación, almacenamiento, conversión y utilización de la energía solar fotovoltaica. El sistema incorpora un panel fotovoltaico, controlador de carga PWM, batería e inversor DC/AC, permitiendo conectar diferentes cargas eléctricas para analizar experimentalmente su comportamiento. La estructura física del módulo posibilita además modificar el ángulo de inclinación del panel y visualizar los principales componentes que conforman el sistema.

Para complementar el análisis experimental se incorpora un analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100, utilizado para obtener parámetros eléctricos asociados con las cargas conectadas al inversor, tales como corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia. Adicionalmente, se implementa un sistema electrónico basado en ESP32 para la adquisición de voltaje mediante un circuito de acondicionamiento y para el registro de temperatura y humedad mediante un sensor DHT11. Las variables adquiridas por el sistema embebido pueden visualizarse localmente mediante una pantalla LCD y remotamente a través de la plataforma Adafruit IO, permitiendo registrar su comportamiento durante la operación del módulo.

Metodológicamente, el trabajo comprende el dimensionamiento y selección de los componentes e implementación de la arquitectura eléctrica y electrónica, la construcción física del módulo, la integración del sistema de adquisición y monitoreo y la ejecución de pruebas experimentales con diferentes cargas. Las mediciones obtenidas permiten caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema bajo distintas condiciones de operación y verificar el funcionamiento de sus etapas principales. Como producto complementario se contempla una guía de práctica orientada al uso del módulo en actividades académicas de la carrera.

El documento se estructura en cinco capítulos. El Capítulo I presenta la introducción, el planteamiento y formulación del problema, los objetivos y la justificación del trabajo. El Capítulo II desarrolla el estado del arte, el marco teórico y el marco conceptual relacionados con sistemas fotovoltaicos, almacenamiento, conversión, instrumentación y monitoreo. El Capítulo III describe la metodología empleada para el diseño, implementación y validación experimental del módulo. El Capítulo IV presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos durante las pruebas con las diferentes cargas y el monitoreo de las variables seleccionadas. Finalmente, el Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo del proyecto.

Planteamiento del problema

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles ha incrementado la necesidad de formar profesionales con competencias técnicas relacionadas con las energías renovables y, particularmente, con los sistemas solares fotovoltaicos. La [1] señala que el crecimiento del sector requiere fortalecer la educación y capacitación para responder a las nuevas competencias demandadas por la transición energética, incluyendo la formación de jóvenes y el desarrollo de habilidades vinculadas con tecnologías renovables y digitalización [2]. En este contexto, la

formación técnica y tecnológica requiere incorporar experiencias que permitan relacionar los fundamentos teóricos con la operación de sistemas energéticos reales.

En el ámbito de la educación técnica y tecnológica, la formación en energías renovables requiere desarrollar competencias que permitan comprender no solamente el principio de generación, sino también las diferentes etapas involucradas en la utilización de la energía producida. [2] y la [3] destacan la necesidad de fortalecer los programas de educación y formación técnica y profesional mediante currículos vinculados con las necesidades del sector y experiencias prácticas que permitan desarrollar habilidades aplicables al campo de las energías renovables [3] En este sentido, los recursos didácticos experimentales constituyen una alternativa para representar físicamente el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos y facilitar el análisis de sus variables de operación. Investigaciones recientes han desarrollado plataformas educativas fotovoltaicas orientadas a proporcionar experiencias experimentales y permitir la evaluación del comportamiento de estos sistemas bajo diferentes condiciones de funcionamiento [4].

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sede Latacunga, existen recursos y prácticas académicas relacionados con sistemas fotovoltaicos y conversión de energía. Asimismo, dentro del proyecto de vinculación “Talleres de aprendizaje de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) con módulos didácticos y aplicaciones móviles para niños y jóvenes de las unidades educativas de la provincia de Cotopaxi” se dispone de un módulo demostrativo de energías renovables que utiliza un panel fotovoltaico de pequeña capacidad para alimentar cargas básicas, como diodos emisores de luz. Sin embargo, por las características y población objetivo de este recurso, no incorpora etapas de almacenamiento, conversión DC/AC, alimentación de diferentes tipos de cargas ni sistemas de instrumentación y monitoreo orientados a prácticas de nivel tecnológico.

De manera específica, en la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación se desarrollan contenidos relacionados con energías renovables, electrónica de

potencia, sistemas embebidos y automatización. Las actividades prácticas existentes permiten abordar algunos de estos contenidos de manera independiente, como la medición de voltaje generado por paneles solares o el análisis de dispositivos de conversión de energía. No obstante, en los laboratorios no se dispone actualmente de un módulo didáctico que integre en una misma plataforma las etapas de generación fotovoltaica, regulación, almacenamiento, conversión DC/AC y alimentación de cargas, conjuntamente con la medición de variables eléctricas, comunicación industrial y monitoreo remoto.

Esta limitación dificulta disponer de una experiencia práctica integrada en la que los estudiantes puedan identificar físicamente el flujo de energía a través de las diferentes etapas del sistema, modificar condiciones de operación, conectar cargas de distintas características y analizar en tiempo real variables como voltaje, corriente y potencia. De igual manera, restringe la posibilidad de relacionar el funcionamiento del sistema energético con competencias propias de la carrera, como la adquisición de datos mediante sistemas embebidos y la visualización local y remota de variables de proceso.

Por lo expuesto, se identifica la necesidad de disponer de un módulo didáctico que integre las principales etapas de un sistema solar fotovoltaico con herramientas de instrumentación y monitoreo, de manera que los estudiantes puedan desarrollar prácticas en las que se relacionen los procesos de generación, almacenamiento y conversión de energía con la medición y adquisición de variables eléctricas. La implementación de esta plataforma permitirá disponer de un recurso para complementar las actividades experimentales de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación en los Laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sede Latacunga.

En este sentido, los recursos didácticos experimentales constituyen una alternativa para representar físicamente el funcionamiento de sistemas de energías renovables y facilitar el análisis de sus variables de operación [5] desarrollaron una propuesta de laboratorio orientada al aprendizaje práctico de energías renovables, mediante actividades experimentales que

permiten a los estudiantes interactuar con los componentes de los sistemas y analizar su funcionamiento. Este tipo de experiencias favorece la comprensión de los principios asociados a las tecnologías renovables y fortalece el desarrollo de competencias prácticas para la resolución de problemas relacionados con la energía.

De manera complementaria, [5] desarrollaron una plataforma experimental para la coordinación de sistemas de generación eólica, fotovoltaica y almacenamiento de energía, orientada a fortalecer la formación práctica y la integración de conocimientos en el área energética. La plataforma permite relacionar diferentes etapas del sistema y analizar su operación mediante actividades experimentales, favoreciendo el desarrollo de competencias para el análisis y resolución de problemas de ingeniería. Este antecedente evidencia la importancia de disponer de plataformas didácticas que integren generación, almacenamiento y gestión de energía en una misma experiencia práctica.

Para validar la relación entre la irradiancia y el voltaje generado por el panel solar, se consultó en la página SOLCAST [6] que permitió obtener los valores de irradiancia generados en la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe Sede Latacunga (Latitud: −0.94, Longitud: −78.61) , lugar donde se realizaron las pruebas y se comparó con los valores de voltaje obtenidos mediante la plataforma Adafruit IO , en conjunto con el circuito de adquisición conectado a la ESP32.

Asimismo, [6] identificaron la necesidad de fortalecer las competencias técnicas de los estudiantes y profesionales vinculados con el sector de la energía solar, debido al crecimiento de esta tecnología y a las nuevas demandas de conocimientos especializados. Los autores destacan la importancia de incorporar contenidos y experiencias formativas relacionadas con las tecnologías solares dentro de los programas educativos STEM, con el propósito de mejorar la preparación de los futuros profesionales y su capacidad para desenvolverse en el sector energético. Este antecedente respalda la necesidad de complementar la formación teórica con

recursos prácticos que permitan desarrollar competencias técnicas aplicadas a los sistemas fotovoltaicos.

Formulación del problema o pregunta de investigación

La investigación que se presenta se justifica en la escasez de módulos didácticos de clases prácticas de sistemas solares fotovoltaicos, ya que los alumnos sólo consiguen adquirir conocimientos teóricos sobre la conversión y almacenamiento de energía solar y esto genera [7] y [8] dificultades para entender el comportamiento real de variables eléctricas (voltaje, corriente, potencia) y la relación que existe entre la irradiancia solar durante el proceso de carga de baterías. Por todo ello se plantea la pregunta de investigación: ¿Cómo se puede introducir un módulo didáctico electrónico para la captación, conversión y almacenamiento de energía solar fotovoltaica que refuerce el aprendizaje práctico y la comprensión del funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos de baja potencia en estudiantes de tecnología?

Objetivos

Objetivo general

- Implementar un sistema electrónico didáctico para la captación de energía solar fotovoltaica

Objetivos específicos

- Seleccionar y caracterizar el panel solar fotovoltaico, realizando mediciones de voltaje, corriente y potencia bajo diferentes niveles de irradiancia, utilizando instrumentos de medición eléctrica y/o sensores integrados al sistema.
- Analizar la relación entre la irradiancia solar y las variables eléctricas generadas, mediante la recolección de datos experimentales y la elaboración de tablas y gráficas comparativas para su interpretación didáctica.

Justificación

La formación de profesionales en el área de Automatización e Instrumentación requiere complementar los conocimientos teóricos con actividades experimentales que permitan interactuar con sistemas reales, realizar mediciones y analizar el comportamiento de variables asociadas a diferentes procesos tecnológicos. En este contexto, los sistemas de energía solar fotovoltaica constituyen una alternativa para integrar conocimientos relacionados con energías renovables, electrónica de potencia, sistemas embebidos, instrumentación y comunicaciones industriales dentro de una misma plataforma experimental.

La implementación del módulo didáctico se justifica por la necesidad de disponer, en los Laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sede Latacunga, de un recurso que permita abordar de manera integrada las etapas que intervienen en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Si bien existen equipos y actividades prácticas relacionados con energía solar en otros espacios de la institución, así como un módulo demostrativo desarrollado en el contexto del proyecto de vinculación STEM, estos recursos no integran en una sola plataforma las etapas de generación, regulación, almacenamiento, conversión a corriente alterna, conexión de cargas e instrumentación para estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación.

Desde el punto de vista académico, el módulo permitirá relacionar contenidos abordados en diferentes áreas de formación. Los estudiantes podrán identificar físicamente las etapas de un sistema fotovoltaico, conectar y desconectar diferentes cargas eléctricas y observar su comportamiento durante la operación del sistema. De esta manera, el recurso permitirá complementar experiencias que actualmente se realizan de forma independiente,

como la medición de variables en paneles fotovoltaicos y el estudio de dispositivos de conversión de energía.

La incorporación de instrumentación y herramientas de comunicación constituye otro elemento que sustenta la pertinencia del proyecto para la carrera. El uso del analizador SENTRON PAC3100 permitirá obtener variables eléctricas de las cargas conectadas a la salida AC del inversor, mientras que el circuito de acondicionamiento y conectado a la ESP32 permitirán integrar conceptos de adquisición de datos. Asimismo, la visualización local mediante una pantalla LCD y el monitoreo remoto a través de Adafruit IO permitirán disponer de información para analizar el comportamiento de las cargas durante las actividades experimentales.

Desde el punto de vista institucional, la implementación del módulo permitirá disponer de un recurso didáctico reutilizable en los laboratorios. Su estructura móvil, el mecanismo para modificar la inclinación del panel, la posibilidad de conectar diferentes cargas y la visualización de sus componentes internos facilitarán su utilización en actividades académicas.

Por lo expuesto, el desarrollo del proyecto se considera pertinente debido a que integra en un mismo recurso didáctico diferentes tecnologías relacionadas con la formación de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación y proporciona una plataforma para realizar actividades experimentales asociadas con generación fotovoltaica, almacenamiento de energía, conversión DC/AC, instrumentación, comunicación industrial y monitoreo de variables. Su implementación permitirá fortalecer la infraestructura disponible para prácticas académicas y dejar una base susceptible de futuras ampliaciones relacionadas con adquisición de nuevas variables, control y automatización del sistema.

Capítulo II

Estado del arte

El desarrollo de sistemas fotovoltaicos ha evolucionado desde configuraciones destinadas principalmente a la generación y conversión de energía hacia plataformas que incorporan almacenamiento, adquisición de datos, supervisión y herramientas de monitoreo remoto. Esta evolución ha permitido integrar tecnologías asociadas con sistemas embebidos, comunicaciones e Internet de las Cosas (IoT), facilitando la observación del comportamiento de las variables eléctricas y el análisis de las diferentes etapas que intervienen en un sistema fotovoltaico.

En este contexto, [9] desarrollaron una configuración experimental para analizar el flujo de potencia de un sistema fotovoltaico autónomo destinado a la alimentación de cargas DC y AC. El banco experimental estuvo compuesto por dos módulos fotovoltaicos policristalinos de 40 W, controlador de carga, baterías, convertidor DC-DC e inversor. Los autores realizaron mediciones de voltaje, corriente y potencia en diferentes puntos del sistema y evaluaron experimentalmente el flujo energético hacia una carga DC, la batería y una carga AC conectada mediante el inversor. Asimismo, los resultados experimentales fueron comparados con simulaciones realizadas en MATLAB. [9]

Las pruebas realizadas por [9] permitieron analizar la potencia del arreglo fotovoltaico, la eficiencia del controlador de carga, la eficiencia del inversor y el proceso de carga de la batería bajo diferentes niveles de irradiancia. Los autores determinaron una relación aproximadamente lineal entre la irradiancia incidente y la potencia producida por los módulos. Para las pruebas con cargas AC, el sistema permitió medir variables correspondientes al arreglo fotovoltaico, batería, entrada del inversor y carga, demostrando experimentalmente el funcionamiento integrado de las etapas de generación, almacenamiento y conversión. [4]Este trabajo constituye un antecedente relevante para el presente proyecto debido a que aborda

experimentalmente una cadena energética similar; sin embargo, su enfoque se concentra en el análisis del flujo de potencia y no incorpora herramientas de comunicación industrial o monitoreo remoto.

Desde la perspectiva de adquisición y supervisión de variables, [10] propusieron una arquitectura SCADA de código abierto orientada al monitoreo de sistemas fotovoltaicos. La solución incorpora tres sensores de voltaje y tres sensores de corriente para obtener información del panel fotovoltaico, la batería y la carga. Un microcontrolador ESP32-E funciona como unidad terminal remota y transmite los datos mediante el protocolo MQTT sobre una red Wi-Fi hacia una Banana Pi M4, utilizada como unidad terminal maestra. Sobre esta última se ejecuta Node-RED para generar una interfaz hombre-máquina que permite visualizar en tiempo real las variables adquiridas [10].

La arquitectura fue probada en un entorno de laboratorio y permitió adquirir valores de voltaje, corriente y potencia del sistema fotovoltaico, además de realizar el control remoto de una carga mediante un relé [10]. Este antecedente resulta particularmente importante para el presente trabajo porque demuestra la utilización del ESP32 como elemento de adquisición y comunicación dentro de un sistema de supervisión fotovoltaica. No obstante, su arquitectura está orientada principalmente a la implementación de un SCADA de código abierto y utiliza sensores electrónicos individuales para la adquisición de las variables, en lugar de incorporar un instrumento industrial de medición comunicado mediante un protocolo industrial.

Posteriormente, [10] ampliaron esta arquitectura mediante un sistema IoT-SCADA con mecanismos adicionales de supervisión y redundancia. La propuesta incorporó ESP32-E y ESP32-S3, así como las plataformas Arduino Cloud y ThingSpeak, con el propósito de incrementar la disponibilidad del monitoreo. Además de las variables eléctricas, el sistema integró una cámara para verificar visualmente el estado de la carga. Durante las pruebas, los parámetros fueron registrados y analizados en diferentes escalas temporales y se implementó

una acción automática para desconectar la carga cuando el voltaje de la batería descendía por debajo de 12,5 V [10].

Esta evolución evidencia que los sistemas de supervisión fotovoltaica actuales no se limitan a la adquisición de variables, sino que pueden integrar monitoreo remoto, redundancia de plataformas, alarmas y acciones de control. Sin embargo, el propósito del sistema desarrollado por [10]se concentra en incrementar la robustez y capacidad de supervisión de una instalación fotovoltaica, mientras que su aplicación como recurso para prácticas de formación tecnológica no constituye el objetivo principal.

Por su parte, [11] desarrollaron un dispositivo de bajo costo para el monitoreo integral de sistemas fotovoltaicos mediante IoT. La arquitectura considera la adquisición de variables asociadas al arreglo fotovoltaico, banco de baterías e inversor e incorpora microcontroladores, dispositivos de medición, almacenamiento local, visualización y comunicación hacia una plataforma remota. El estudio se relaciona con una tendencia creciente hacia sistemas de adquisición de bajo costo capaces de registrar variables fotovoltaicas en tiempo real; dentro de los antecedentes revisados por los propios autores se incluyen sistemas basados en PLC, ESP32, SCADA y diferentes tecnologías IoT [11].

La relevancia de este antecedente radica en la integración del monitoreo de diferentes etapas del sistema fotovoltaico y no únicamente del panel. Asimismo, representa un acercamiento entre instrumentación, adquisición de datos y supervisión remota. No obstante, su finalidad está principalmente relacionada con el monitoreo operacional y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas, mientras que el presente proyecto busca utilizar estos principios de instrumentación dentro de una plataforma específicamente destinada al desarrollo de prácticas académicas.

A partir de los trabajos analizados, en la **Tabla 1** se presenta una síntesis comparativa de las principales características de las propuestas revisadas, considerando su arquitectura,

variables analizadas, metodología experimental, resultados y diferencias respecto al presente trabajo.

Tabla 1

Comparación de trabajos de los sistemas fotovoltaicos

Referencia	Enfoque	Arquitectura / tecnologías	Variables y validación	Principales resultados	Diferencia respecto al presente trabajo
Saravanan et al. (2024)	Flujo de potencia en sistema FV autónomo	Paneles FV, batería, inversor y MATLAB	Voltaje, corriente y potencia; pruebas con distintas irradiancias	Validó el flujo de potencia y su relación con la irradiancia	No incluye sistema embebido, comunicación industrial ni monitoreo remoto
He et al. (2024)	SCADA para monitoreo FV	ESP32-E, Banana Pi, Node-RED, MQTT y Wi-Fi	Voltaje, corriente y potencia; pruebas de laboratorio	Permitió monitoreo en tiempo real y control remoto	No está diseñado como módulo didáctico con instrumentación industrial
He et al. (2025)	IoT-SCADA para supervisión FV	ESP32, Arduino Cloud, ThingSpeak y MQTT	Variables eléctricas y batería	Logró monitoreo continuo y mayor robustez	Se enfoca en supervisión, no en prácticas académicas
Nkinyam et al. (2025)	Monitoreo IoT de sistemas FV	Microcontroladores, LCD y plataforma IoT	Variables del panel, batería e inversor	Permitió monitoreo local y remoto	No integra analizador industrial ni enfoque didáctico

Nota. Tomado de Saravanan et al. (2024), He et al. (2024), He et al. (2025) y Nkinyam et al. (2025).

Como se observa en la **Tabla 1**, los antecedentes pueden agruparse principalmente en dos tendencias. La primera corresponde a plataformas experimentales destinadas al análisis del comportamiento energético de sistemas fotovoltaicos, en las que se integran generación, almacenamiento, conversión y cargas. La segunda se orienta hacia sistemas de adquisición, IoT y SCADA destinados a obtener, transmitir y visualizar variables de operación. En este

último grupo, el ESP32 adquiere especial relevancia como dispositivo de adquisición y comunicación debido a su capacidad para integrarse con sensores, redes inalámbricas y plataformas de supervisión. La literatura revisada también evidencia la utilización de tecnologías como MQTT, Node-RED, ThingSpeak y sistemas SCADA para implementar monitoreo en tiempo real.

Sin embargo, los antecedentes analizados presentan estas características principalmente desde una perspectiva de evaluación energética, supervisión o mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas. En los trabajos revisados no se identifica una propuesta concebida específicamente para integrar estas funcionalidades dentro de un módulo didáctico orientado a estudiantes de Automatización e Instrumentación, donde además de observar el flujo energético sea posible relacionar la operación del sistema fotovoltaico con instrumentación y comunicaciones industriales.

En este sentido, el presente proyecto propone integrar en una misma plataforma las etapas de generación fotovoltaica, regulación, almacenamiento, conversión DC/AC y alimentación de diferentes cargas, incorporando además instrumentación para el monitoreo de las variables eléctricas del lado AC. A diferencia de las soluciones basadas exclusivamente en sensores electrónicos conectados al microcontrolador, se plantea utilizar un analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100, cuya información será adquirida por un ESP32 mediante un circuito de acondicionamiento. Las variables obtenidas serán presentadas localmente y enviadas a una plataforma de monitoreo remoto, complementándose con la adquisición de temperatura y humedad.

Por tanto, la contribución del trabajo no se orienta al desarrollo de un nuevo algoritmo de control, protocolo de comunicación o método de conversión fotovoltaica. Su aporte se concentra en la integración de tecnologías de generación, almacenamiento, conversión, instrumentación, sistemas embebidos, comunicación industrial y monitoreo dentro de un módulo didáctico, de manera que conocimientos abordados en diferentes áreas de la carrera

puedan relacionarse mediante una plataforma experimental. Esta característica diferencia la propuesta de los antecedentes analizados y sustenta su pertinencia como recurso para el desarrollo de prácticas en la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación.

Marco teórico

Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una tecnología de generación eléctrica que aprovecha la radiación proveniente del Sol para transformarla directamente en energía eléctrica mediante células solares. Estas células están fabricadas con materiales semiconductores capaces de producir una diferencia de potencial cuando reciben radiación solar, fenómeno conocido como efecto fotovoltaico [12].

Los sistemas fotovoltaicos constituyen una alternativa para la generación de energía eléctrica debido a que utilizan una fuente de energía renovable y pueden instalarse tanto en sistemas conectados a la red como en sistemas autónomos. La cantidad de energía generada depende principalmente de factores como la irradiancia solar, la temperatura y las características eléctricas del módulo fotovoltaico [1].

En el presente proyecto, el panel fotovoltaico constituye la fuente primaria de energía. La energía generada posteriormente pasa por una etapa de regulación, almacenamiento y conversión antes de ser utilizada para alimentar cargas de corriente alterna.

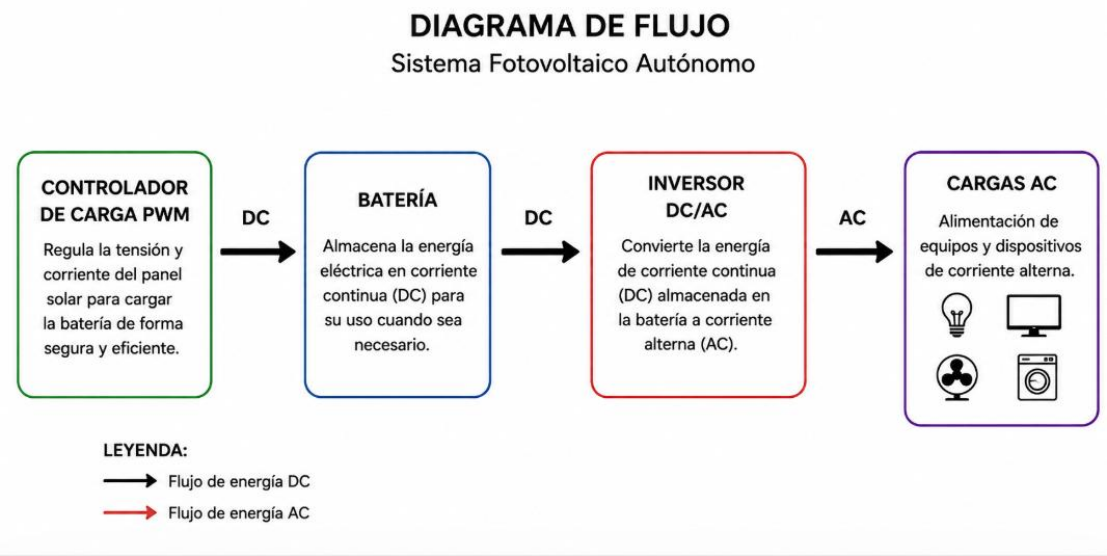
Sistema fotovoltaico autónomo

Un sistema fotovoltaico autónomo es una instalación capaz de generar y suministrar energía eléctrica sin depender directamente de la red eléctrica convencional. Para garantizar el suministro, este tipo de sistema integra diferentes componentes encargados de generar, regular, almacenar y convertir la energía eléctrica [13] .

La configuración utilizada en el proyecto sigue el siguiente flujo:

Figura 1

Diagrama de flujo del sistema fotovoltaico autónomo.



Nota. El diagrama representa el flujo de energía en un sistema fotovoltaico autónomo, donde la energía eléctrica en corriente continua (DC) es regulada por el controlador de carga PWM, almacenada en la batería y posteriormente convertida mediante el inversor DC/AC en corriente alterna (AC) para alimentar las cargas eléctricas.

El panel produce energía eléctrica en corriente continua, el controlador regula la energía entregada a la batería, la batería almacena la energía y el inversor transforma la corriente continua en corriente alterna para alimentar las cargas.

Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico está constituido por un conjunto de células solares conectadas eléctricamente para obtener determinados valores de tensión, corriente y potencia. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, mediante el cual la radiación solar incidente genera una corriente eléctrica en el material semiconductor [14].

Entre los parámetros eléctricos más importantes de un panel fotovoltaico se encuentran la tensión de circuito abierto, la corriente de cortocircuito, la tensión de máxima potencia, la corriente de máxima potencia y la potencia máxima. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento eléctrico del módulo bajo determinadas condiciones de irradiancia y temperatura.

Controlador de carga PWM

El controlador de carga es el dispositivo encargado de regular la energía eléctrica proveniente del panel fotovoltaico antes de que sea almacenada en la batería. Su función es controlar el proceso de carga y evitar condiciones que puedan afectar el funcionamiento y la vida útil de la batería [12].

En el proyecto se emplea un controlador PWM (Pulse Width Modulation), cuyo funcionamiento se basa en la regulación de la transferencia de energía mediante la variación del ancho de los pulsos de conmutación. Este controlador se encuentra ubicado entre el panel fotovoltaico y la batería, formando parte de la etapa de regulación del sistema.

Batería y almacenamiento de energía

La batería constituye el elemento encargado de almacenar la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico para disponer de ella cuando la generación solar sea insuficiente o cuando se requiera alimentar las cargas. El almacenamiento permite desacoplar parcialmente el momento de generación del momento de consumo [15] .

Entre los parámetros principales de una batería se encuentran la tensión nominal, la capacidad expresada en amperios-hora (Ah), el estado de carga o SOC (State of Charge) y la profundidad de descarga o DoD (Depth of Discharge).

En el proyecto se utiliza una batería de 12 VDC, cuya energía almacenada es utilizada posteriormente como fuente de alimentación para el inversor. Durante las pruebas experimentales, el comportamiento de la tensión de la batería puede analizarse frente a diferentes niveles de demanda de las cargas.

Inversor DC/AC

El inversor es un dispositivo electrónico de potencia encargado de transformar la corriente continua proporcionada por la batería en corriente alterna. Esta conversión permite utilizar la energía almacenada para alimentar equipos eléctricos convencionales que requieren una fuente de corriente alterna [16] .

El funcionamiento de un inversor se basa en dispositivos electrónicos de conmutación que permiten transformar la señal de corriente continua en una señal alterna. Las características de la señal de salida, como tensión y frecuencia, dependen del diseño y de las especificaciones del equipo.

En el sistema implementado, la batería proporciona aproximadamente 12 VDC al inversor, mientras que el inversor utilizado tiene una potencia nominal de 1000 W y permite obtener aproximadamente 110 VAC en su salida.

Cargas eléctricas de corriente alterna

Una carga eléctrica es un dispositivo que consume energía eléctrica cuando se conecta a una fuente de alimentación. El nivel de consumo depende de las características eléctricas de cada equipo, particularmente de su tensión, corriente, potencia y factor de potencia [17] .

En el proyecto se utilizan diferentes cargas de corriente alterna, entre ellas cautín eléctrico, focos, calefactor eléctrico y cargador de laptop. La utilización de diferentes cargas permite analizar el comportamiento del sistema fotovoltaico frente a distintos niveles y características de consumo.

Variables eléctricas

Las variables eléctricas permiten caracterizar el funcionamiento de un sistema eléctrico. Entre las principales magnitudes consideradas en el proyecto se encuentran el voltaje, corriente y potencia. También pueden analizarse parámetros como potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia [17].

La tensión eléctrica se expresa en voltios (V), la corriente en amperios (A) y la potencia en watts (W). Para una carga de corriente continua, la potencia puede determinarse mediante la **Ecuación 1** :

Ecuación 1 (1)

$$P = V \times I$$

En sistemas de corriente alterna, la potencia activa depende además del factor de potencia. Por esta razón, el monitoreo de estas variables permite analizar el comportamiento de las cargas conectadas a la salida del inversor.

Analizador de energía SENTRON PAC3100

El SENTRON PAC3100 es un analizador de energía eléctrica utilizado para medir y supervisar diferentes variables eléctricas. El equipo permite obtener parámetros como tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia y energía eléctrica [18].

El PAC3100 puede utilizarse como instrumento de referencia debido a que permite obtener mediciones directamente desde el sistema eléctrico. En el presente proyecto, sus valores son utilizados como referencia para comprobar los resultados obtenidos mediante el sistema de adquisición desarrollado.

La utilización de un instrumento de referencia permite realizar una comparación cuantitativa entre las mediciones originales y los valores procesados posteriormente por el sistema electrónico.

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso de comunicación



Nota. El diagrama representa el proceso de comunicación y adquisición de datos entre el analizador de energía PAC3100 y el microcontrolador ESP32.

Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador desarrollado por Espressif Systems que integra capacidades de procesamiento, entradas y salidas digitales, interfaces de comunicación y conectividad inalámbrica. Estas características permiten utilizarlo en aplicaciones de automatización, adquisición de datos e Internet de las Cosas [19].

Además, el ESP32 permite incorporar la lectura del sensor DHT11 y transmitir los datos obtenidos hacia una plataforma de monitoreo remoto mediante conexión Wi-Fi.

Sensor DHT11

El DHT11 es un sensor utilizado para medir temperatura y humedad relativa del ambiente. Este dispositivo proporciona una señal digital que puede ser interpretada por un microcontrolador para obtener información de las condiciones ambientales (Aosong Electronics, 2018).

En el proyecto, el DHT11 se integra al sistema de adquisición mediante el ESP32. Los valores de temperatura y humedad obtenidos pueden visualizarse junto con las variables eléctricas, permitiendo disponer de información complementaria sobre las condiciones existentes durante las pruebas experimentales.

Pantalla LCD

Una pantalla LCD (Liquid Crystal Display) es un dispositivo utilizado para presentar información de manera visual. En sistemas electrónicos puede emplearse para mostrar valores obtenidos de sensores, instrumentos de medición o procesos de control.

En el presente proyecto, la pantalla LCD constituye el medio de monitoreo local. El ESP32 procesa los datos recibidos del PAC3100 y los presenta en la pantalla, permitiendo al usuario observar las variables eléctricas sin necesidad de acceder directamente a la plataforma de monitoreo remoto.

Arduino IDE

Arduino IDE es un entorno de desarrollo utilizado para programar microcontroladores y cargar los programas en las placas compatibles. El entorno permite desarrollar el código

necesario para implementar funciones de adquisición, procesamiento, comunicación y visualización de datos [20].

En el proyecto, Arduino IDE se utiliza para desarrollar el programa del ESP32. El código integra la comunicación con el PAC3100, la adquisición de las variables eléctricas, la lectura del sensor DHT11, la visualización mediante LCD y la comunicación Wi-Fi con Adafruit IO.

Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas, conocido como IoT (Internet of Things), hace referencia a la conexión de dispositivos físicos a redes de comunicación para permitir la adquisición, transmisión, procesamiento y almacenamiento de información.

En sistemas de monitoreo energético, IoT permite transmitir las variables eléctricas desde el lugar donde se realiza la medición hacia plataformas en línea. Esto facilita el seguimiento remoto de las condiciones de funcionamiento del sistema.

En este proyecto, el ESP32 utiliza su conectividad inalámbrica para transmitir las variables adquiridas hacia Adafruit IO.

Adafruit IO y monitoreo remoto

Adafruit IO es una plataforma orientada a aplicaciones de IoT que permite recibir, almacenar y visualizar datos provenientes de dispositivos conectados a Internet [21].

En el proyecto, los datos adquiridos por el ESP32 son enviados hacia Adafruit IO mediante una conexión Wi-Fi. La plataforma permite organizar las variables y presentarlas mediante un dashboard, facilitando el monitoreo remoto del sistema.

De esta forma, el sistema cuenta con dos niveles de visualización: un monitoreo local mediante la pantalla LCD y un monitoreo remoto mediante Adafruit IO.

Elementos y Componentes del Sistema Fotovoltaico

Para la implementación del módulo didáctico fotovoltaico se requiere la integración de diferentes elementos de generación, regulación, almacenamiento, conversión, medición, adquisición y visualización. Cada dispositivo cumple una función específica dentro de la arquitectura del sistema, permitiendo que la energía generada por el panel fotovoltaico sea almacenada y posteriormente utilizada para alimentar cargas eléctricas de corriente alterna. Asimismo, el sistema incorpora instrumentos de medición y adquisición de datos que permiten evaluar cuantitativamente el comportamiento de las principales variables eléctricas durante las pruebas experimentales.

A continuación, se presenta la descripción técnica junto con las características principales de cada uno de los elementos utilizados en la implementación y evaluación experimental del prototipo:

Dashboard

Un dashboard es una interfaz gráfica utilizada para presentar información de manera organizada. En sistemas de monitoreo permite visualizar diferentes variables mediante indicadores, gráficos y registros históricos.

En el presente proyecto se utiliza un dashboard de Adafruit IO denominado My Dashboards, donde se presentan los datos enviados por el ESP32. Esta herramienta permite observar el comportamiento de las variables durante las diferentes pruebas realizadas.

Panel Solar Fotovoltaico

Nombre del elemento: Panel solar fotovoltaico de 50 W.

El panel solar fotovoltaico ver **Figura 3** constituye la fuente primaria de generación eléctrica del sistema. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, mediante el cual las celdas semiconductoras convierten la radiación solar incidente en energía eléctrica en corriente continua. La cantidad de energía producida depende principalmente de la irradiancia solar, la temperatura de operación y las características eléctricas del panel. En el módulo didáctico, el panel proporciona la energía necesaria para alimentar el proceso de carga de la batería a través del regulador solar para las características técnicas revisar **Tabla *2***.

Figura 3

Panel solar fotovoltaico



Nota. Panel solar fotovoltaico monocristalino utilizado como fuente de generación eléctrica del sistema. Tomado de *[22]*.

Tabla 2

Características técnicas del panel solar fotovoltaico

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tipo de elemento	Panel solar fotovoltaico
Tipo de celda	Monocristalina / Policristalina
Potencia máxima nominal	50 W
Tensión en máxima potencia	18,0 V
Corriente en máxima potencia	2,78 A
Tensión de circuito abierto	21,6 V
Corriente de cortocircuito	3,05 A
Tipo de salida	Corriente continua (DC)

Nota. La tabla presenta las principales características eléctricas del panel fotovoltaico empleado como fuente de generación de energía del módulo didáctico.

Regulador de Carga PWM

Nombre del elemento: Regulador de carga solar PWM de 10 A.

El regulador de carga ver **Figura *4*** constituye el elemento encargado de controlar y gestionar la energía eléctrica proveniente del panel fotovoltaico antes de ser suministrada a la batería. Su funcionamiento se basa en la regulación del proceso de carga mediante tecnología PWM (Pulse Width Modulation), la cual permite controlar la transferencia de energía mediante la variación del ciclo de trabajo de la señal eléctrica. Además, incorpora mecanismos de protección frente a condiciones como la sobrecarga y la descarga excesiva, contribuyendo a preservar la vida útil y el correcto funcionamiento de la batería. En el módulo didáctico, el regulador permite gestionar de manera segura la energía generada por el panel y suministrarla adecuadamente al sistema de almacenamiento; para revisar sus características técnicas, consultar la **Tabla *3***.

Figura 4

Regulador de carga PWM



Nota. Regulador de carga PWM empleado para controlar y regular la energía proveniente del panel fotovoltaico hacia el batería tomado de *[23]*.

Tabla 3

Características técnicas del regulador de carga PWM

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tecnología de regulación	PWM
Tensión nominal	12 V / 24 V DC
Corriente nominal de carga	10 A
Tensión máxima de entrada FV	< 50 V DC
Función principal	Regulación de carga
Protecciones	Sobrecarga, cortocircuito y polaridad inversa
Entrada	Panel fotovoltaico
Salida	Batería y cargas DC

Nota. La tabla muestra las especificaciones principales del regulador de carga utilizado para controlar la transferencia de energía entre el panel fotovoltaico y la batería.

Batería AGM

Nombre del elemento: Batería AGM de 12 V – 55 Ah.

La batería ver **Figura *5*** constituye el elemento encargado del almacenamiento energético del sistema fotovoltaico. Su funcionamiento se basa en la acumulación de la energía

eléctrica generada por el panel fotovoltaico durante los periodos de radiación solar, permitiendo disponer de ella posteriormente cuando la irradiancia disminuye o cuando se conectan cargas eléctricas. La batería empleada utiliza tecnología AGM (Absorbent Glass Mat), correspondiente a una batería VRLA sellada de plomo-ácido, cuyo electrolito se encuentra absorbido en un separador de fibra de vidrio. En el módulo didáctico, la batería permite almacenar la energía generada y proporcionar una tensión relativamente estable para alimentar la etapa de conversión DC/AC; para revisar sus características técnicas, consultar la **Tabla *4***.

Figura 5

Batería AGM



Nota. Batería AGM utilizada como elemento de almacenamiento de la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico tomado de *[24]*.

Tabla 4

Características técnicas de la batería

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tecnología	Plomo-Ácido VRLA AGM

Tensión nominal	12 V DC
Capacidad nominal	18 Ah
Tensión de flotación	13,5 – 13,8 V DC
Voltaje límite de desconexión	10,8 V DC
Tipo	Sellada
Función	Almacenamiento de energía

Nota. La tabla presenta las características nominales de la batería AGM utilizada como elemento de almacenamiento de energía eléctrica del sistema fotovoltaico.

Convertidor Reductor DC-DC

Nombre del elemento: Convertidor reductor DC-DC tipo Buck, de 12 V a 5 V.

El convertidor reductor DC-DC ver **Figura *6*** constituye el elemento encargado de adaptar la tensión eléctrica disponible en la batería a los niveles requeridos por los circuitos electrónicos de control y visualización. Su funcionamiento se basa en la reducción de la tensión de entrada, permitiendo convertir aproximadamente los 12 V DC suministrados por la batería en una tensión cercana a 5 V DC, adecuada para la alimentación de determinados dispositivos electrónicos. En el módulo didáctico, el convertidor proporciona una tensión regulada para la pantalla LCD y la placa ESP32, de acuerdo con las características de alimentación del modelo utilizado. Cabe señalar que los GPIO del ESP32 trabajan con niveles lógicos de 3,3 V, por lo que no se debe aplicar directamente una tensión de 5 V a estos terminales; para revisar las características técnicas del convertidor, consultar la **Tabla *5***.

Figura 6

Convertidor reductor DC-DC



Nota. Convertidor DC-DC utilizado para reducir la tensión de aproximadamente 12 V a 5 V para la alimentación de los dispositivos electrónicos del sistema tomado de *[25]*.

Tabla 5

Características técnicas del convertidor reductor DC-DC

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tipo	Convertidor Buck / Step-Down
Tensión de entrada	12 V DC
Tensión de salida	5 V DC
Conversión	12 V DC → 5 V DC
Función	Reducción y regulación de tensión
Fuente de entrada	Batería de 12 V
Aplicación	Alimentación de LCD y sistema electrónico
Precaución	No aplicar 5 V directamente a GPIO del ESP32

Nota. La tabla presenta las características del convertidor DC-DC empleado para reducir la tensión de aproximadamente 12 V DC proveniente de la batería a 5 V DC, permitiendo una

alimentación adecuada de los circuitos electrónicos y evitando la aplicación directa de una tensión elevada a dispositivos de menor tensión de operación.

Inversor de Corriente DC/AC

Nombre del elemento: Inversor de corriente de 12 V DC a 110/120 V AC.

El inversor ver **Figura *7*** constituye el elemento encargado de convertir la energía eléctrica en corriente continua disponible en la batería en corriente alterna para la alimentación de las cargas eléctricas utilizadas durante las pruebas. Su funcionamiento se basa en la conversión de la tensión DC de entrada en una señal de tensión AC adecuada para alimentar receptores convencionales. En el módulo didáctico, el inversor permite utilizar cargas de corriente alterna y evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de operación, considerando variables como la corriente, la potencia y el factor de potencia; para revisar sus características técnicas, consultar la **Tabla 6**.

Figura 7

Inversor DC/AC



Nota. Inversor utilizado para convertir la tensión de corriente continua de 12 V proveniente de la batería en tensión alterna para alimentar las cargas del sistema tomado de *[26]*.

Tabla 6

Características técnicas del inversor DC/AC

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tipo	Inversor DC/AC
Tensión de entrada	12 V DC
Tensión de salida	110 / 120 V AC
Frecuencia	60 Hz
Potencia nominal continua	500 W
Tipo de onda	Senoidal modificada / pura
Función	Conversión DC a AC

Nota. La tabla presenta las principales características del inversor utilizado para transformar la tensión de 12 V DC de la batería en tensión alterna para la alimentación del banco de cargas.

Analizador de Redes Siemens SENTRON PAC3100

Nombre del elemento: Analizador de redes Siemens SENTRON PAC3100.

El analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100 ver **Figura *8*** constituye el instrumento encargado de medir y supervisar las principales variables eléctricas presentes en las cargas de corriente alterna del sistema. Su funcionamiento permite obtener información relacionada con la tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia y energía eléctrica. En el módulo didáctico, el PAC3100 constituye el punto principal de medición de las cargas AC, proporcionando los datos necesarios para evaluar el comportamiento eléctrico del sistema. Además, las mediciones obtenidas son adquiridas por el ESP32 mediante comunicación Modbus RTU a través de una interfaz RS-485, permitiendo realizar la comparación de datos y el monitoreo local y remoto del sistema; para revisar las características técnicas del analizador, consultar la **Tabla *7***.

Figura 8

Analizador de redes Siemens SENTRON PAC3100



Nota. Analizador de redes utilizado para la medición de las principales variables eléctricas de las cargas conectadas al sistema tomado de *[27]*.

Tabla 7

Características técnicas del Siemens SENTRON PAC3100

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Fabricante	Siemens
Modelo	SENTRON PAC3100
Tipo	Analizador de redes eléctricas
Tensión de medición	58–277 V AC TRMS
Comunicación	Modbus RTU
Interfaz	RS-485
Variables medidas	Corriente(I), Potencia Activa (P), Potencia Reactiva (Q), Potencia Aparente, FP, frecuencia y energía
Función	Medición y monitoreo de variables eléctricas
Clase de precisión	Clase 1 para energía activa

Nota. La tabla presenta las principales características del analizador de redes utilizado para medir las variables eléctricas de las cargas conectadas al sistema fotovoltaico.

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Protocolo	Comunicación
Tipo de transmisión	Serial diferencial
Dispositivo principal	ESP32
Equipo medidor	PAC3100
Función	Transmisión de variables eléctricas
Aplicación	Adquisición automática de datos

Nota. La tabla presenta las características de la interfaz de comunicación utilizada para transmitir las variables eléctricas medidas por el PAC3100 hacia el ESP32. Elaboración propia.

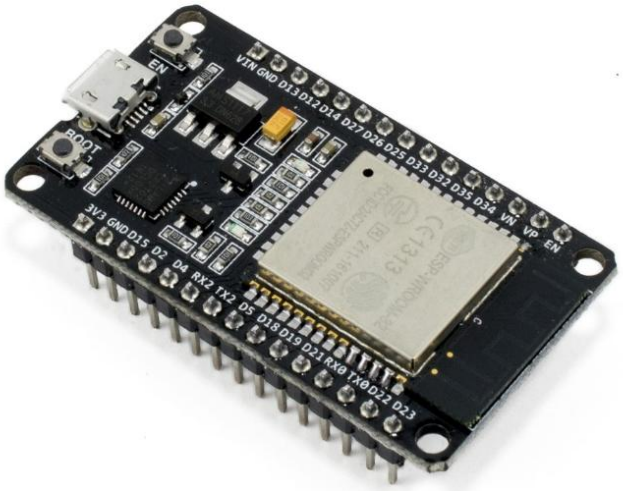
Sistema de Adquisición de Datos ESP32

Nombre del elemento: Placa de desarrollo ESP32 DevKit.

El ESP32 ver **Figura *9*** constituye la unidad central de adquisición, procesamiento y comunicación del sistema. Su funcionamiento permite recibir los datos provenientes del analizador de energía PAC3100 mediante el protocolo de comunicación, procesarlos y enviarlos hacia los diferentes medios de visualización implementados en el módulo didáctico. Además, su conectividad Wi-Fi permite transmitir las variables eléctricas hacia una plataforma IoT como Adafruit IO, facilitando el monitoreo remoto de los parámetros medidos. En el módulo didáctico, el ESP32 integra simultáneamente el analizador de energía, la pantalla LCD y los demás dispositivos mediante sus diferentes interfaces y periféricos de comunicación, como UART, I2C, SPI y ADC; para revisar sus características técnicas, consultar la **Tabla *8***.

Figura 9

ESP32 DevKit



Nota. Placa ESP32 utilizada como unidad de adquisición, procesamiento y transmisión de las variables eléctricas del sistema tomado de *[25]*.

Tabla 8

Características técnicas de la placa ESP32

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Microcontrolador	ESP32
Arquitectura	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6
Frecuencia	Hasta 240 MHz
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Bluetooth	Bluetooth/BLE
Nivel lógico	3,3 V
Comunicación	UART, I2C y SPI
Conversión analógica	ADC
Función	Adquisición y procesamiento de datos
Conectividad	Comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi

Nota. La tabla presenta las principales características técnicas del ESP32 utilizado como unidad de adquisición, procesamiento y transmisión de los datos eléctricos del sistema.

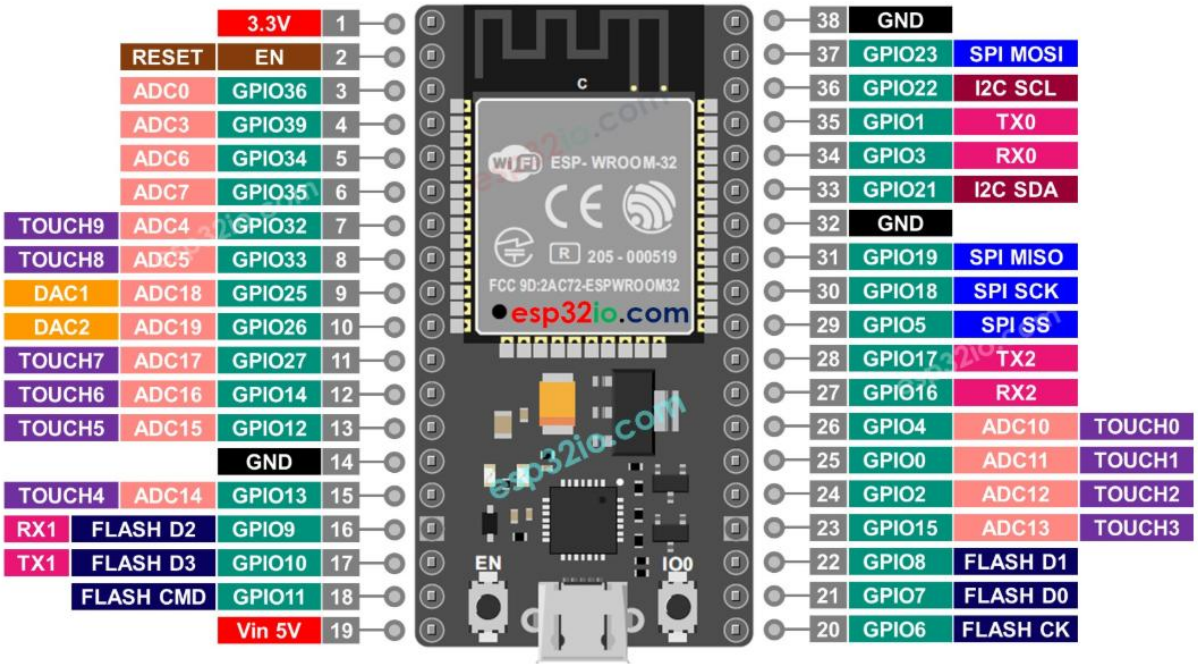
Distribución de Pines del ESP32

Nombre del elemento: Distribución de pines del ESP32 DevKit V1.

El ESP32 ver **Figura *10*** constituye la unidad central de adquisición, procesamiento y comunicación del sistema. Su funcionamiento permite recibir los datos provenientes del analizador de energía PAC3100 mediante el protocolo de comunicación, procesarlos y enviarlos hacia los diferentes medios de visualización implementados en el módulo didáctico. Además, su conectividad Wi-Fi permite transmitir las variables eléctricas hacia una plataforma IoT como Adafruit IO, facilitando el monitoreo remoto de los parámetros medidos. En el módulo didáctico, el ESP32 integra simultáneamente el analizador de energía, la pantalla LCD y los demás dispositivos mediante sus diferentes interfaces y periféricos de comunicación, como UART, I2C, SPI y ADC; para revisar sus características técnicas, consultar la **Tabla *9*.**

Figura 10

Distribución de pines del ESP32



Nota. Distribución de pines y principales funciones del ESP32 utilizadas como referencia para la conexión de los dispositivos del sistema. Adaptado de ESP32IO tomado de *[28]*.

La utilización de GPIO21 y GPIO22 para I2C es especialmente conveniente porque corresponden a las líneas SDA y SCL utilizadas habitualmente en el ESP32 DevKit. De igual manera, GPIO16 y GPIO17 pueden utilizarse como UART2 para establecer la comunicación.

Tabla 9

Distribución pines

GPIO	Funciones principales	Observación
GPIO0	GPIO / ADC / Touch / Boot	Pin relacionado con el modo de arranque
GPIO2	GPIO / ADC / Touch	Puede estar relacionado con funciones de arranque
GPIO4	GPIO / ADC / Touch	Entrada/salida digital
GPIO5	GPIO / SPI	Pin utilizado en determinadas configuraciones SPI
GPIO12	GPIO / ADC / Touch / SPI	Pin de configuración; utilizar con precaución
GPIO13	GPIO / ADC / Touch / SPI	Entrada/salida digital
GPIO14	GPIO / ADC / Touch / SPI	Puede utilizarse para comunicación SPI
GPIO15	GPIO / ADC / Touch / SPI	Pin relacionado con configuración de arranque
GPIO16	GPIO / UART2 RX	Recepción serial
GPIO17	GPIO / UART2 TX	Transmisión serial
GPIO18	GPIO / SPI SCK	Reloj SPI
GPIO19	GPIO / SPI MISO	Recepción SPI
GPIO21	GPIO / I2C SDA	**Datos I2C – LCD**
GPIO22	GPIO / I2C SCL	**Reloj I2C – LCD**
GPIO23	GPIO / SPI MOSI	Entrada/salida digital
GPIO25	GPIO / ADC / DAC	Conversión analógica/digital
GPIO26	GPIO / ADC / DAC	Conversión analógica/digital
GPIO27	GPIO / ADC / Touch	Entrada/salida digital
GPIO32	GPIO / ADC / Touch	Entrada analógica
GPIO33	GPIO / ADC / Touch	Entrada analógica
GPIO34	ADC / entrada	**Solo entrada**
GPIO35	ADC / entrada	**Solo entrada**
GPIO36	ADC / entrada	**Solo entrada**
GPIO39	ADC / entrada	**Solo entrada**

Nota. La tabla presenta una selección de las principales funciones de los GPIO disponibles en el ESP32 y sus aplicaciones dentro de la implementación del sistema tomado de *[28]*.

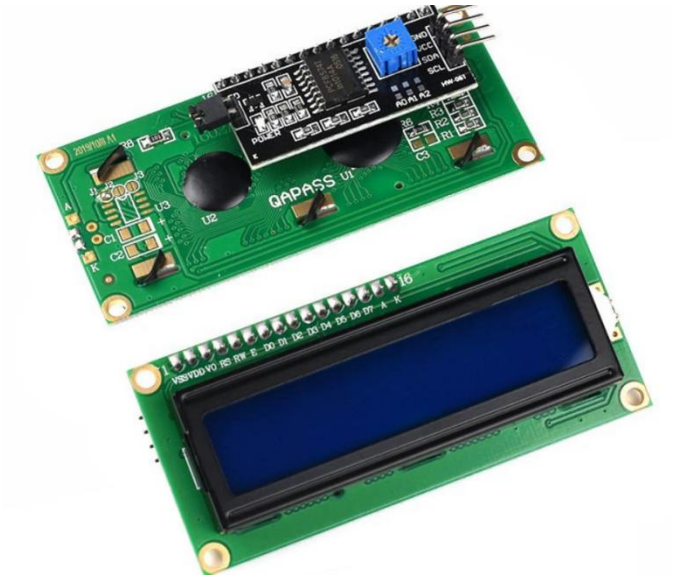
Pantalla LCD 16×2 con I2C

Nombre del elemento: Pantalla LCD 16×2 con módulo adaptador I2C.

La pantalla LCD ver **Figura *11*** constituye el dispositivo encargado de proporcionar una visualización local de las variables obtenidas durante el proceso de adquisición y procesamiento de datos. Su funcionamiento permite mostrar directamente en el módulo didáctico información relacionada con las variables eléctricas medidas, como tensión, corriente, potencia, factor de potencia, frecuencia y energía. La incorporación del adaptador I2C facilita la comunicación con el ESP32 al reducir el número de conexiones necesarias, utilizando principalmente las líneas SDA y SCL. En el módulo didáctico, la comunicación I2C se establece mediante los GPIO21 y GPIO22 del ESP32, permitiendo visualizar de manera directa los parámetros eléctricos del sistema; para revisar las características técnicas de la pantalla, consultar la **Tabla *10***.

Figura 11

LCD 16×2 I2C



Nota. Pantalla LCD 16×2 utilizada para la visualización local de las variables eléctricas adquiridas por el ESP32 *[29]*.

Tabla 10

Características técnicas de la pantalla LCD 16×2 I2C

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tipo	LCD alfanumérica
Tamaño	16 × 2 caracteres
Interfaz	I2C
Línea SDA	GPIO21
Línea SCL	GPIO22
Alimentación	5 V DC
Dirección I2C habitual	0x27 / 0x3F
Función	Visualización local de variables

Nota. La tabla presenta las características principales de la pantalla LCD utilizada para la visualización local de las variables eléctricas adquiridas por el ESP32.

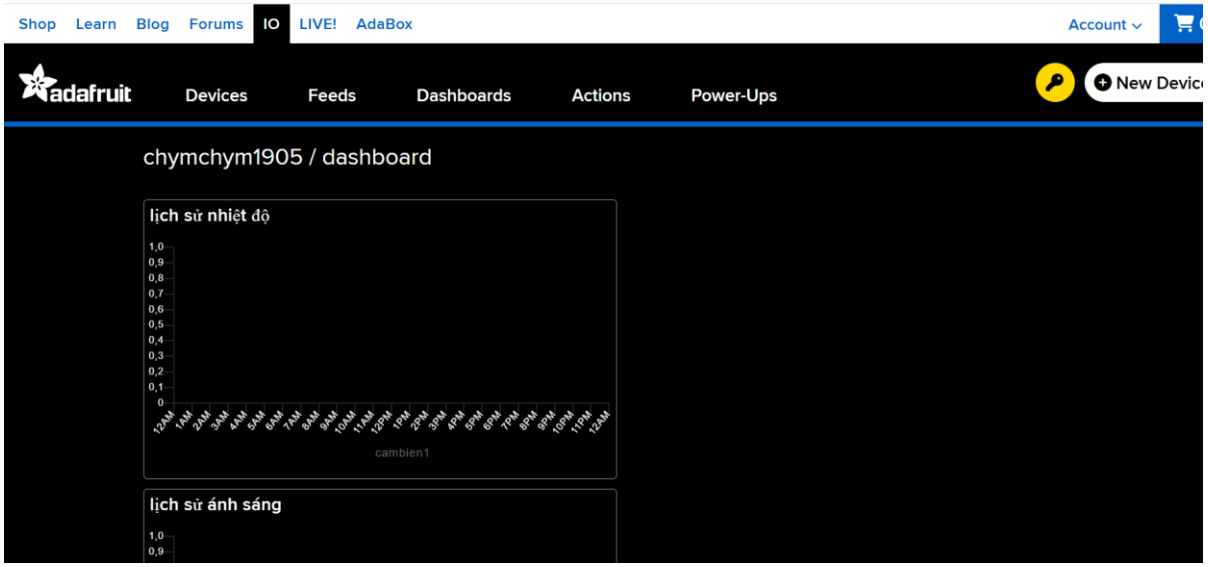
Plataforma de Monitoreo Adafruit IO

Nombre del elemento: Plataforma IoT Adafruit IO.

La **Figura *12*** presenta la interfaz de monitoreo remoto implementada mediante Adafruit IO, la cual constituye la etapa de supervisión remota del sistema. Esta plataforma permite visualizar los datos adquiridos durante el proceso de medición de las variables eléctricas. Su funcionamiento se basa en la recepción de la información enviada por el ESP32 mediante conexión Wi-Fi, posibilitando el almacenamiento y la representación de los datos a través de gráficos, indicadores y paneles de visualización. En el módulo didáctico, Adafruit IO permite realizar el seguimiento de las variables eléctricas durante las pruebas sin necesidad de permanecer físicamente frente al sistema, complementando la visualización local proporcionada por la pantalla LCD con un sistema de monitoreo remoto mediante Internet. Para conocer las características de la plataforma utilizada, consultar la **Tabla *11***.

Figura 12

Características de la plataforma de monitoreo Adafruit IO



Nota. La tabla presenta las principales características de la plataforma IoT utilizada para almacenar, visualizar y monitorear remotamente las variables eléctricas obtenidas mediante el ESP32 tomado de *[30]*.

Tabla 11

Características de la plataforma de monitoreo Adafruit IO

Parámetro / Característica	Especificación / Valor
Tipo	Plataforma IoT
Dispositivo de conexión	ESP32
Comunicación	Wi-Fi / Internet
Variables	Voltaje, corriente, potencia, FP, frecuencia y energía
Visualización	Gráficos e indicadores
Función	Monitoreo y almacenamiento remoto
Aplicación	Supervisión del sistema fotovoltaico

Nota. La tabla presenta las principales características de la plataforma IoT utilizada para almacenar, visualizar y monitorear remotamente las variables eléctricas obtenidas mediante el ESP32.

Marco conceptual

Módulo didáctico: recurso físico diseñado para apoyar actividades prácticas mediante la interacción con componentes, variables y condiciones de operación de un sistema.

Sistema fotovoltaico autónomo: sistema de generación eléctrica que utiliza energía solar y opera sin depender directamente de la red eléctrica, pudiendo incorporar regulación, almacenamiento y conversión.

Generación fotovoltaica: conversión de la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica mediante dispositivos fotovoltaicos.

Almacenamiento de energía: acumulación de la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico para su posterior utilización; en este proyecto se realiza mediante una batería.

Conversión DC/AC: transformación de energía eléctrica en corriente continua a corriente alterna mediante un inversor para alimentar las cargas AC utilizadas en el módulo.

Carga eléctrica: dispositivo conectado al sistema que consume energía eléctrica. En este trabajo se emplean diferentes cargas AC para evaluar el comportamiento de las variables eléctricas durante la operación.

Variable eléctrica: magnitud utilizada para caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema. En el lado AC del módulo se consideran principalmente voltaje, corriente y potencia.

Instrumentación: conjunto de dispositivos y procedimientos empleados para medir, adquirir y presentar las variables asociadas al funcionamiento de un sistema.

Analizador de energía: instrumento destinado a medir y proporcionar parámetros eléctricos de una instalación o carga. En el proyecto esta función corresponde al SENTRON PAC3100.

Sistema embebido: sistema electrónico basado en hardware y software diseñado para realizar funciones específicas. En el módulo se utiliza un ESP32 para adquisición, procesamiento y comunicación de información.

Monitoreo remoto: supervisión de las variables del sistema desde una plataforma externa mediante conectividad de red.

Internet de las Cosas (IoT): integración de dispositivos físicos con redes de comunicación para adquirir, transmitir y visualizar información. En el proyecto se aplica al envío de variables hacia Adafruit IO.

Dashboard: interfaz gráfica utilizada para presentar de manera organizada las variables adquiridas y facilitar el seguimiento de su comportamiento.

Adafruit IO: plataforma IoT utilizada en el proyecto para recibir, almacenar y visualizar remotamente las variables enviadas por el ESP32.

Variables ambientales: magnitudes asociadas con las condiciones del entorno. En este proyecto corresponden a temperatura y humedad, adquiridas mediante el sensor DHT11.

Capítulo III

Metodología

El presente Trabajo de Integración Curricular se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, debido a que la evaluación del módulo se fundamentará en la medición y análisis de variables eléctricas y ambientales obtenidas durante su funcionamiento. Se registrarán principalmente voltaje, corriente y potencia de las cargas conectadas en el lado AC del sistema, así como temperatura y humedad del entorno. Los datos obtenidos permitirán analizar el comportamiento del módulo ante diferentes condiciones de operación y carga.

La investigación será de tipo aplicada y experimental. Se considera aplicada debido a que utiliza conocimientos de energía solar fotovoltaica, electrónica de potencia, instrumentación, sistemas embebidos y comunicaciones industriales para desarrollar una solución tecnológica destinada a los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sede Latacunga. El componente experimental estará asociado con la ejecución controlada de pruebas sobre el módulo, modificando condiciones de operación y las cargas conectadas para registrar y analizar las variables obtenidas.

El desarrollo metodológico se organizará en etapas sucesivas que comprenderán el diseño del sistema, implementación física, integración del sistema de instrumentación y monitoreo, y validación experimental. Esta organización permitirá mantener correspondencia entre los requerimientos establecidos para el módulo, su implementación y las pruebas utilizadas para verificar su funcionamiento.

Dimensionamiento del módulo

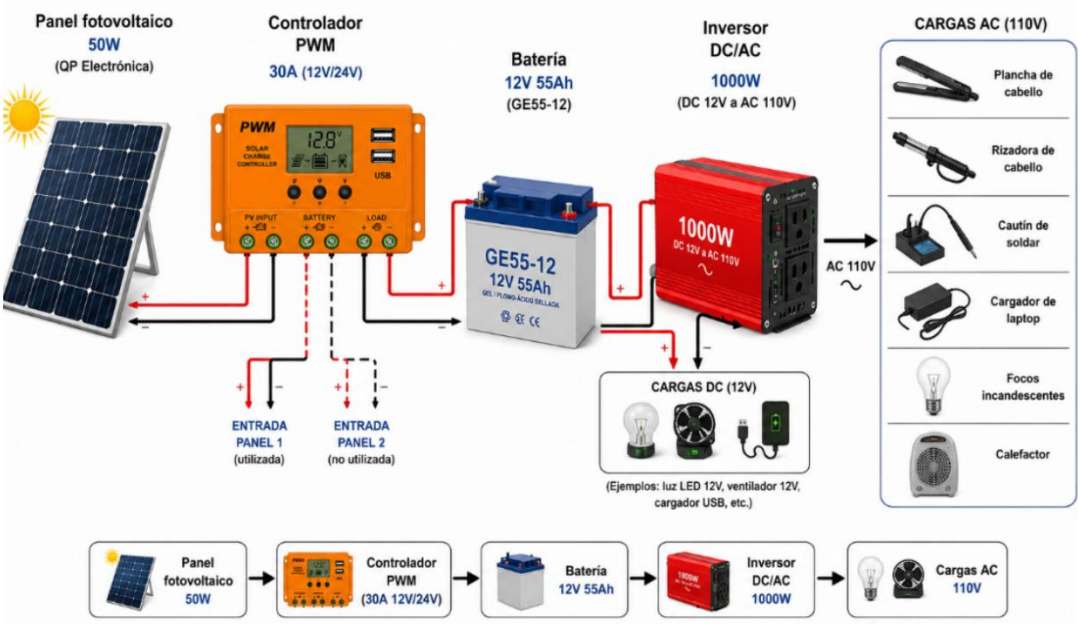
En la primera etapa se establecerá la arquitectura general del módulo fotovoltaico considerando las etapas de generación, regulación, almacenamiento, conversión y alimentación de cargas. La configuración estará conformada por un panel fotovoltaico de 50 W, controlador de carga PWM de 30 A, batería de 12 V y 55 Ah e inversor de 12 VDC a 110 VAC y

1000 W. La selección e integración de estos elementos se realizará considerando sus características nominales, compatibilidad eléctrica y requerimientos de operación.

La arquitectura energética general estará constituida por:

Figura 13

Arquitectura general de un sistema fotovoltaico



Nota. Diagrama de la arquitectura energética del sistema fotovoltaico implementado, compuesto por un panel fotovoltaico de 50 W, un controlador de carga PWM de 30 A, una batería de 12 V–55 Ah, un inversor DC/AC de 1000 W y las cargas eléctricas conectadas a la salida del sistema.

En esta etapa se determinarán además los conductores, terminales y elementos de conexión requeridos. Se elaborarán los diagramas eléctricos y de distribución física necesarios para la construcción del módulo.

La estructura será implementada mediante una caja móvil de madera provista de ruedas, como se observa en la **Figura *14***. El panel fotovoltaico se instalará en la parte superior

mediante un mecanismo que permita modificar su ángulo de inclinación. En el interior se ubicarán la batería, los elementos eléctricos y electrónicos, así como los diferentes puntos de conexión. Además, se incorporará una cubierta transparente que permita visualizar los componentes internos del módulo, facilitando la identificación de los elementos que conforman el sistema y su funcionamiento durante las prácticas.

Figura 14

Banco de pruebas de iluminación y panel de control frontal.



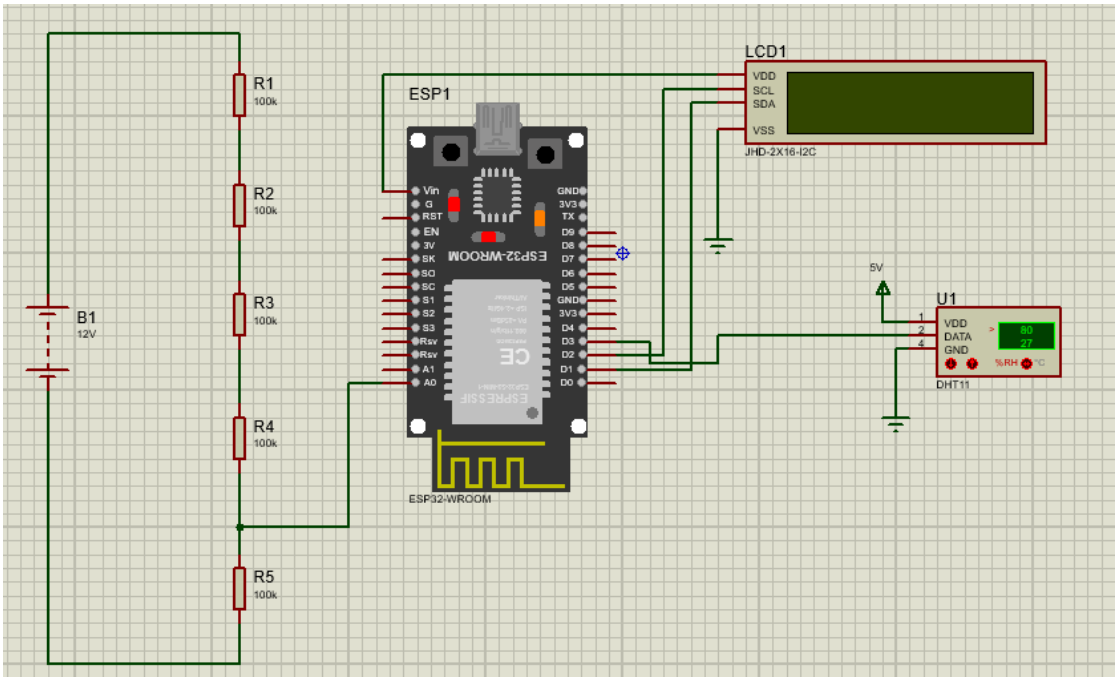
Nota. Módulo de cargas de iluminación con tres bombillas incandescentes instaladas dentro de una cámara reflectante (con el foco central activado), integrado a un panel frontal de control con bornes de conexión.

Para la medición del voltaje de la batería se implementará un divisor de voltaje, como se muestra en la **Figura *15***, conformado por cinco resistencias de 100 kΩ conectadas en serie. Este circuito tiene como finalidad reducir la tensión de 12 V proporcionada por la batería a un nivel adecuado para su lectura mediante la entrada analógica del ESP32. Considerando que el ESP32 opera con una alimentación de 3,3 V en su lógica interna, el divisor permite disminuir el nivel de tensión de entrada y proteger el microcontrolador durante el proceso de medición. La

señal obtenida será procesada por el ESP32 para determinar el voltaje de la batería y posteriormente visualizarlo en la pantalla LCD I2C y enviarlo a la plataforma Adafruit IO para su monitoreo.

Figura 15

Diagramas de conexión entre componentes electrónicos



Nota. Diagrama correspondiente al sistema fotovoltaico implementado en el proyecto, que representa la conexión y funcionamiento de los principales componentes del sistema.

A continuación, se presentan los pines utilizados en el ESP32 para la implementación del módulo didáctico, indicando la función asignada a cada uno, el elemento conectado y la descripción de su aplicación dentro del sistema. La distribución de los pines permite establecer la comunicación entre el ESP32, la pantalla LCD mediante el protocolo I2C y el analizador de energía PAC3100. Asimismo, se consideran los terminales destinados a la alimentación y

referencia común de los dispositivos; para revisar la asignación de cada pin y su función específica, consultar la **Tabla *12***.

Tabla 12

Distribución de pines del ESP32 utilizados en el sistema

Pin / GPIO	Función utilizada	Elemento conectado	Descripción
GPIO21	SDA	LCD I2C	Línea de datos del bus I2C
GPIO22	SCL	LCD I2C	Línea de reloj del bus I2C
GPIO16	RX2	PAC3100	Recepción de datos Modbus RTU
GPIO17	TX2	PAC3100	Transmisión de datos Modbus RTU
GPIO23	GPIO digital	Sensor / señal auxiliar	Entrada o salida digital según la implementación
3V3	Alimentación	Circuitos de 3,3 V	Alimentación de dispositivos compatibles
VIN	Alimentación	Entrada de la placa	Alimentación de la placa según el modelo
GND	Referencia	Todos los dispositivos	Tierra común del sistema
GPIO36	Señal divisor voltaje	Resistencias R4 Y R5	Señal para voltaje

Nota. Pines de Utilización en el sistema

Implementación del sistema fotovoltaico

La segunda etapa comprenderá el montaje e integración de los componentes correspondientes a generación, regulación, almacenamiento y conversión de energía. Se realizarán las conexiones entre el panel fotovoltaico, controlador PWM, batería e inversor respetando polaridades, niveles nominales de tensión y condiciones de seguridad.

En la salida AC del inversor se dispondrán puntos de conexión para incorporar diferentes cargas eléctricas. Esto permitirá modificar las condiciones de consumo durante las pruebas experimentales mediante la conexión y desconexión controlada de las cargas disponibles.

Una vez finalizado el montaje se realizarán pruebas individuales de las diferentes etapas antes de operar el sistema completo, verificando conexiones, niveles de voltaje y funcionamiento de los dispositivos de protección.

Implementación del sistema de monitoreo remoto mediante Adafruit IO

La implementación del sistema de monitoreo remoto se realizó utilizando el ESP32 como unidad de adquisición y comunicación, encargado de recibir y procesar los datos obtenidos del sistema de medición. El ESP32 integra las lecturas de voltaje y las variables ambientales de temperatura y humedad, para posteriormente transmitirlas mediante conexión Wi-Fi hacia la plataforma Adafruit IO. En esta plataforma se configuró un dashboard para visualizar los valores de cada variable, permitiendo realizar el seguimiento remoto del comportamiento del sistema. De forma paralela, las variables son mostradas localmente mediante una pantalla LCD I2C, estableciendo dos medios de supervisión: uno local y otro remoto.

Implementación del sistema de instrumentación y adquisición de datos

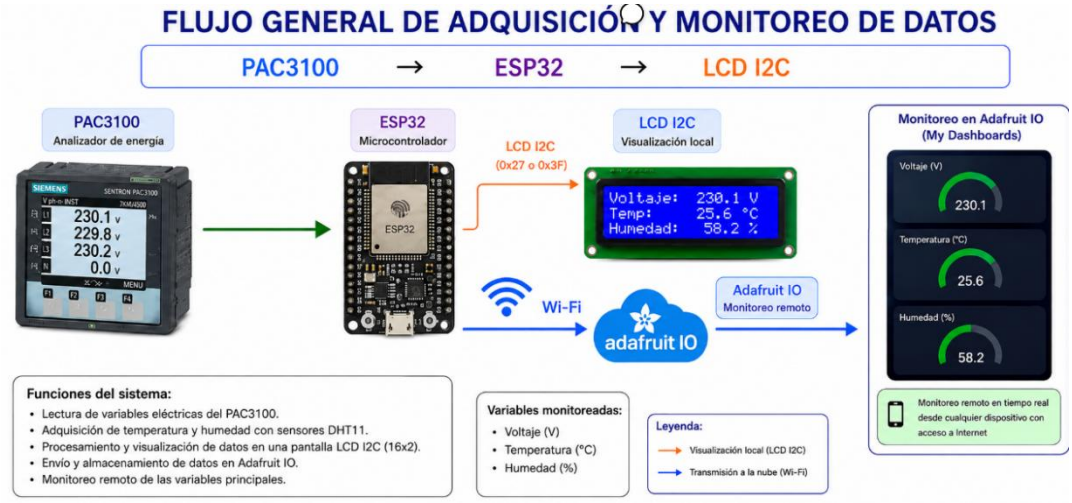
Para el monitoreo de las variables eléctricas correspondientes a las cargas AC se utilizará un analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100. El instrumento permitirá obtener en tiempo real las variables de interés, principalmente voltaje, corriente y potencia.

La información registrada por el PAC3100 será adquirida por un microcontrolador ESP32 mediante un circuito de adquisición. El ESP32 procesará la información recibida e integrará adicionalmente las mediciones de temperatura y humedad proporcionadas por un sensor DHT11.

La adquisición seguirá de manera general el siguiente flujo:

Figura 16

Flujo general de adquisición y monitoreo de datos



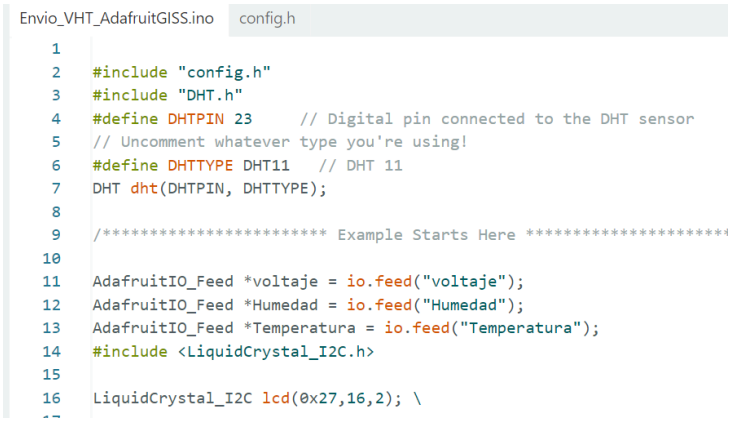
Nota. Diagrama elaborado mediante inteligencia artificial, basado en la implementación del sistema de adquisición y monitoreo de datos mediante el analizador de energía PAC3100, el microcontrolador ESP32, la pantalla LCD I2C y la plataforma Adafruit IO.

Las variables serán visualizadas localmente mediante una pantalla LCD y transmitidas mediante la conectividad inalámbrica del ESP32 hacia la plataforma Adafruit IO. En esta plataforma se implementará un dashboard para registrar y representar gráficamente el comportamiento temporal de las variables.

En relación con el desarrollo de la programación del módulo educativo, se consideró al ESP32 como la unidad principal para la adquisición, el procesamiento y la comunicación de datos. Para integrar las diferentes funciones del sistema, se incorporaron las librerías necesarias para el sensor DHT11, la pantalla LCD I2C y la comunicación con la plataforma Adafruit IO. Asimismo, se definieron los pines utilizados para la adquisición de las variables y los feeds destinados al almacenamiento de los datos en la plataforma IoT, como se muestra en la **Figura *17***.

Figura 17

Declaración de librerías, sensor DHT11, pantalla LCD.



Nota. Se presentan las librerías utilizadas en el programa, la configuración del sensor DHT11 conectado al GPIO23, los feeds destinados al almacenamiento de voltaje, humedad y temperatura en Adafruit IO, y la configuración de la pantalla LCD I2C con dirección 0x27.

Una vez definidos los componentes requeridos, la inicialización de los dispositivos se realiza dentro de la función setup(). En esta etapa se inicializa la pantalla LCD mediante lcd.init(), se activa su retroiluminación con lcd.backlight() y se configura el sensor DHT11 mediante dht.begin(). Asimismo, se establece la comunicación entre el ESP32 y la plataforma Adafruit IO mediante la instrucción io.connect(). El programa permanece en espera hasta comprobar que la conexión se haya establecido correctamente, como se muestra en la **Figura *18***.

Figura 18

Inicialización de los dispositivos y conexión con Adafruit IO.

```
void setup() {
  lcd.init();         // initialize the lcd
  lcd.backlight();    // open the backlight
  // start the serial connection
  pinMode(2,OUTPUT);
  digitalWrite(2,LOW);

  // connect to io.adafruit.com
  io.connect();

  // wait for a connection
  while(io.status() < AIO_CONNECTED) {
    lcd.print(".");
    delay(500);
  }

  // we are connected
  digitalWrite(2,HIGH);

}
```

Nota. Se muestra la inicialización de la pantalla LCD I2C y del sensor DHT11, así como el establecimiento de la conexión entre el ESP32 y la plataforma Adafruit IO.

La obtención de los parámetros ambientales se realiza dentro de la función loop(). La lectura de la humedad relativa y la temperatura se efectúa mediante las funciones dht.readHumidity() y dht.readTemperature(), respectivamente. Para garantizar la validez de los datos adquiridos, se emplea la función isnan(), la cual permite detectar posibles errores durante la lectura del sensor. En caso de presentarse una falla, el sistema muestra el mensaje “Falla lectura” en la pantalla LCD, como se presenta en la **Figura *19***.

Figura 19

Lectura y validación de las variables del sensor DHT11.

```
int valor = analogRead(36);
float voltaje1 =((floatMap(valor,0,4095,0,3.3))+0.1)*5;
float h = dht.readHumidity();
 float t = dht.readTemperature();

lcd.clear();
if (isnan(h) || isnan(t) ) {
  lcd.clear();
  lcd.print("Falla lectura");
  return;
}
```

Nota. Se muestra la adquisición de humedad y temperatura mediante el sensor DHT11 y la validación de los datos obtenidos mediante la función isnan(), utilizada para detectar posibles errores durante la lectura.

Los valores obtenidos mediante el sensor DHT11 se muestran localmente en la pantalla LCD I2C de 16 × 2. Para ello, se utiliza el método lcd.setCursor(), que permite especificar la posición inicial de escritura en cada línea de la pantalla. El valor de la temperatura se muestra en la primera línea, mientras que la humedad relativa se presenta en la segunda línea, como se observa en la **Figura *20***. En la etapa final de la implementación del sistema, el voltaje no se muestra en la pantalla LCD, debido a que esta variable se monitorea de forma remota mediante la plataforma Adafruit IO.

Figura 20

Visualización de temperatura y humedad en la pantalla LCD I2C.

```
 lcd.setCursor(0, 0);  // display position
 lcd.print("Temp: ");
 lcd.print(t);

 lcd.setCursor(0, 1);  // display position
 lcd.print("humi: ");
 lcd.print(h);
```

Nota. Se muestra la rutina utilizada para presentar la temperatura y la humedad relativa en la pantalla LCD 16 × 2. La temperatura se presenta en la primera fila y la humedad en la segunda fila.

Para la adquisición del voltaje se utilizó el convertidor analógico-digital (ADC) integrado en el ESP32 mediante el GPIO36. La lectura de la señal analógica se realiza mediante la función analogRead(36), cuyo resultado es almacenado en la variable valor, como se muestra en la **Figura *22***. Posteriormente, mediante la función floatMap(), se realiza la conversión de la lectura digital del ADC a un valor de voltaje correspondiente, como se presenta en la **Figura *21***.

Figura 21.

Función de conversión de la lectura analógica a voltaje

```
float floatMap(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max) {
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}
```

Nota. Se presenta la función floatMap(), utilizada para establecer la relación entre el valor digital obtenido por el convertidor analógico-digital (ADC) del ESP32 y el nivel de voltaje correspondiente. Esta función permite transformar la lectura del ADC en una magnitud de tensión para su posterior procesamiento.

Figura 22

Lectura y cálculo del voltaje mediante el ADC del ESP32

```
int valor = analogRead(36);
float voltaje1 =((floatMap(valor,0,4095,0,3.3))+0.1)*5;
```

Nota. Se muestra la lectura de la señal analógica mediante el GPIO36 utilizando la función analogRead(36) y el cálculo del voltaje mediante la función floatMap(). El valor resultante se almacena en la variable voltaje1 para posteriormente ser enviado a la plataforma Adafruit IO. En la configuración final del sistema, este valor no se visualiza en la pantalla LCD.

Para hacer posible la comunicación inalámbrica con Adafruit IO se empleó la biblioteca AdafruitIO_WiFi.h. El proceso de comunicación inalámbrica se configuró mediante el archivo config.h, que contiene los parámetros necesarios, incluyendo el nombre de usuario de Adafruit IO, la clave de acceso y las credenciales de la red Wi-Fi. Estos parámetros permiten al ESP32 establecer la conexión con la plataforma Adafruit IO y transmitir los datos recolectados, como se muestra en la **Figura *23***.

Figura 23

Configuración de la comunicación Wi-Fi con Adafruit IO.

```
#define IO_USERNAME "Giss02"
#define IO_KEY "aio_XMYs55UhCbJceg3Y17Q3KjbJjos9"

#define WIFI_SSID "ESPE"
#define WIFI_PASS ""

// comment out the following lines if you are using fona or ethernet
#include "AdafruitIO_WiFi.h"
```

Nota. Se presenta la configuración de los parámetros necesarios para establecer la comunicación entre el ESP32, la red Wi-Fi y la plataforma Adafruit IO. Por seguridad, la clave de acceso se mantiene oculta.

Una vez establecida la comunicación con Adafruit IO, el ESP32 mantiene activa la conexión mediante la función io.run(). Posteriormente, los valores adquiridos son transmitidos a los diferentes feeds mediante la función save(). El valor del voltaje se almacena en el feed correspondiente a voltaje, mientras que los valores obtenidos mediante el sensor DHT11 se almacenan en los feeds de Humedad y Temperatura, como se muestra en la **Figura *24***.

Figura 24

Envío de las variables de monitoreo hacia Adafruit IO.

```
  delay(1000);
  // Publicar un mensaje cada 5 segundos
  static unsigned long lastMsg = 0;
  unsigned long now = millis();
  if (now - lastMsg > 60000) {
    lastMsg = now;
    voltaje->save(voltaje1);
    Humedad->save(h);
    Temperatura->save(t);
  }

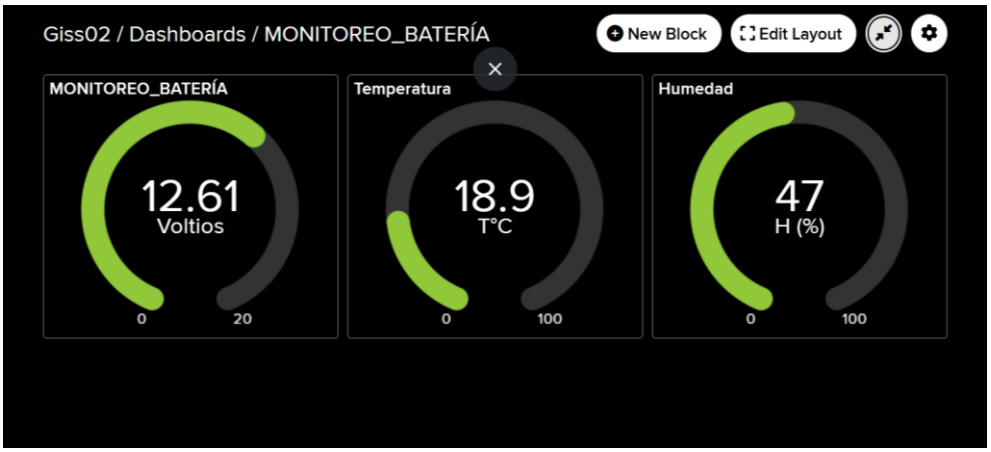
}
```

Nota. Se muestra el mantenimiento de la comunicación con Adafruit IO mediante io.run() y el envío de los valores de voltaje, humedad y temperatura hacia sus respectivos feeds mediante la función save(). El envío de datos se realiza aproximadamente cada 60 segundos.

Una vez establecida la comunicación entre el ESP32 y la plataforma Adafruit IO, los valores adquiridos por el sistema son enviados a los feeds correspondientes para su monitoreo remoto. En la plataforma se configuraron los indicadores necesarios para visualizar las variables de voltaje, temperatura y humedad, permitiendo observar su comportamiento de manera gráfica y en tiempo real. La **Figura *25*** presenta la interfaz de Adafruit IO implementada para el monitoreo remoto de las variables del módulo didáctico.

Figura 25

Visualización de las variables del sistema en la plataforma Adafruit IO



Nota. Interfaz de Adafruit IO utilizada para el monitoreo remoto de las variables de voltaje, temperatura y humedad adquiridas por el ESP32. La plataforma permite visualizar los valores mediante indicadores y gráficos, facilitando el seguimiento del comportamiento de las variables del módulo didáctico.

Para consultar el código completo utilizado en la implementación, se puede revisar el Anexo A.

Validación de la comunicación y monitoreo

Antes de realizar las pruebas energéticas se verificará individualmente el funcionamiento del sistema de adquisición. La validación comprenderá la lectura de los registros Modbus del PAC3100, recepción de las variables en el ESP32, presentación de los valores en la pantalla LCD y transmisión hacia Adafruit IO.

Se realizaron pruebas experimentales utilizando diferentes cargas de corriente alterna (AC), como cautín, focos, calefactor y cargador de laptop, con el objetivo de analizar cuantitativamente el comportamiento del sistema fotovoltaico ante distintas condiciones de consumo. Durante cada prueba se registraron las variables eléctricas mediante el PAC3100, mientras que el ESP32, programado mediante Arduino IDE, permitió recibir y procesar la

información, además de medir el voltaje de la batería y las variables de temperatura y humedad mediante el sensor DHT11. Los datos obtenidos fueron visualizados localmente en el LCD y enviados mediante Wi-Fi a Adafruit IO, donde se configuró un dashboard para su monitoreo y almacenamiento. De esta manera, los resultados permitirán comparar los valores medidos directamente por el PAC3100 con los recibidos por el ESP32/LCD y los registrados en Adafruit IO, obteniendo posteriormente diferencias y porcentajes de variación que permitan evaluar cuantitativamente la correspondencia de las mediciones.

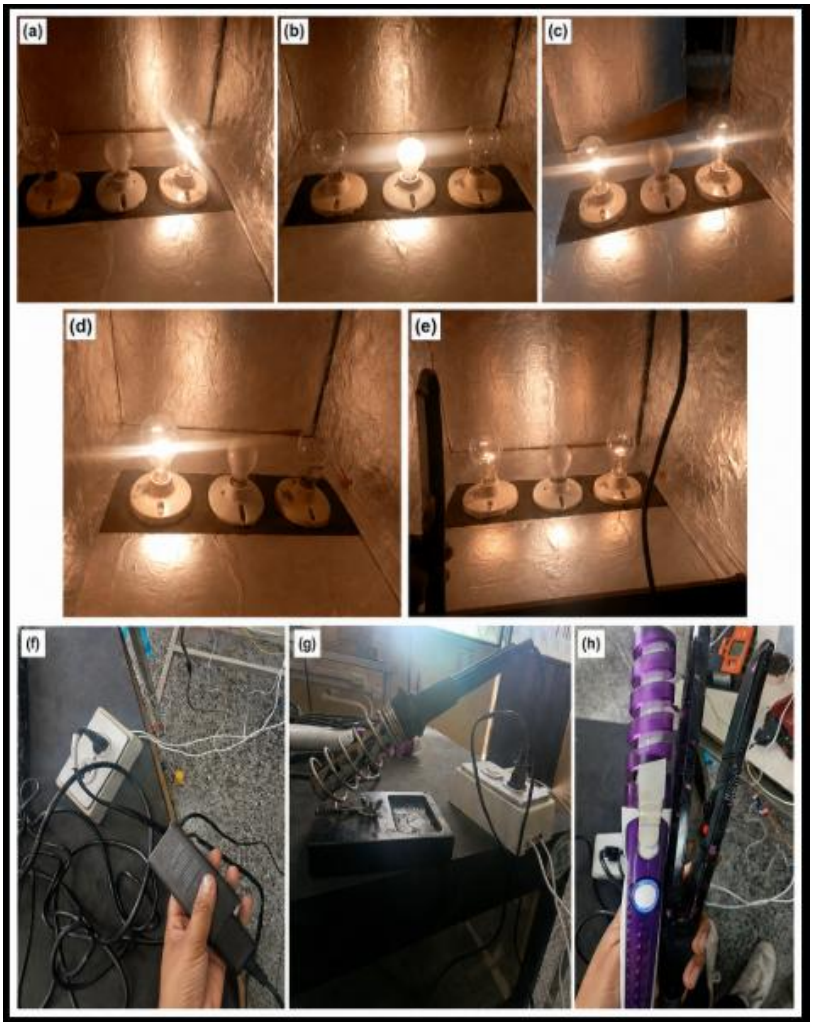
Validación experimental del módulo

Una vez comprobado el funcionamiento de las diferentes etapas, se realizarán pruebas experimentales mediante la conexión de cargas de distintas características y niveles de potencia. Durante cada prueba se registrarán las variables eléctricas proporcionadas por el PAC3100 y las variables ambientales adquiridas mediante el DHT11.

Figura *26* , se presentan las pruebas experimentales realizadas con las diferentes cargas utilizadas en el sistema. En cada tabla se detallan las condiciones de operación de la carga y las principales variables eléctricas medidas. Los valores de corriente, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia fueron obtenidos directamente mediante el analizador de energía PAC3100. Por otra parte, los valores de voltaje correspondientes a la batería, el panel fotovoltaico, la carga y la salida del divisor de voltaje conformado por las resistencias R4-R5 fueron medidos utilizando un multímetro digital. Estos datos constituyen la referencia para realizar posteriormente la comparación cuantitativa con los valores adquiridos por el sistema de monitoreo basado en el ESP32, permitiendo evaluar la precisión y correspondencia de las mediciones realizadas por ambos sistemas.

Figura 26

Dispositivos y cargas eléctricas (AC/DC)



Nota: La figura ilustra las diferentes cargas de prueba empleadas en el montaje experimental: (a)–(e) Banco de pruebas de iluminación con bombillas incandescentes configuradas en distintas combinaciones y estados de activación; (f) Adaptador de corriente AC/DC para dispositivos electrónicos; (g) Cautín de soldadura de tipo resistivo; y (h) Electrodomésticos de calor (plancha y rizador de cabello) utilizados como cargas resistivas adicionales.

En la **Tabla 13** se presentan los resultados obtenidos durante la prueba con tres focos incandescentes conectados simultáneamente. En este ensayo se registraron los valores de corriente, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia mediante el analizador de energía PAC3100. Asimismo, se midieron mediante un multímetro los voltajes correspondientes a la batería, el panel fotovoltaico, la carga y la salida del divisor de voltaje R4-R5.

Tabla 13

Datos de 3 focos incandescentes

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	1,8	PAC3100
Potencia aparente	VA	200	PAC3100
Potencia activa	W	200	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	30	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,14	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,20	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,18	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,52	Multímetro

Nota. Elaboración propia a partir de datos obtenidos con tres focos incandescentes.

En la **Tabla 14** se muestran los datos obtenidos durante la prueba de funcionamiento utilizando una plancha de cabello como carga eléctrica. Se registraron mediante el PAC3100 las principales variables eléctricas de la carga y, mediante el multímetro digital, los diferentes niveles de voltaje presentes en la batería, el panel fotovoltaico, la carga y el divisor de voltaje R4-R5.

Tabla 14

Datos plancha de cabello

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,3	PAC3100
Potencia aparente	VA	30	PAC3100
Potencia activa	W	10	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,96	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,98	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,52	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con una plancha de cabello.

En la **Tabla 15** se presentan los resultados correspondientes a la prueba realizada con una rizadora de cabello. Durante el ensayo se determinaron los valores de corriente, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia mediante el PAC3100, además de los voltajes de operación medidos con el multímetro digital.

Tabla 15

Datos rizadora de cabello.

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,1	PAC3100
Potencia aparente	VA	20	PAC3100
Potencia activa	W	10	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,79	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,84	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,79	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,52	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con una rizadora de cabello.

En la **Tabla 16** se presentan los resultados obtenidos al conectar simultáneamente una rizadora y una plancha de cabello. Esta prueba permitió analizar el comportamiento eléctrico del sistema al trabajar con dos cargas conectadas de manera conjunta, registrando las

variables eléctricas mediante el PAC3100 y los diferentes niveles de voltaje mediante el multímetro digital.

Tabla 16

Datos entre rizadora de cabello y plancha de cabello

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,3	PAC3100
Potencia aparente	VA	30	PAC3100
Potencia activa	W	30	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,60	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,65	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,60	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,48	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con la rizadora y la plancha de cabello.

En la **Tabla 17** se presentan los datos obtenidos durante la prueba utilizando un calefactor como carga. Debido a su mayor demanda de potencia, esta prueba permitió observar el comportamiento del sistema ante una carga de mayor consumo, registrándose las variables eléctricas mediante el PAC3100 y los voltajes de la batería, panel, carga y divisor R4-R5 mediante el multímetro.

Tabla 17

Datos Calefactor

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	2.3	PAC3100
Potencia aparente	VA	220	PAC3100
Potencia activa	W	220	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	30	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	11,59	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	11,62	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,58	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,27	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con un calefactor.

En la **Tabla 18** se muestran los resultados obtenidos al conectar simultáneamente una plancha de cabello y tres focos incandescentes. Esta prueba permitió evaluar el comportamiento del sistema frente a la operación conjunta de varias cargas, registrando los parámetros eléctricos mediante el PAC3100 y los valores de voltaje mediante el multímetro digital.

Tabla 18

Datos entre la plancha de cabello y 3 focos

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	2	PAC3100
Potencia aparente	VA	210	PAC3100
Potencia activa	W	210	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	30	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	11,97	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	11,95	Multímetro
Voltaje de la carga	V	11,91	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,33	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con una plancha de cabello y tres focos incandescentes.

En la **Tabla 19** se presentan los resultados correspondientes a la prueba realizada con un cautín. Durante este ensayo se registraron las variables eléctricas de la carga mediante el PAC3100, mientras que los voltajes de la batería, panel fotovoltaico, carga y divisor R4-R5 fueron obtenidos utilizando un multímetro digital.

Tabla 19

Datos Cautín

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	2	PAC3100
Potencia aparente	VA	20	PAC3100
Potencia activa	W	20	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,88	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,41	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,46	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,42	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,45	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con un cautín.

En la **Tabla 20** se presentan los datos obtenidos durante la prueba con un cargador de computador. Este ensayo permitió analizar el comportamiento de una carga electrónica y registrar sus parámetros eléctricos mediante el PAC3100, complementando las mediciones con los valores de voltaje obtenidos mediante el multímetro.

Tabla 20

Datos cargador de computador

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	1,1	PAC3100
Potencia aparente	VA	80	PAC3100
Potencia activa	W	10	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	30	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,19	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,36	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,41	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,36	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,42	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con un cargador de computadora.

En la **Tabla 21** se presentan los resultados de la prueba realizada con un cargador de celular. Se registraron las variables eléctricas de la carga mediante el analizador PAC3100 y los diferentes valores de voltaje mediante el multímetro digital, con el propósito de disponer de datos de referencia para la posterior comparación con el sistema basado en el ESP32.

Tabla 21

Datos cargador de celular

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,2	PAC3100
Potencia aparente	VA	30	PAC3100
Potencia activa	W	10	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,49	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,52	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,47	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,46	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con un cargador de celular.

En la **Tabla 22** se presentan los resultados obtenidos durante la prueba individual con el foco 1. El ensayo permitió determinar el comportamiento eléctrico de esta carga mediante la medición de corriente, potencias y factor de potencia con el PAC3100, además de los valores de voltaje medidos con el multímetro digital.

Tabla 22

Datos Foco 1

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,5	PAC3100
Potencia aparente	VA	60	PAC3100
Potencia activa	W	60	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,16	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,20	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,16	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,40	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con el foco 1.

En la **Tabla 23** se muestran los datos obtenidos durante la prueba individual con el foco 2. Al igual que en los ensayos anteriores, se registraron las principales variables eléctricas mediante el PAC3100 y los valores de voltaje correspondientes al sistema mediante el multímetro digital.

Tabla 23

Datos foco 2

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,7	PAC3100
Potencia aparente	VA	80	PAC3100
Potencia activa	W	70	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	20	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,08	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,05	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,08	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,38	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con el foco 2.

En la **Tabla 24** se presentan los resultados obtenidos durante la prueba individual con el foco 3. Los datos obtenidos permiten caracterizar el comportamiento de esta carga y establecer valores de referencia para posteriormente comparar las mediciones realizadas por el sistema de monitoreo implementado.

Tabla 24

Datos foco3

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	0,5	PAC3100
Potencia aparente	VA	60	PAC3100
Potencia activa	W	60	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	10	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,16	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,20	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,16	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,40	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con el foco 3.

En la **Tabla 25** se presentan los resultados correspondientes a la conexión simultánea del foco 1 y el foco 3. Esta prueba permitió evaluar el comportamiento del sistema ante la conexión de dos cargas incandescentes, registrando los parámetros eléctricos mediante el PAC3100 y los voltajes mediante el multímetro digital.

Tabla 25

Datos entre foco 1 y foco 3

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	1,1	PAC3100
Potencia aparente	VA	120	PAC3100
Potencia activa	W	120	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	20	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	12,02	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	12,06	Multímetro
Voltaje de la carga	V	12,01	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,36	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con el foco 1 y el foco 2.

En la **Tabla 26** se presentan los datos obtenidos durante la conexión simultánea del foco 1 y el foco 2. Los resultados permiten analizar el comportamiento eléctrico de ambas cargas trabajando conjuntamente y establecer los valores de referencia que posteriormente serán utilizados para comparar la precisión de las mediciones obtenidas mediante el ESP32.

Tabla 26

Datos entre foco 1 y foco 2

Parámetro	Unidad	Valor medido	Instrumento
Corriente	A	1,2	PAC3100
Potencia aparente	VA	0,13	PAC3100
Potencia activa	W	0,13	PAC3100
Potencia reactiva	VAR	0,03	PAC3100
Factor de potencia	Fp	0,9	PAC3100
Voltaje de batería	V	11,91	Multímetro
Voltaje del panel fotovoltaico	V	11,95	Multímetro
Voltaje de la carga	V	11,90	Multímetro
Voltaje divisor R4-R5	V	2,34	Multímetro

Nota. Datos obtenidos con el foco 1 y el foco 2.

Capítulo IV

Análisis y discusión de los resultados

En el capítulo anterior se presentaron los valores obtenidos con diferentes cargas a continuación en la **Tabla *27*** se presentan los valores de corriente registrados durante las pruebas realizadas con las diferentes cargas conectadas al sistema. A partir de estos resultados, y como se observa gráficamente en la **Figura *27*** existe una variación en el consumo de corriente dependiendo del tipo de carga y de la combinación utilizada. El calefactor presentó uno de los mayores consumos, con un valor de 2,3 A, mientras que la rizadora de cabello y el cargador de celular registraron los valores más bajos. Asimismo, las pruebas realizadas con cargas combinadas evidenciaron un incremento en la demanda de corriente, destacándose la conexión de la plancha de cabello con tres focos y las combinaciones entre focos. Esta comparación permite identificar las cargas que generan una mayor demanda sobre el sistema y analizar el comportamiento del consumo eléctrico durante las diferentes condiciones de operación.

Tabla 27

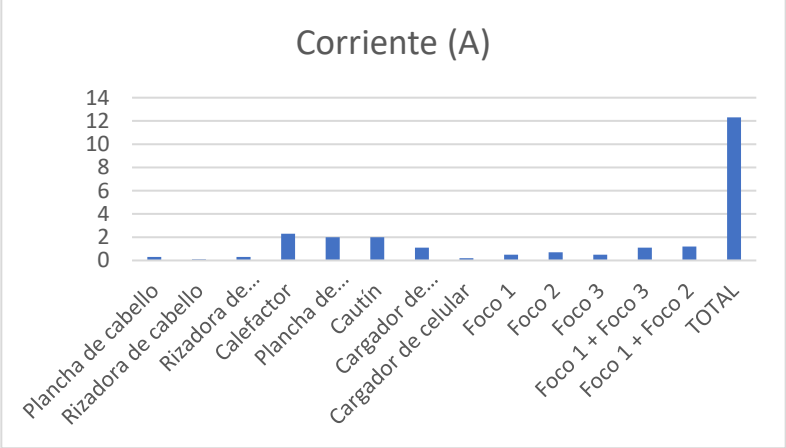
Consumo de corriente de las diferentes cargas

Carga	Corriente (A)
Plancha de cabello	0,3
Rizadora de cabello	0,1
Rizadora de cabello + plancha de cabello	0,3
Calefactor	2,3
Plancha de cabello + 3 focos	2,0
Cautín	2,0
Cargador de computador	1,1
Cargador de celular	0,2
Foco 1	0,5
Foco 2	0,7
Foco 3	0,5
Foco 1 + Foco 3	1,1
Foco 1 + Foco 2	**1,2**
TOTAL	**12,3**

Nota. Los valores de corriente fueron registrados mediante el analizador de redes PAC3100. El valor correspondiente a la conexión conjunta del foco 1 y foco 2 es de 1,2 A.

Figura 27

Comparación del consumo de corriente de las diferentes cargas



Nota. La figura representa la comparación de los valores de corriente registrados para las diferentes cargas durante las pruebas experimentales.

Para analizar las características eléctricas de las cargas evaluadas, en la **Tabla 28** se presentan los valores de potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia obtenidos durante las pruebas experimentales. La comparación de estos parámetros permite identificar las diferencias en el comportamiento eléctrico y en la demanda de potencia de cada carga utilizada.

De manera complementaria, la **Figura 28** presenta gráficamente los valores de potencia registrados para las diferentes cargas, facilitando la visualización y comparación de los resultados obtenidos. Por su parte, la **Figura 29** muestra los valores correspondientes al factor

de potencia de las cargas evaluadas, permitiendo analizar su comportamiento y la relación existente entre la potencia activa y la potencia aparente durante las pruebas realizadas.

Tabla 28

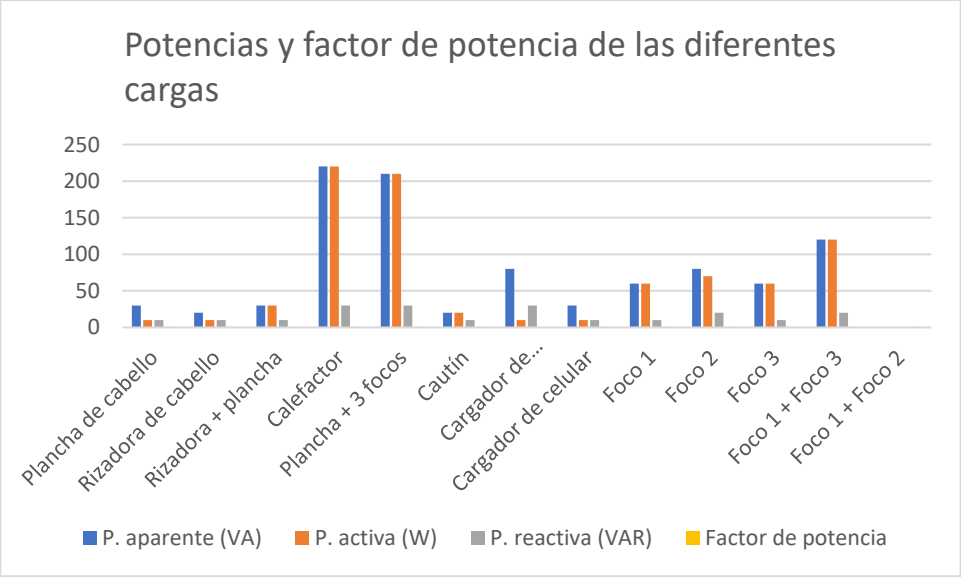
Potencias y factor de potencia de las diferentes cargas

Carga	P. aparente (VA)	P. activa (W)	P. reactiva (VAR)	Factor de potencia
Plancha de cabello	30	10	10	0,9
Rizadora de cabello	20	10	10	0,9
Rizadora + plancha	30	30	10	0,9
Calefactor	220	220	30	0,9
Plancha + 3 focos	210	210	30	0,9
Cautín	20	20	10	0,88
Cargador de computador	80	10	30	0,19
Cargador de celular	30	10	10	0,9
Foco 1	60	60	10	0,9
Foco 2	80	70	20	0,9
Foco 3	60	60	10	0,9
Foco 1 + Foco 3	120	120	20	0,9
Foco 1 + Foco 2	**0,13**	**0,13**	**0,03**	**0,9**
TOTAL	**960,13**	**840,13**	**190,03**	**—**

Nota. La tabla presenta los valores de potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia registrados durante las pruebas realizadas con las diferentes cargas, permitiendo analizar su comportamiento eléctrico y comparar las características de consumo de cada una.

Figura 28

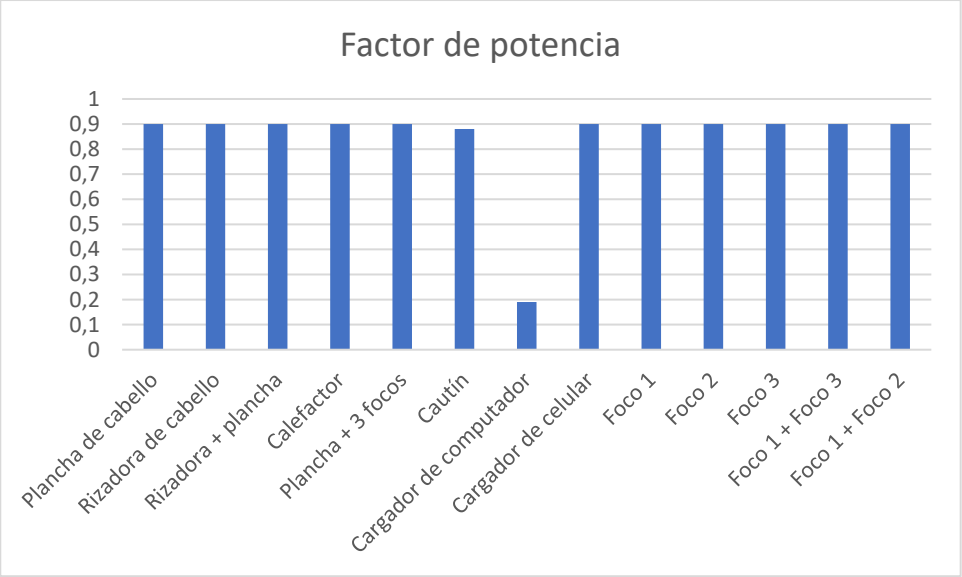
Comparación de las potencias y el factor de potencia



Nota. La figura representa gráficamente los valores de potencia aparente, activa y reactiva, así como el factor de potencia registrado para las diferentes cargas, facilitando la comparación de su comportamiento eléctrico durante las pruebas experimentales.

Figura 29

Cargas eléctricas utilizadas durante las pruebas



Nota. La figura presenta las diferentes cargas eléctricas empleadas durante las pruebas del sistema, junto con los valores correspondientes de factor de potencia registrados para cada una de ellas.

Con el propósito de analizar las variaciones de tensión producidas durante el funcionamiento del sistema con las diferentes cargas, en la **Tabla 29** se presentan los valores de voltaje registrados en la batería, el panel fotovoltaico, la carga y el divisor resistivo R4-R5. Estos resultados permiten evaluar el comportamiento de los diferentes puntos del sistema ante las distintas condiciones de consumo. Asimismo, la **Figura 30** representa gráficamente los valores obtenidos, permitiendo visualizar de manera comparativa las variaciones de voltaje registradas durante las pruebas experimentales.

Tabla 29

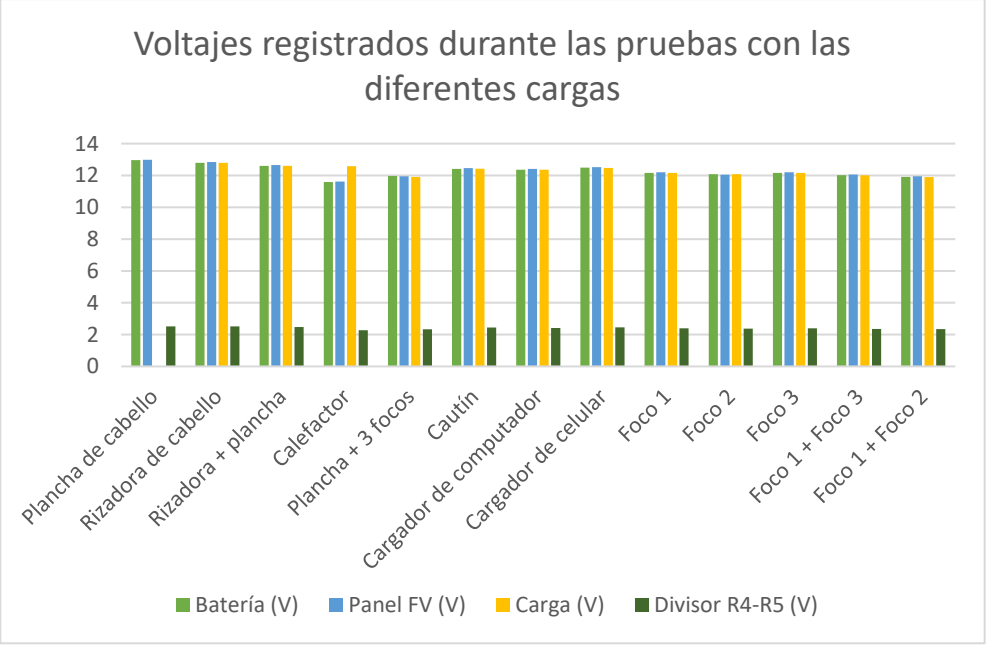
Comparación de las potencias y el factor de potencia

Carga	Batería (V)	Panel FV (V)	Carga (V)	Divisor R4-R5 (V)
Plancha de cabello	12,96	12,98	12,00*	2,52
Rizadora de cabello	12,79	12,84	12,79	2,52
Rizadora + plancha	12,60	12,65	12,60	2,48
Calefactor	11,59	11,62	12,58	2,27
Plancha + 3 focos	11,97	11,95	11,91	2,33
Cautín	12,41	12,46	12,42	2,45
Cargador de computador	12,36	12,41	12,36	2,42
Cargador de celular	12,49	12,52	12,47	2,46
Foco 1	12,16	12,20	12,16	2,40
Foco 2	12,08	12,05	12,08	2,38
Foco 3	12,16	12,20	12,16	2,40
Foco 1 + Foco 3	12,02	12,06	12,01	2,36
Foco 1 + Foco 2	**11,91**	**11,95**	**11,90**	**2,34**
TOTAL	**159,50**	**159,89**	**159,44**	**31,33**

Nota. La tabla presenta los valores de voltaje medidos en la batería, el panel fotovoltaico, la carga y el divisor resistivo R4-R5 para las diferentes condiciones de prueba, permitiendo analizar las variaciones de tensión producidas en el sistema ante la conexión de las diferentes cargas.

Figura 30

Comparación de los voltajes registrados

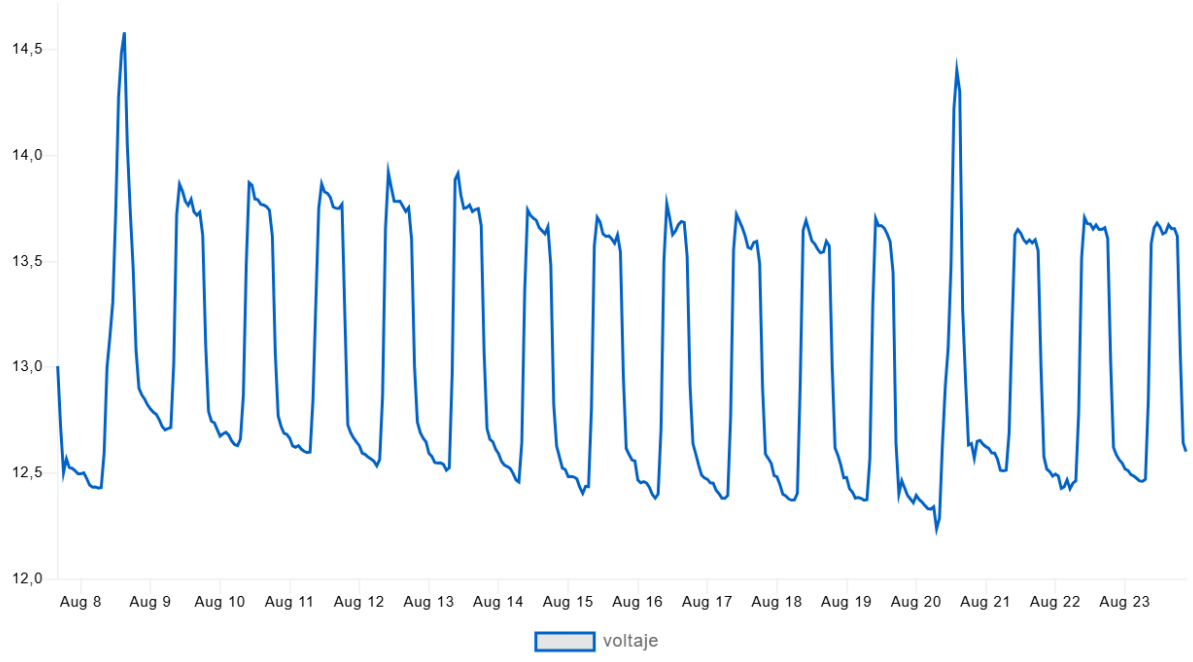


Nota. La figura representa gráficamente los valores de voltaje registrados en los diferentes puntos del sistema durante las pruebas con las distintas cargas, permitiendo visualizar y comparar las variaciones de tensión obtenidas en cada condición de funcionamiento.

Durante el periodo de monitoreo se registraron de forma continua los valores de voltaje del sistema mediante la plataforma Adafruit IO. La información obtenida permitió visualizar la variación de esta variable durante las diferentes condiciones de funcionamiento. En la **Figura 31** se presenta el comportamiento general del voltaje registrado durante el periodo de evaluación, mientras que en la **Tabla 30** se muestra un resumen estadístico de los datos obtenidos, permitiendo complementar el análisis gráfico con valores cuantitativos.

Figura 31

Comportamiento general del voltaje



Nota. La figura muestra la variación temporal de los valores de voltaje registrados por el sistema y visualizados mediante la plataforma Adafruit IO durante el periodo de evaluación.

En la **Tabla 30** se presenta un resumen estadístico que incluye el número total de registros y los valores mínimo, máximo, promedio y la desviación estándar del voltaje. Estos indicadores permiten analizar de manera general la variabilidad de los datos obtenidos y establecer valores representativos del comportamiento del sistema durante el periodo de evaluación.

Tabla 30

Resumen estadístico de los valores de voltaje

Parámetro	Valor
Número total de registros	17 160
Voltaje mínimo	10,22 V
Voltaje máximo	15,76 V
Voltaje promedio	13,05 V
Desviación estándar	0,60 V

Nota. La tabla presenta el resumen estadístico de los valores de voltaje registrados durante el periodo de monitoreo, permitiendo complementar la representación gráfica mostrada en la **Figura 31** mediante indicadores cuantitativos.

Como se observa en la **Figura 31**, el voltaje registrado presentó variaciones durante el periodo de monitoreo, evidenciándose ciclos repetitivos de incremento y disminución. De manera general, los valores se mantuvieron principalmente en un rango aproximado entre 12,4 V y 13,9 V, aunque se registraron variaciones puntuales superiores e inferiores a este intervalo. En particular, se observan picos de voltaje cercanos a 14,5 V, así como descensos que se aproximan a 12,2 V, lo que evidencia cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema durante el periodo analizado.

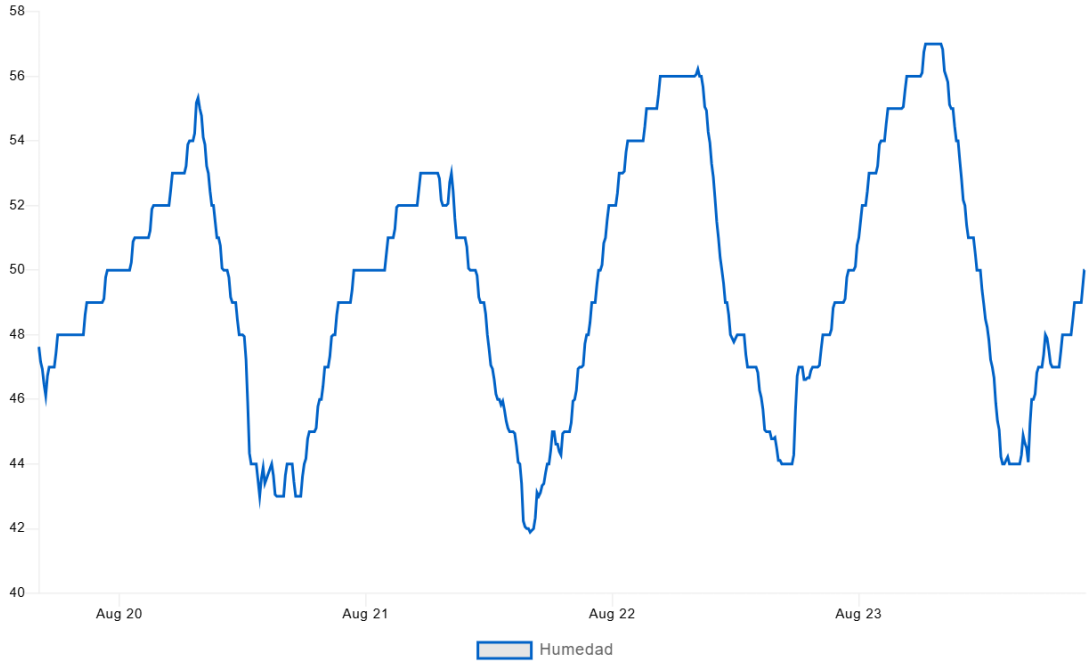
Estos resultados se complementan con los datos presentados en la **Tabla 30**, en la cual se obtuvo un voltaje promedio de 13,05 V, un valor mínimo de 10,22 V y un valor máximo de 15,76 V. La desviación estándar de 0,60 V indica que, aunque existieron variaciones durante el monitoreo, los valores registrados mantuvieron una concentración general alrededor del promedio. Por tanto, la representación gráfica y el análisis estadístico permiten evaluar tanto el comportamiento temporal como la variabilidad del voltaje durante el funcionamiento del sistema.

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema implementado permitió realizar el monitoreo continuo y el registro de la variable de voltaje, generando información suficiente para analizar su comportamiento a lo largo del tiempo.

Durante el periodo de monitoreo, el sistema implementado realizó el registro continuo de los valores de humedad, permitiendo visualizar las variaciones de esta variable a lo largo del tiempo. La **Figura 32** presenta el comportamiento general de la humedad registrada durante el periodo de evaluación. Posteriormente, con el propósito de complementar la representación gráfica, en la Tabla 32 se presenta un resumen estadístico de los datos obtenidos.

Figura 32

Comportamiento general de la humedad



Nota. La figura muestra la variación temporal de los valores de humedad registrados por el sistema y visualizados mediante la plataforma Adafruit IO durante el periodo de evaluación.

Con el fin de complementar el comportamiento gráfico de la humedad presentado en la **Figura 32** , se realizó un análisis cuantitativo de los datos registrados durante el periodo de monitoreo. En la **Tabla 31** se presenta un resumen estadístico que incluye el número total de registros y los valores mínimo, máximo, promedio y la desviación estándar de la humedad. Estos indicadores permiten analizar la variabilidad de los datos obtenidos y establecer valores representativos del comportamiento de esta variable durante el periodo de evaluación.

Tabla 31

Resumen estadístico de los valores de humedad

Parámetro	Resultado
Número de registros	5 970
Humedad mínima	41 %
Humedad máxima	57 %
Humedad promedio	49,55 %
Desviación estándar	3,85 %

Nota. La tabla presenta el resumen estadístico de los valores de humedad registrados durante el periodo de monitoreo, permitiendo complementar la representación gráfica mostrada en la Figura 32 mediante indicadores cuantitativos.

Los resultados presentados en la **Figura 32** y la **Tabla 32** permiten analizar el comportamiento de la humedad durante el periodo de monitoreo. Se registraron un total de **5 970 mediciones**, obteniéndose un valor promedio de **49,55 %**, lo que representa el comportamiento general de la variable durante el periodo evaluado. Los valores registrados variaron entre un mínimo de **41 %** y un máximo de **57 %**, evidenciando fluctuaciones en los niveles de humedad a lo largo de las diferentes mediciones realizadas.

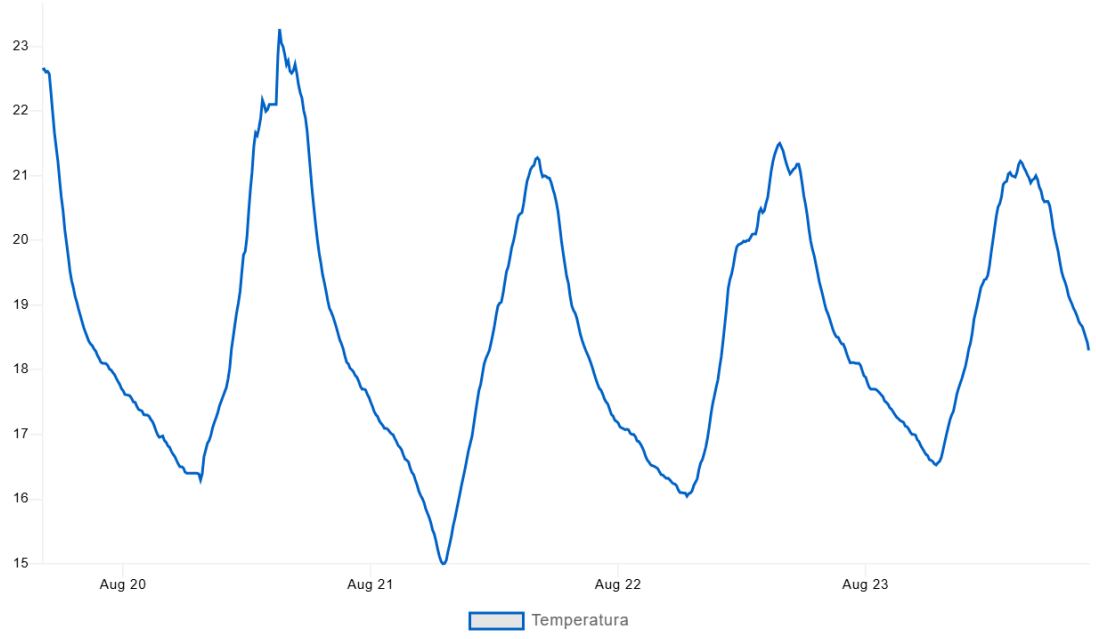
La diferencia entre el valor mínimo y máximo fue de **16 puntos porcentuales**, lo que permite observar la existencia de variaciones durante el funcionamiento del sistema. Por otra parte, la desviación estándar de **3,85 %** indica la dispersión de los datos con respecto al valor promedio, evidenciando que los registros presentaron cambios moderados durante el periodo analizado.

En conjunto, los resultados permiten comprobar que el sistema implementado realizó la adquisición y el registro continuo de los valores de humedad, generando una cantidad significativa de datos para su análisis.

Durante el periodo de monitoreo, el sistema implementado realizó el registro continuo de los valores de temperatura, permitiendo visualizar las variaciones de esta variable a lo largo del tiempo. La **Figura 33** presenta el comportamiento general de la temperatura registrada durante el periodo de evaluación. Posteriormente, con el propósito de complementar la representación gráfica, en la Tabla 33 se presenta un resumen estadístico de los datos obtenidos.

Figura 33

Comportamiento general de la temperatura



Nota. La figura muestra la variación temporal de los valores de temperatura registrados por el sensor DHT11 y visualizados mediante la plataforma Adafruit IO durante el periodo de evaluación.

Con el fin de complementar el comportamiento gráfico de la temperatura presentado en la Figura 31, se realizó un análisis cuantitativo de los datos registrados durante el periodo de monitoreo. En la **Tabla 32** se presenta un resumen estadístico que incluye el número total de

registros y los valores mínimo, máximo, promedio y la desviación estándar de la temperatura. Estos indicadores permiten analizar la variabilidad de los datos obtenidos y establecer valores representativos del comportamiento de esta variable durante el periodo de evaluación.

Tabla 32

Resumen estadístico de los valores de temperatura

Parámetro	Resultado
Número de registros	5 968
Temperatura mínima	15,00 °C
Temperatura máxima	23,40 °C
Temperatura promedio	18,55 °C
Desviación estándar	1,84 °C

Nota. La tabla presenta el resumen estadístico de los valores de temperatura registrados durante el periodo de monitoreo, permitiendo complementar la representación gráfica mostrada en la Figura 33 mediante indicadores cuantitativos. Elaboración propia.

Los resultados presentados en la **Figura 33** y la **Tabla 32** permiten analizar el comportamiento de la temperatura durante el periodo de monitoreo. Se registraron un total de 5 968 mediciones, obteniéndose un valor promedio de 18,55 °C, el cual representa el comportamiento general de la variable durante el periodo evaluado. Los valores registrados presentaron un mínimo de 15,00 °C y un máximo de 23,40 °C, evidenciando variaciones de temperatura durante las diferentes mediciones realizadas.

La diferencia entre el valor mínimo y máximo fue de 8,40 °C, lo que permite identificar una variación apreciable de la temperatura durante el periodo de monitoreo. Por otra parte, la desviación estándar de 1,84 °C indica una dispersión moderada de los datos respecto al valor promedio, evidenciando que la mayor parte de las mediciones se mantuvo relativamente cercana al comportamiento medio registrado.

En conjunto, los resultados permiten comprobar que el sistema implementado realizó de manera continua la adquisición y el registro de los valores de temperatura mediante el sensor DHT11. La cantidad de datos obtenidos permitió realizar un análisis estadístico del comportamiento de esta variable. La representación gráfica mostrada en la **Figura 33**, complementada con los indicadores presentados en la **Tabla 32**, permite identificar las variaciones de temperatura y establecer valores representativos durante el periodo de evaluación.

Durante el período comprendido entre el 20 y el 25 de agosto, se observa un comportamiento cíclico entre la disponibilidad de radiación solar y el voltaje de la batería. Durante las horas del día, la radiación solar aumenta desde valores cercanos a 0 W/m² hasta alcanzar sus mayores niveles en los períodos de mayor incidencia solar. Este incremento de la radiación permite que el panel fotovoltaico genere energía y contribuya al proceso de carga de la batería, por lo que el voltaje presenta una tendencia creciente, alcanzando valores aproximados de 13,5 V a 13,7 V y, en el período comprendido entre el 20 y 21 de agosto, un valor máximo cercano a 14,4 V.

A medida que transcurren las horas de la tarde, la radiación solar comienza a disminuir y, de manera progresiva, también se observa una reducción del voltaje. Durante la noche, la radiación solar alcanza valores cercanos a 0 W/m², debido a la ausencia de incidencia solar. En estas condiciones, el panel fotovoltaico deja de aportar energía y la batería comienza a suministrar energía a las cargas conectadas, ocasionando una disminución progresiva del voltaje hasta valores aproximados de 12,3 V a 12,6 V.

Este comportamiento se repite durante los días analizados, mostrando que el voltaje alcanza sus valores más elevados durante los períodos de mayor disponibilidad de radiación y disminuye durante los períodos nocturnos o de baja irradiancia. La diferencia entre el valor máximo de aproximadamente 14,4 V y el mínimo cercano a 12,3 V corresponde a una variación aproximada de 2,1 V en el voltaje de la batería. Esta variación permite identificar claramente los períodos de carga y descarga del sistema.

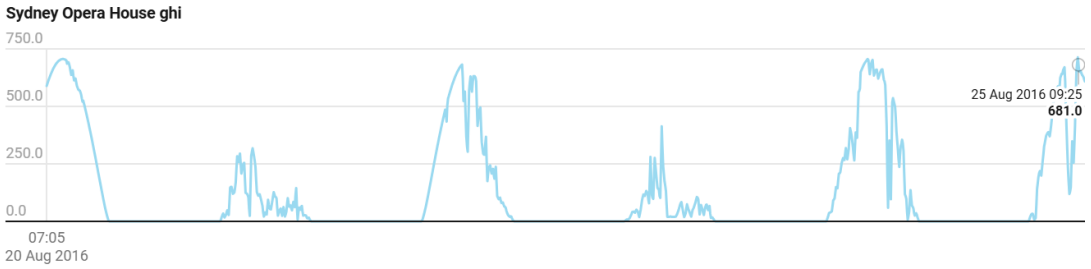
Los datos de radiación solar utilizados para este análisis se obtuvieron de la plataforma Solcast, mediante su herramienta de series temporales (Time Series), y se presentan en la

Figura 34. Por otra parte, los valores de voltaje fueron registrados por el sistema de monitoreo y visualizados mediante la plataforma Adafruit IO, cuyos resultados se presentan en la **Figura *35***. La comparación de ambas fuentes permite establecer una relación entre la disponibilidad del recurso solar y la respuesta eléctrica de la batería.

En consecuencia, los resultados obtenidos evidencian que durante el día el incremento de la radiación solar favorece el aumento y recuperación del voltaje de la batería, mientras que durante la noche, al no existir generación fotovoltaica, el voltaje disminuye debido al consumo de las cargas y a la energía suministrada por la batería. Esto demuestra la utilidad del monitoreo continuo para evaluar el comportamiento del sistema fotovoltaico y determinar las condiciones en las que se produce la carga y descarga de la batería.

Figura 34

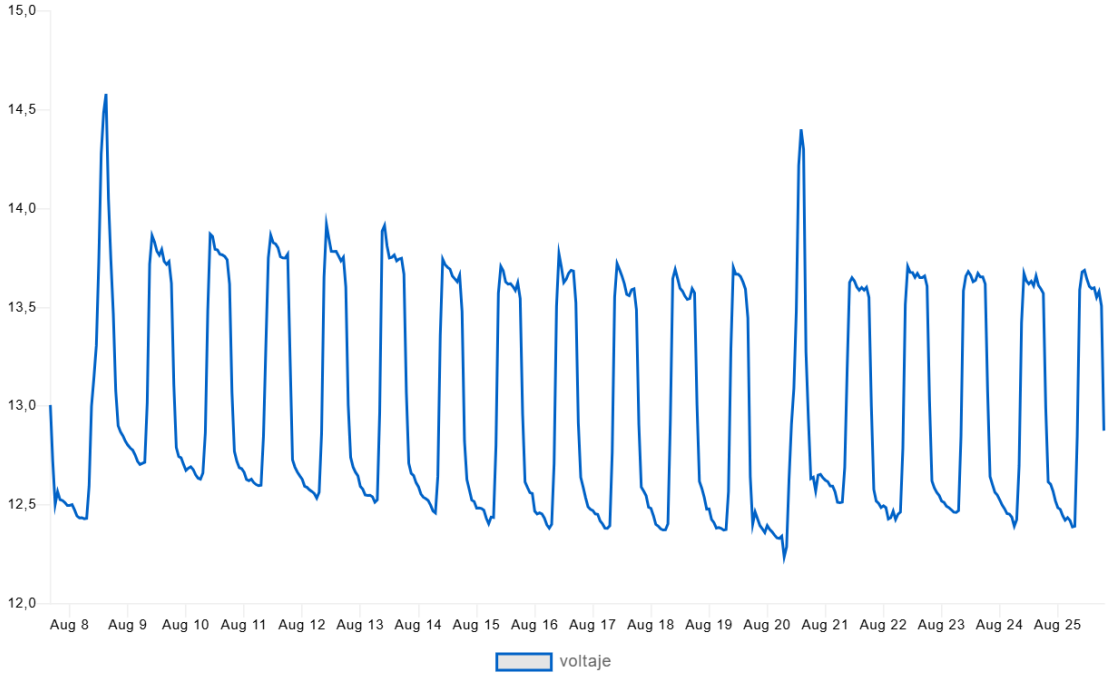
Comportamiento de la irradiancia solar global horizontal (GHI)



Nota. Datos de irradiancia solar global horizontal (GHI) obtenidos de [6]

Figura 35

Monitoreo del voltaje de mediante Adafruit IO.



Nota. Los valores de voltaje de la batería fueron registrados por el sistema de monitoreo implementado y visualizados en tiempo real mediante la plataforma Adafruit IO.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Se implementó un sistema electrónico didáctico para la captación, regulación, almacenamiento, conversión y aprovechamiento de energía solar fotovoltaica, integrando como componentes principales un panel fotovoltaico de 50 W, un regulador de carga PWM, una batería de 12 V y 12 Ah, un inversor DC/AC y diferentes cargas eléctricas. Además, se incorporaron el PAC3100, ESP32, sensor DHT11, pantalla LCD I2C y la plataforma Adafruit IO, permitiendo realizar la medición, adquisición, visualización y monitoreo de variables eléctricas y ambientales. La integración de estos elementos permitió comprobar de manera práctica el funcionamiento de cada etapa del sistema y disponer de una plataforma experimental para el desarrollo de prácticas relacionadas con energía solar fotovoltaica, instrumentación, adquisición de datos y automatización.

Mediante el analizador de energía Siemens SENTRON PAC3100 se caracterizó el comportamiento eléctrico de nueve cargas físicas, evaluadas en 13 condiciones de prueba individuales y combinadas. La corriente registrada varió entre 0,1 A y 2,3 A; el calefactor presentó la mayor demanda, con 2,3 A y 220 W de potencia activa, seguido de la combinación de la plancha de cabello con tres focos, con 2,0 A y 210 W. En contraste, la rizadora de cabello y el cargador de celular registraron las corrientes más bajas, con 0,1 A y 0,2 A,

respectivamente, mientras que los cargadores de computadora y celular presentaron 10 W de potencia activa. Las mediciones de tensión variaron entre 11,59 V y 12,96 V en la batería, entre 11,62 V y 12,98 V en el panel fotovoltaico y entre 11,90 V y 12,79 V en la carga. El divisor resistivo R4-R5 redujo estos niveles de tensión a valores comprendidos entre 2,27 V y 2,52 V, permitiendo que la señal pudiera ingresar de forma segura al ADC del ESP32, cuya entrada admite hasta 3,3 V. Estos resultados evidenciaron las variaciones eléctricas producidas por las diferentes condiciones de carga y demostraron que el módulo permite analizar experimentalmente el funcionamiento del sistema fotovoltaico.

La incorporación del sensor DHT11 permitió complementar el monitoreo con variables ambientales. Para la humedad se obtuvieron 5 970 registros, con valores entre 41 % y 57 %, un promedio de 49,55 % y una desviación estándar de 3,85 %. Para la temperatura se registraron 5 968 valores, con un mínimo de 15,00 °C, un máximo de 23,40 °C, un promedio de 18,55 °C y una desviación estándar de 1,84 °C. Estos resultados demuestran que el sistema también permite registrar las condiciones ambientales durante las pruebas.

El monitoreo continuo del voltaje permitió obtener un total de 17 160 registros, con un valor promedio de 13,05 V, un mínimo de 10,22 V, un máximo de 15,76 V y una desviación estándar de 0,60 V. Estos resultados evidencian la capacidad del sistema para realizar la adquisición y registro continuo de datos, permitiendo analizar las variaciones de voltaje durante el funcionamiento del módulo.

Durante las pruebas realizadas entre el 20 y el 25 de agosto, se comprobó la relación entre la radiación solar y el voltaje de la batería. La radiación obtenida mediante Solcast presentó valores cercanos a 0 W/m² durante la noche, mientras que durante el día su incremento favoreció la recuperación del voltaje, registrado mediante Adafruit IO entre aproximadamente con valore máximos comprendidos entre 12,3 V y 14,4 V alrededor de las 14H00 . Estos resultados evidencian que una mayor disponibilidad de radiación favorece el proceso de carga,

mientras que durante la noche el voltaje disminuye debido al consumo de las cargas y a la ausencia de generación fotovoltaica.

Recomendaciones

Evitar conectar cargas cuya demanda total se aproxime o supere la capacidad nominal del inversor y considerar siempre el estado de carga de la batería antes de iniciar las pruebas, con el propósito de garantizar una operación segura de los componentes.

Verificar las conexiones del divisor de voltaje antes de realizar las mediciones y evitar aplicar directamente niveles de tensión superiores a los permitidos por las entradas del ESP32, considerando que los GPIO del microcontrolador trabajan con niveles lógicos de 3,3 V.

Realizar nuevas pruebas bajo diferentes condiciones ambientales y durante periodos de monitoreo más prolongados, con el propósito de ampliar la cantidad de datos disponibles y obtener una caracterización más completa del comportamiento del sistema fotovoltaico.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar el sistema de monitoreo incorporando nuevas variables y funciones, como corriente y potencia del panel, estado de carga de la batería, alarmas por bajo nivel de tensión y almacenamiento local de datos. Estas mejoras permitirían incrementar las capacidades didácticas y de supervisión del módulo.

Referencias

[1] E. Agency, «Renewable Power Generation Costs in 2023,» International ewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.

[2] IRENA, «Education and Skills,» 07 agosto 2024. [En línea]. Available: https://www.irena.org/Education-and-Skills?utm_source.

[3] I. &. ILO, «Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2024,» 2024. [En línea]. Available: https://www.irena.org/Publications/2024/Oct/Renewable-energy-and-jobs-Annual-review-2024?utm_source=chatgpt.com.

[4] T. B. Korkut y A. Rachid, , «EduSolar: A Remote-Controlled Photovoltaic/Thermal Educational Lab with Integrated Daylight Simulation,» *Solar,* vol. 4, p. 3, 2024.

[5] R. Chiou, T.-l. Tseng, M. Mauk, I. Husanu y T. Tam, «Exploring Virtual Reality for Student Learning Enhancement on Environmentally Sustainable Manufacturing with Renewable Energy,» de *2022 ASEE Annual Conference & Exposition*, Minneapolis, 2022.

[6] Solcast, «Solcast,» [En línea]. Available: https://www.solcast.io/time-series.

[7] C. Jiang, P. Zhuang, J. Lin, W. Zheng y Z. Shao, «Experimental platform for active distribution network dynamic optimization with wind–solar–storage multienergy coordination,» *Experimental Technology and Management,* vol. 42, nº 5, p. 105–114, 2025.

[8] E. H. Amalu, M. Short, P. L. Chong, D. J. Hughes, D. S. Adebayo, F. Tchuenbou-Magaia, P. Lähde, M. Kukka, O. Polyzou, T. I. Oikonomou, C. Karytsas,

A. Gebremedhin, A. Gebremedhin, C. Ossian y N. N. Ekere, «Critical skills needs and challenges for STEM/STEAM graduates increased employability and entrepreneurship in the solar energy sector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 187, nº -, p. 113776, 2023.

[9] S. Perumal, K. Cherukupalli, R. Jayaraman y N. B. Prakash, «An Analysis of the Experimental Configuration of a Standalone PV System,» *Technical Gazette,* vol. 31, nº 4, pp. 1048-1054, 2024.

[10] W. He, M. J. Aziz Baig y M. T. Iqbal, «An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED,» *Energies,* vol. 17, nº 10, p. 2295, 2024.

[11] C. M. Nkinyam, C. O. Ujah, C. O. Asadu, B. Anyaka y P. A. Olubambi, «Development of a low-cost monitoring device for solar electric (PV) system using internet of things (IoT),» *Results in Engineering,* vol. 28, nº —, p. —, 2025.

[12] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, San Diego: Academic Press, 2014.

[13] I. E. Agency, «Renewables 2024,» International Energy Agency, París, 2024.

[14] M. A. Green, E. D. Dunlop, H.-E. Jochen, M. Yoshita, N. Kopidakis y X. Hao, «Solar cell efficiency tables (Version 64),» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* vol. 32, nº 5, p. 425–446, 2024.

[15] D. Linden y T. B. Reddy, Handbook of Batteries, New York: McGraw-Hill, 2011.

[16] M. H. Rashid, Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications, Upper Saddle River: Pearson, 2014.

[17] C. K. Alexander y M. N. O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, New York: McGraw-Hill Education, 2017.

[18] Siemens AG, «SENTRON PAC3100 Power Monitoring Device: Manual,» Siemens AG, 2015.

[19] Systems, «ESP32 Series Datasheet,» 2026. [En línea]. Available: cumentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.html.

[20] Arduino, «Arduino IDE,» Arduino, [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/en/software/.

[21] Adafruit Industries, «Adafruit IO,» Adafruit Industries, 2026. [En línea]. Available: https://www.adafruit.com/?srsltid=AfmBOoquaksEeVWbJSLe3VNaLh_G7mD9xnH7HbcJwzDvwponCEwXoqWx.

[22] ProViento, «ProViento Store,» [En línea]. Available: https://proviento.com.ec/10-paneles-solares?utm_source=chatgpt.com.

[23] QuitoLED, «QuitoLED,» [En línea]. Available: https://www.quitoled.com/producto/controlador-regulador-carga-solar-pwm-20a-12-24v-usb-lcd/.

[24] Suenna Electrónica, «Suenna Electrónica,» [En línea]. Available: https://suennaelectronica.com/productos/bateria-agm-libre-de-mantenimiento-s-e-green-12-voltios-55-ah/.

[25] Naylamp Mechatronics, «Naylamp Mechatronics,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/182-reductor-step-down-buck.

[26] AV Electronics, «AV Electronics,» [En línea]. Available: https://avelectronics.cc/producto/inversor-de-onda-sinusoidal-pura-12v-dc-a-110-v-

ac/?srsltid=AfmBOooTFBzoNSiqzDnkBTJiOc9ULlv5p6_qCaj7CZWzdhQwe6fmTKvG.

[27] Improselec, «Improselec,» [En línea]. Available: https://improselec.com/producto/pac3100-7km3133-0ba00-3aa0/.

[28] ESP32IO, «ESP32IO,» s. f.. [En línea]. Available: https://esp32io.com/.

[29] TECmikro, «TECmikro,» [En línea]. Available: https://tecmikro.com/led-lcd/351-lcd-16x2-i2c.html.

[30] Adafruit, «Adafruit IO,» s. f.. [En línea]. Available: https://io.adafruit.com/chymchym1905/dashboards/dashboard.

[31]

[32] Naylamp Mechatronics, «Naylamp Mechatronics,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-esp32-devkit-v1-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi-micro-usb.html.

[33] DPS Telecom, «DPS Telecom,» 2022. [En línea]. Available: https://www.dpstele.com/modbus/rs485-rs232-protocol-data-flow.php.

Apéndices