

IoT-Based Real-Time Monitoring System for Electric Vehicle Chargers Using ESP32 Microcontroller

Cuba Vargas, Karen Esteincin¹; Rojas Espinoza, Alan Richard¹; Olivera Ylla, Carlos Alberto¹; Corpus Vergara, Nestor Bernardo²; Palomino Monteza, Vanessa Yaniz³

¹Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, coliveray@senati.pe, ecuba@senati.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, nestor.corpus@upn.pe

³Centro de Altos Estudios Nacionales (CAEN), Perú, yanizpalominom@gmail.com

Abstract— This work presents the design, implementation, and experimental validation of a real-time monitoring module for electric vehicle chargers (EVSE), based on the ESP32 microcontroller and IoT technologies and the system acquires critical electrical variables (voltage, current, and power) through Modbus RTU communication over RS485 and integrates a DS18B20 sensor for thermal monitoring, the results showed that the system maintained stable data acquisition, recording voltages between 223–225 V and demonstrating an adequate dynamic response to state changes (no load/load), without interfering with charger operation.

Additionally, consistency was verified between local visualization (TFT display) and remote visualization (web server), with real-time updates every 2 seconds and it is concluded that the solution is reliable, low-cost, and scalable, representing a viable alternative to improve supervision and operational efficiency in electric vehicle charging infrastructure..

Keywords— Electric vehicle, real-time monitoring, IoT, ESP32, Modbus RTU.

Sistema de Monitoreo en Tiempo Real para Cargadores de Vehículos Eléctricos Basado en IoT y Microcontrolador ESP32

Cuba Vargas, Karen Esteincin¹; Rojas Espinoza, Alan Richard¹; Olivera Ylla, Carlos Alberto¹; Corpus Vergara, Nestor Bernardo²; Palomino Monteza, Vanessa Yaniz³

¹Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, coliveray@senati.pe, ecuba@senati.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, nestor.corpus@upn.pe

³Centro de Altos Estudios Nacionales (CAEN), Perú, yanizpalominom@gmail.com

Resumen– Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación experimental de un módulo de monitoreo en tiempo real para cargadores de vehículos eléctricos (EVSE), basado en el microcontrolador ESP32 y tecnologías IoT ya que el sistema adquiere variables eléctricas críticas (voltaje, corriente y potencia) mediante comunicación Modbus RTU sobre RS485 e integra un sensor DS18B20 para la supervisión térmica y como resultados, el sistema mostró estabilidad en la adquisición de datos, registrando voltajes entre 223–225 V y una respuesta dinámica adecuada ante cambios de estado (sin carga/carga), sin interferir en la operación del cargador.

Asimismo, se verificó la coherencia entre la visualización local (pantalla TFT) y remota (servidor web), con actualizaciones en tiempo real cada 2 segundos y se concluye que la solución es confiable, de bajo costo y escalable, constituyendo una alternativa viable para mejorar la supervisión y la eficiencia operativa en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

Palabras clave- Vehículo eléctrico, monitoreo en tiempo real, IoT, ESP32, Modbus RTU.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, diversos estudios han evidenciado la necesidad de contar con sistemas de monitoreo en tiempo real para mejorar la gestión operativa de los EVSE, sin embargo, en contextos de economías emergentes, como América Latina, la implementación de estas soluciones sigue siendo limitada debido a los altos costos y la falta de infraestructura tecnológica y en el caso específico del Perú, la expansión de la movilidad eléctrica aún es incipiente, y la mayoría de los cargadores disponibles no cuenta con sistemas avanzados de supervisión, lo que genera limitaciones en la gestión, el mantenimiento y la seguridad operativa.

En este contexto, se identifica como problema central la falta de soluciones de monitoreo en tiempo real, accesibles y de bajo costo, aplicables a cargadores de vehículos eléctricos comerciales, lo cual motiva el desarrollo del presente trabajo y la transición global hacia la movilidad eléctrica avanza a un ritmo acelerado, representando un cambio profundo en el sector del transporte a nivel mundial.

Las ventas de vehículos eléctricos (EVs), que alcanzaron la cifra histórica de 17 millones de unidades en 2024 [1], no son solo una tendencia de mercado, sino el reflejo de una transformación estructural motivada por políticas climáticas, avances tecnológicos y una mayor conciencia ambiental y se estima que, para 2030, uno de cada tres automóviles vendidos a nivel mundial será eléctrico, lo que subraya la magnitud de esta

evolución, la cual está redefiniendo las cadenas de valor industriales, las estrategias energéticas y los hábitos de consumo.

En este nuevo escenario, la infraestructura de carga, técnicamente conocida como Equipos de Suministro para Vehículos Eléctricos (EVSE), se convierte en un pilar fundamental para el éxito de la transición. Sin una red de carga amplia, confiable y accesible, la adopción masiva de los EVs simplemente no sería viable, sin embargo, esta rápida expansión plantea desafíos considerables para la estabilidad y operación de los sistemas eléctricos existentes.

Como señalan Arent et al. [2] en su análisis sobre la descarbonización del sistema energético de Estados Unidos, alcanzar un sistema eléctrico 100% libre de carbono para 2035 y una economía con cero emisiones netas para 2050 no solo requiere del despliegue de tecnologías limpias, sino también de innovación continua y de una integración eficaz de diversas soluciones y el estudio destaca que, a pesar de las perspectivas técnicas favorables, las limitaciones en la infraestructura actual, sumadas a restricciones económicas, socioculturales y de cadena de suministro, exigen respuestas robustas y adaptadas a cada contexto.

La integración masiva de los EVs, junto con otras tecnologías como la generación renovable distribuida y el almacenamiento de energía, añade una capa adicional de complejidad a la planificación y operación de la red, tensionando sistemas que originalmente no fueron diseñados para un consumo eléctrico distribuido, dinámico y potencialmente masivo.

La incorporación a gran escala de los Vehículos Eléctricos (VE) en el sistema eléctrico plantea retos considerables y complejos, que se manifiestan tanto a nivel de la red de transmisión como, de manera más crítica, en la red de distribución, como demuestra la investigación de Xu et al. [3], la conexión de numerosas estaciones de carga de VE a la red de distribución provoca desviaciones de voltaje que afectan directamente la calidad de la energía, un problema que los métodos tradicionales de control de potencia reactiva no logran resolver de forma adecuada.

Este desafío se ve agravado por la naturaleza variable e impredecible de la demanda de carga de los VE. Liu et al. [4] subrayan esta problemática, señalando que el funcionamiento óptimo de las redes de distribución (DN) y de transporte (TN) se ve afectado por este comportamiento irregular, una complejidad que a menudo se ha abordado de manera aislada

en la literatura, desconectando la ubicación de las estaciones de carga de la programación de la potencia y cuando esta naturaleza variable de la carga de los VE se combina con una alta penetración de energías renovables intermitentes, como la solar fotovoltaica (PV), el escenario operativo se vuelve aún más complejo.

Wang et al. [5] explican cómo el crecimiento simultáneo de los Recursos Energéticos Distribuidos (DER) y los VE genera desafíos operativos, donde las fluctuaciones en la generación y la carga pueden agravar los problemas de voltaje, lo que lleva a los operadores de red a considerar medidas correctivas como la reducción de la potencia activa de los paneles solares y la combinación de estos factores, una demanda de VE variable y no coordinada, junto con una generación renovable intermitente, puede derivar en problemas severos de calidad de la energía, fluctuaciones de voltaje pronunciadas y congestión en los activos de la red, tal como se revisa exhaustivamente en Ahmad et al. [6], quienes identifican el modelado de la incertidumbre de la carga del VE y su impacto en la red de distribución como una de las principales áreas de investigación. Esta conjunción de desafíos resalta la importancia de evolucionar hacia una infraestructura de carga robusta e inteligente y dicha infraestructura debe ser capaz de gestionar de manera eficiente y bidireccional la interacción entre los VE y la red, un concepto que Yu et al. [7] exploran en profundidad. Su análisis revela que la tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) no solo puede mitigar los efectos adversos de la carga no coordinada, sino que también puede ofrecer diversos servicios auxiliares a la red, siendo las arquitecturas avanzadas, como las microrredes híbridas AC/DC, las que facilitan una integración efectiva al permitir un control flexible del flujo de potencia y una mejor compensación de la calidad de la energía.

A pesar del rápido avance tecnológico, persiste una brecha significativa en muchos Equipos de Suministro para Vehículos Eléctricos (EVSE) de gama inicial y media: la notable falta de sistemas de monitoreo integrados y en tiempo real que ofrezcan una visibilidad operativa completa y esta carencia convierte al proceso de carga en un escenario de “caja negra”, donde la incapacidad de visualizar, registrar y analizar parámetros operativos críticos, como perfiles de voltaje y corriente, niveles de potencia activa y reactiva, y temperaturas de componentes esenciales, no solo impide optimizar el proceso, sino que compromete activamente la seguridad operativa y la calidad de la energía suministrada.

Esta falta de transparencia crea, además, un terreno fértil para vulnerabilidades de ciberseguridad, un aspecto crítico que Johnson et al. [8] examinan en detalle y su investigación revela que existen vulnerabilidades en los propios dispositivos EVSE, en las comunicaciones con los vehículos eléctricos y en los servicios en la nube, y que el impacto potencial de un ataque puede escalar desde efectos localizados hasta interrupciones a nivel nacional, subrayando así el riesgo de operar una infraestructura crítica sin capacidades adecuadas de monitoreo y seguridad.

Esta limitación tiene consecuencias operativas y económicas directas y como se desprende del análisis de Mastoi et al. [9] sobre los factores clave en la planificación de la infraestructura de carga, la falta de datos en tiempo real dificulta enormemente el mantenimiento proactivo, ya que los operadores no pueden anticipar fallos con base en tendencias de degradación o comportamiento anómalo, además, cuando ocurre una falla, la ausencia de un historial de datos operativos detallados complica el diagnóstico preciso, lo que se traduce en tiempos de inactividad prolongados y costosos para los puntos de carga, reduciendo su disponibilidad y confiabilidad y el impacto final de esta cadena de deficiencias se materializa en el coste total de propiedad de la infraestructura.

Mastoi et al. [10] cuantifican este impacto de manera elocuente en su estudio sobre las tecnologías V2G y las estrategias de carga y descarga, señalando que los costos de degradación de las baterías de iones de litio, un componente central y costoso, pueden alcanzar los \$130 por MWh cuando se opera con una profundidad de descarga del 80%, esta cifra subraya el alto costo económico de operar sistemas complejos sin las herramientas de monitoreo y gestión necesarias para optimizar su uso y prolongar su vida útil, haciendo que la inversión en capacidades de monitoreo inteligente no sea un lujo, sino una necesidad económica y técnica para garantizar la sostenibilidad y viabilidad financiera de la infraestructura de carga.

Si bien el Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser una tecnología clave para la monitorización y gestión avanzada en otros dominios de sistemas de energía, como lo evidencia la revisión exhaustiva de Chen et al. [11] sobre el papel crucial de la infraestructura de medición avanzada (AMI) y los contadores inteligentes en la optimización de redes eléctricas complejas con generación renovable, su aplicación específica, práctica y económicamente viable en cargadores de Vehículos Eléctricos (VE) individuales y de bajo coste sigue siendo un área relativamente poco explorada y con un potencial de desarrollo significativo.

Es cierto que en la literatura reciente comienzan a aparecer propuestas que abordan aspectos parciales de esta problemática, por ejemplo, Chatterjee et al. [12] presentan una solución para una estación de carga para vehículos de dos ruedas con soporte IoT, empleando plataformas accesibles como Arduino Uno y el módulo ESP8266 para enviar datos a la plataforma en la nube ThingSpeak, demostrando así el valor de la monitorización remota para la gestión de la estación y de manera complementaria, Arulmozhi et al. [13] desarrollan un sistema más centrado en el usuario final, con una aplicación web (“ChargEVfy”) que permite localizar estaciones y reservar slots de carga, integrando sensores IR y el servidor en la nube Blynk para sus funcionalidades IoT.

En un nivel técnico más avanzado, Nizam et al. [14] proponen una arquitectura robusta basada en el microcontrolador ESP32, integrando múltiples protocolos de comunicación (Modbus, MQTT, ESP-NOW) para la monitorización en tiempo real de componentes clave en estaciones de carga renovables,

validando la escalabilidad y confiabilidad de este enfoque. Sin embargo, un análisis crítico de estas contribuciones revela limitaciones importantes y las soluciones como las de Chatterjee et al. [12] y Arulmozhi et al. [13] suelen estar muy orientadas a casos de uso específicos (por ejemplo, vehículos de dos ruedas o aplicaciones de reserva) y carecen de una arquitectura de comunicación unificada y escalable que pueda adaptarse fácilmente a diferentes tipos de cargadores y fabricantes.

Por otro lado, la propuesta de Nizam et al. [14], aunque técnicamente sólida, se enfoca en una estación de carga compleja y no necesariamente prioriza la combinación de bajo costo y apertura del sistema (open-source/hardware) que sería fundamental para una adopción generalizada, esta brecha es precisamente la que identifica Acharige et al. [15] en su revisión integral de las tecnologías de carga, al señalar que la adopción a gran escala de los VE exige la investigación y desarrollo de EVSE que no solo cumplan con los estándares y códigos de red, sino que también aborden de manera integral la necesidad de soluciones accesibles, interoperables y que faciliten el soporte a servicios auxiliares de la red, un desafío que las soluciones IoT existentes para VE no han logrado resolver de manera holística.

Como respuesta directa a los desafíos interconectados de integración a la red, la brecha de monitorización en EVSE económicos y las limitaciones de las soluciones IoT existentes, este estudio presenta el diseño, la implementación práctica y la validación experimental de un módulo de monitoreo en tiempo real, concebido como un complemento hardware y software para el cargador de vehículos eléctricos comercial One-S y la arquitectura propuesta se basa estratégicamente en el microcontrolador ESP32, una plataforma de bajo costo cuya eficacia para la gestión y monitorización de estaciones de carga, especialmente en entornos con recursos energéticos distribuidos, ha sido validada de manera independiente por investigadores como Nizam et al. [14].

Para garantizar una adquisición de datos robusta y fiable de parámetros eléctricos críticos —superando así la limitación de “caja negra” identificada por Johnson et al. [8] y permitiendo el mantenimiento proactivo señalado por Mastoi et al. [9]— el sistema integra el protocolo de comunicación industrial estándar Modbus RTU sobre RS485. Esta elección, alineada con las prácticas recomendadas para la interoperabilidad en sistemas de energía revisadas por Acharige et al. [15], asegura la compatibilidad con una amplia gama de medidores de energía y sensores.

Simultáneamente, y en línea con la tendencia hacia la gestión de datos en tiempo real para redes inteligentes destacada por Chen et al. [11], se aprovechan al máximo las capacidades Wi-Fi integradas en el ESP32 para habilitar un servidor web local y esto proporciona una interfaz accesible para el monitoreo remoto, ofreciendo la transparencia operativa y la accesibilidad que demandan los usuarios y que son la base para servicios avanzados de gestión de la demanda, de esta forma, la solución presentada aborda de manera integral y simultánea los tres

aspectos clave que han limitado la adopción generalizada de soluciones similares: la asequibilidad, al utilizar componentes de bajo costo y amplia disponibilidad; la escalabilidad, gracias a una arquitectura de comunicación modular y basada en estándares; y la funcionalidad completa, al ofrecer tanto una interfaz local como capacidades de monitorización remota en tiempo real, cerrando así la brecha crítica identificada en la literatura y sentando las bases para una infraestructura de carga más inteligente, segura y eficiente.

II. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque metodológico

El presente trabajo adopta un enfoque metodológico aplicado y experimental, orientado al diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en tecnologías IoT y la metodología se centra en la integración de hardware y software para la adquisición, visualización y transmisión de variables eléctricas relevantes en un cargador eléctrico, sin intervenir en su lógica interna de operación.

El desarrollo se realizó bajo un esquema de prototipado funcional, validando el correcto funcionamiento del sistema mediante pruebas operativas en condiciones reales de laboratorio.

2.2. Arquitectura general del sistema

El sistema de monitoreo propuesto está compuesto por cuatro bloques principales, ver figura 1.

La comunicación entre el medidor eléctrico y el ESP32 se realiza mediante el protocolo Modbus RTU sobre RS485, mientras que la transmisión remota se efectúa a través de una red Wi-Fi utilizando un servidor web embebido en el microcontrolador.

El sensor DS18B20 se conectó mediante el protocolo OneWire, permitiendo obtener mediciones de temperatura con buena resolución y estabilidad.

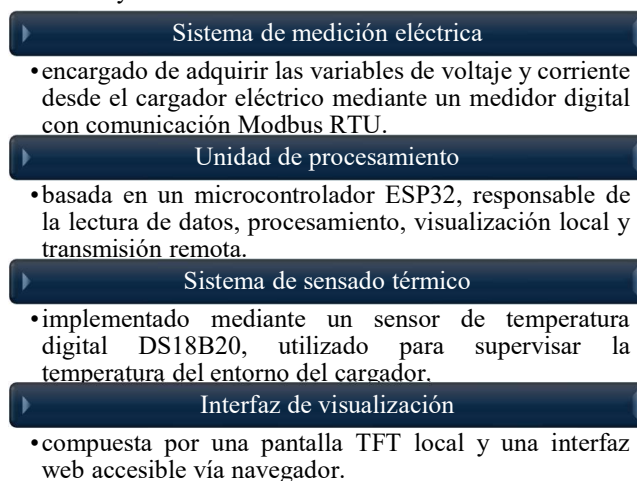


Fig. 1 Arquitectura general del sistema

Adicionalmente, se incorporó una pantalla TFT a color para la visualización local de las variables eléctricas y térmicas, facilitando la supervisión directa del sistema.

2.3. Implementación del software

El firmware del ESP32 fue desarrollado en el entorno Arduino, integrando librerías específicas para comunicación Modbus, manejo de la pantalla TFT, lectura de sensores y gestión de red Wi-Fi.

El sistema realiza las siguientes tareas de forma cíclica:

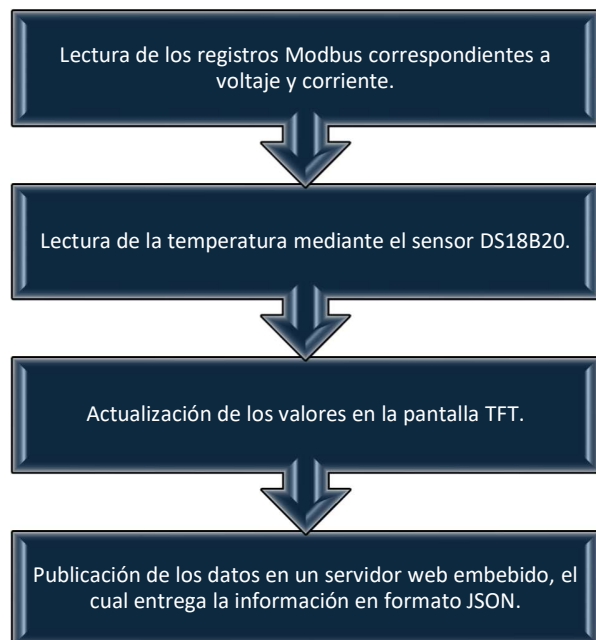


Fig. 2 Operación cíclica de la implementación software.

La interfaz web utiliza solicitudes asíncronas (AJAX) para actualizar los valores cada dos segundos, permitiendo la visualización en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a la misma red.

2.4. Procedimiento de prueba

Para verificar el funcionamiento del sistema, se realizaron pruebas operativas bajo diferentes condiciones de carga del cargador eléctrico, incluyendo estado sin carga y estado de carga activa.

Durante las pruebas se verificó:

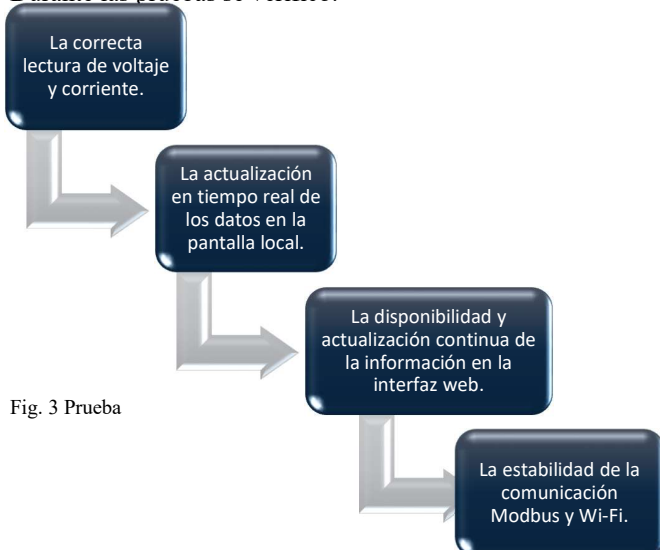


Fig. 3 Prueba

III. RESULTADOS

3.1. Monitoreo eléctrico

El sistema desarrollado permitió visualizar de manera simultánea y en tiempo real los valores de voltaje y corriente del cargador eléctrico tanto en la pantalla TFT como en la interfaz web.

Durante las pruebas realizadas, se registraron valores de voltaje cercanos a 223–225 V y corrientes variables según el estado de carga, evidenciando un comportamiento coherente con las condiciones operativas del cargador.

Las lecturas obtenidas mostraron estabilidad temporal y consistencia entre la visualización local y remota, lo que confirma la correcta implementación del protocolo Modbus y la adecuada sincronización del sistema.

En la Figura 4 presenta el esquemático de conexiones del sistema de monitoreo implementado, donde se evidencia la correcta integración entre el microcontrolador ESP32, el medidor eléctrico con comunicación Modbus RTU mediante interfaz RS485, el sensor de temperatura DS18B20 y la pantalla TFT. El esquema confirma la adecuada distribución de señales de alimentación y comunicación, permitiendo la adquisición confiable de las variables eléctricas y térmicas, así como su visualización local y transmisión remota a través de la red Wi-Fi.

La Figura 5 y 6 muestra la integración física del módulo de monitoreo con el cargador One-S, evidenciando la correcta instalación del sistema sin interferir con la operación normal del equipo. En la imagen se observa el módulo IoT operando de manera conjunta con el cargador, permitiendo la adquisición y visualización en tiempo real de las variables eléctricas medidas. Este resultado confirma la viabilidad del sistema propuesto para su implementación en un entorno real de operación, validando su compatibilidad y funcionalidad como solución de monitoreo aplicada.

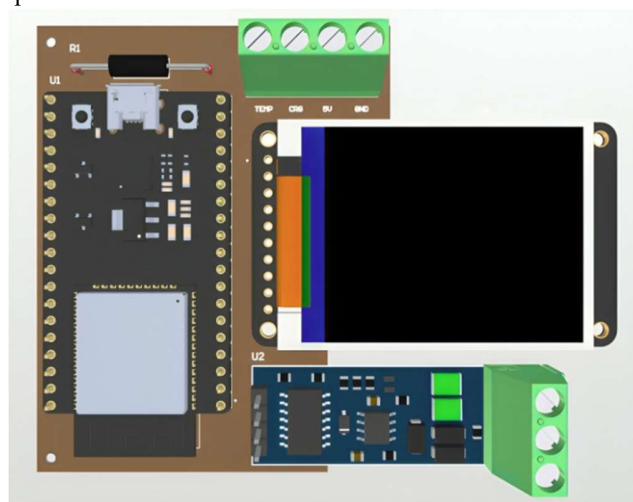


Fig. 6 Diseño 3D del Sistema de Monitoreo.

MÓDULO DE MONITOREO PARA EL CARGADOR ONE-S

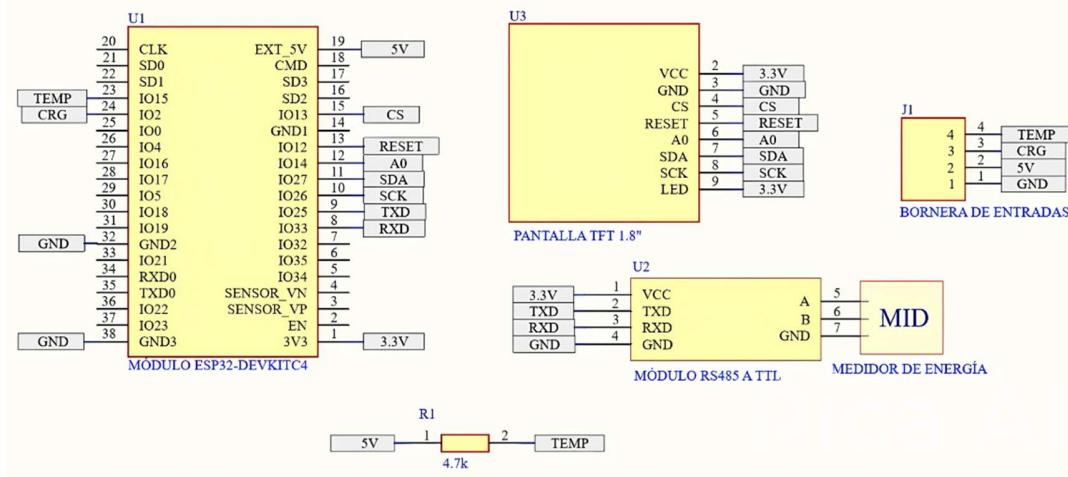


Fig.4 Modulo de monitoreo para el cargador ONE-S

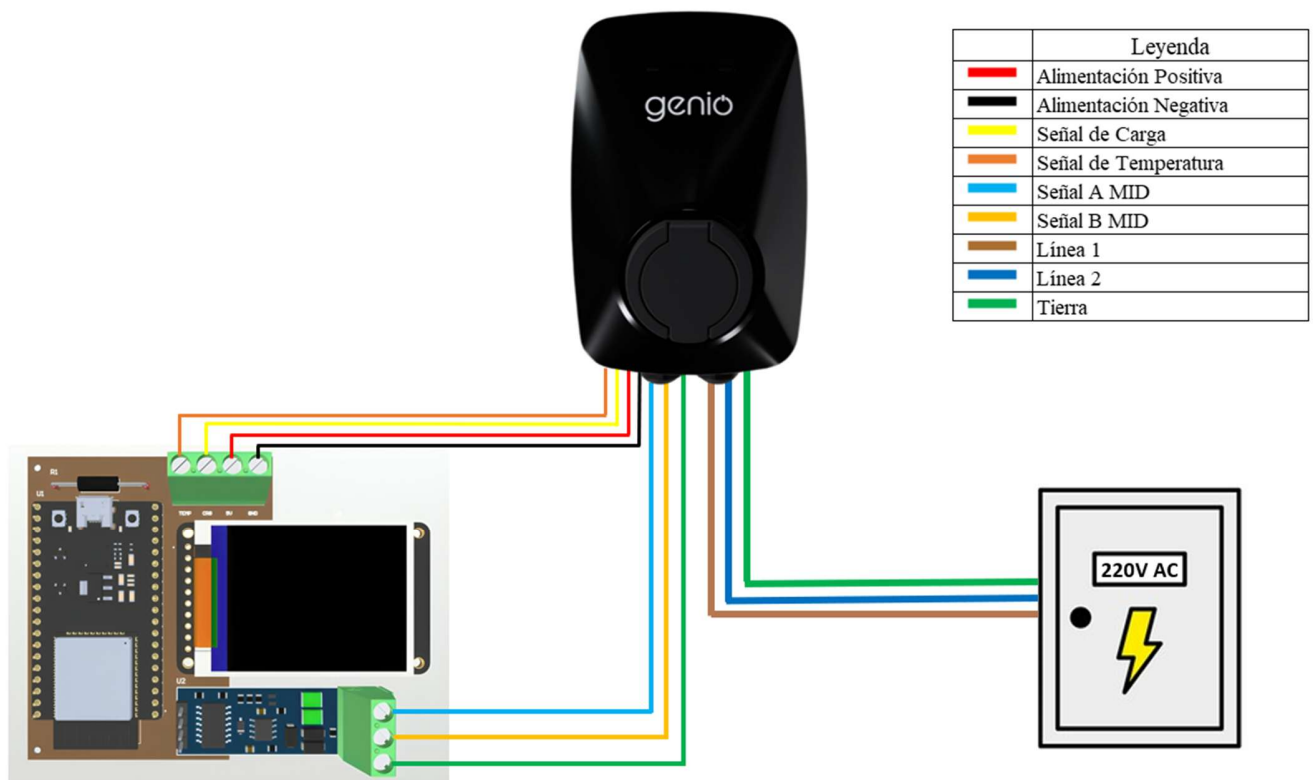


Fig. 5 Presentación del Módulo de monitoreo con el Cargador One-S

Las Figuras 7 presentan el comportamiento del módulo de monitoreo en condición de operación sin carga, donde se observa la lectura de voltaje nominal del sistema y una corriente

cercana a cero, coherente con el estado de no conexión del cargador. La Figura 8 muestra la visualización local de las variables eléctricas en la pantalla TFT del módulo, mientras que la Figura 8 evidencia la correcta actualización de la información en la interfaz web. Estos resultados confirman la correcta adquisición y sincronización de datos entre la visualización local y remota del sistema de monitoreo.

Las Figuras 9 y 10 muestran el funcionamiento del módulo de monitoreo bajo condición de carga, donde se evidencia el incremento de la corriente eléctrica y la variación correspondiente de las variables monitoreadas, reflejando el estado activo del cargador One-S y la Figura 9 presenta la visualización local de los valores eléctricos en la pantalla TFT del módulo, mientras que la Figura 10 confirma la correcta actualización de la información en la interfaz web en tiempo real, estos resultados validan la capacidad del sistema para supervisar el comportamiento del cargador durante su operación normal, tanto de forma local como remota.

Asimismo, el sensor DS18B20 permitió registrar la temperatura del entorno del cargador, obteniéndose valores cercanos a 22–23 °C durante las pruebas realizadas y la temperatura registrada se mantuvo estable a lo largo de las pruebas, sin presentar cambios bruscos, lo que refleja condiciones térmicas normales en el entorno del cargador. Este comportamiento confirma que el sistema es capaz de monitorear de forma confiable la variable térmica y que, ante escenarios futuros de sobrecarga o funcionamiento anómalo, podría detectar variaciones relevantes de temperatura de manera oportuna.

Estos valores se mantuvieron dentro de rangos normales, evidenciando que el sistema es capaz de complementar el monitoreo eléctrico con información térmica relevante para la supervisión operativa. Al pasar del estado sin carga al estado de carga activa, el sistema respondió de manera inmediata, reflejando el incremento de corriente sin retrasos perceptibles ni pérdida de información, lo que evidencia su capacidad para seguir cambios dinámicos en el proceso de carga. Ver figura 7,8,9,10.

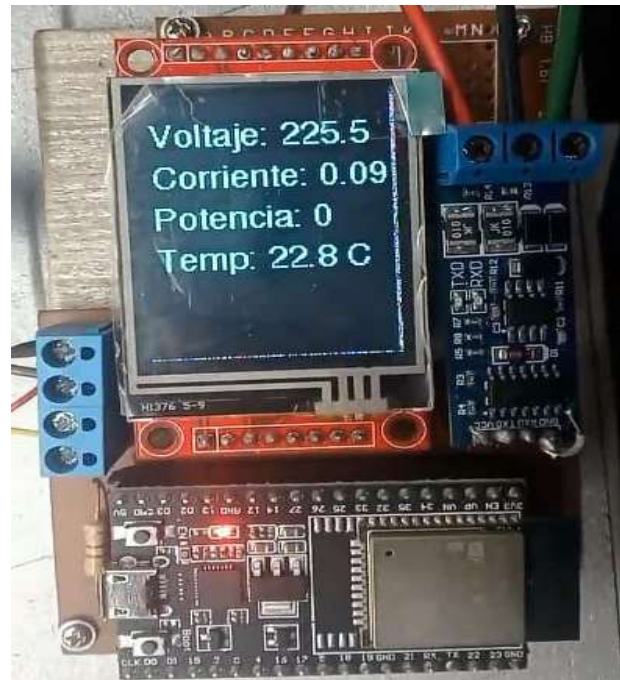


Fig. 7 Módulo de monitoreo (Sin carga)

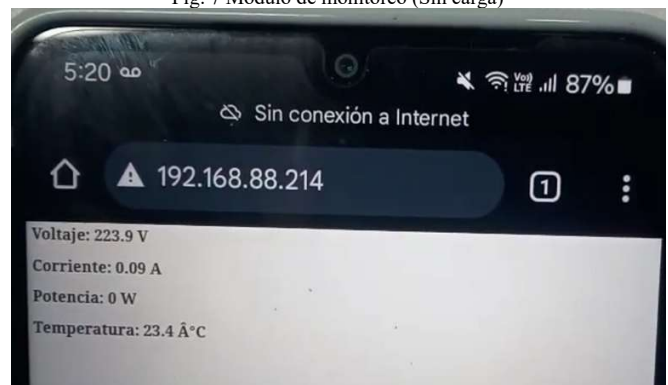


Fig. 8 Interfaz web del módulo de monitoreo (Sin carga)

3.2. Programación

La Figura 11 muestra el código de programación desarrollado para el microcontrolador ESP32, correspondiente a las líneas 1 a 36, donde se incluyen las librerías necesarias para la comunicación Wi-Fi, el manejo del servidor web embebido, la comunicación Modbus RTU, la visualización en la pantalla TFT y la lectura del sensor de temperatura. La correcta integración de estas librerías constituye la base funcional del sistema de monitoreo propuesto.

En este segmento del código se definen los parámetros de configuración de la red inalámbrica, incluyendo el identificador de red (SSID) y la contraseña, lo que permite establecer la conectividad del módulo IoT, asimismo, se inicializa el servidor web en el puerto 80, habilitando el acceso remoto a los datos de monitoreo a través de un navegador web.



Fig. 9 Módulo de monitoreo (Con carga)

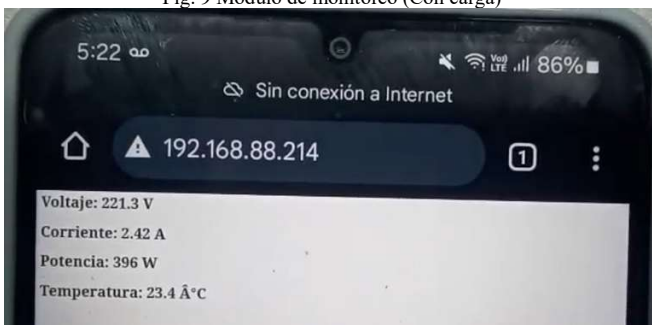


Fig. 10. Interfaz web del módulo de monitoreo (Con carga)

Adicionalmente, se configuran los pines de conexión para la pantalla TFT y el canal de comunicación serial RS485, empleado para la lectura de datos del medidor eléctrico mediante el protocolo Modbus RTU y esta configuración garantiza la correcta transmisión de información entre los dispositivos de medición y la unidad de procesamiento.

Finalmente, en estas primeras líneas del programa se inicializa el sensor de temperatura DS18B20 y se declaran las variables utilizadas para almacenar las mediciones de voltaje, corriente y estado de comunicación y este conjunto de instrucciones permite preparar el sistema para la adquisición continua de datos y su posterior visualización, evidenciando la correcta estructuración del firmware del módulo de monitoreo.

La Figura 12 presenta el segmento del código de programación del ESP32 correspondiente a las líneas 37 a 75, donde se desarrolla el proceso de inicialización del sistema y de los dispositivos periféricos. En esta sección se establece la comunicación serial para depuración y se inicializa el sensor de temperatura, permitiendo la lectura confiable de variables térmicas durante la operación del módulo.

```
ESP32 Dev Module
Pruebas_10_Mayo.ino
1 #include <WiFi.h>
2 #include <WebServer.h>
3 #include <ModbusMaster.h>
4 #include <Adafruit_GFX.h>
5 #include <Adafruit_ST7735.h>
6 #include <Fonts/FreeSans9pt7b.h>
7 #include <SPI.h>
8 #include <OneWire.h>
9 #include <DallasTemperature.h>
10
11 // ---- CONFIGURACIÓN DEL WIFI ----
12 const char* ssid = "Antonella";
13 const char* password = "valescal2345";
14
15 WebServer server(80);
16
17 // ---- PANTALLA TFT ----
18 #define TFT_CS 13
19 #define TFT_RST 12
20 #define TFT_DC 14
21 #define TFT_MOSI 27
22 #define TFT_SCLK 26
23 Adafruit_ST7735 tft = Adafruit_ST7735(TFT_CS, TFT_DC, TFT_MOSI, TFT_SCLK, TFT_RST);
24
25 // ---- RS485 - UART2 ----
26 #define RXD2 33
27 #define TXD2 25
28 HardwareSerial RS485(2);
29 ModbusMaster node;
30
31 // ---- DS18B20 (Temperatura) ----
32 #define ONE_WIRE_BUS 32 // Puedes cambiarlo si deseas
33 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
34 DallasTemperature sensors(&oneWire);
35 float temperatureC = 0.0;
36
```

Fig. 11 Código de Programación del ESP32 (1-36)

En este bloque del programa se configura la comunicación RS485 a través del segundo puerto serial del ESP32, definiendo la velocidad de transmisión y los pines de recepción y transmisión. Asimismo, se inicializa el protocolo Modbus RTU, estableciendo la dirección del esclavo correspondiente al medidor eléctrico, lo que habilita la lectura de los registros de voltaje y corriente.

La Figura 13 muestra el bloque del código de programación del ESP32 correspondiente a las líneas 76 a 114, donde se implementa la estructura del servidor web embebido encargado de atender las solicitudes del usuario y en este segmento se define la página principal del sistema, la cual presenta la información de voltaje, corriente, potencia y temperatura mediante una interfaz HTML sencilla y funcional.

Asimismo, en este bloque se incorpora el uso de solicitudes asíncronas para la actualización periódica de los datos, permitiendo que la información se refresque automáticamente sin necesidad de recargar la página lo que facilita la visualización en tiempo real de las variables monitoreadas, evidenciando la correcta transmisión de datos desde el ESP32 hacia el cliente web a través de la red Wi-Fi.

```

37 // ---- Variables de medición ----
38 float volt = 0;
39 float amp = 0;
40 float watt = 0;
41 bool ok = false;
42
43 void setup() {
44   Serial.begin(115200);
45   sensors.begin();
46
47   // Inicializamos RS485 y Modbus
48   RS485.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
49   node.begin(1, RS485);
50
51   // Inicializamos la pantalla TFT
52   tft.initR(INITR_BLACKTAB);
53   tft.setRotation(0);
54   tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
55   tft.setFont(&FreeSans9pt7b);
56   tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);
57   tft.setCursor(12, 30);
58   tft.println("Conectando WiFi...");
59
60   // Nos conectamos con el WiFi
61   WiFi.begin(ssid, password);
62   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
63     delay(500);
64     Serial.print(".");
65   }
66   Serial.println("\nWiFi conectado!");
67   Serial.println(WiFi.localIP());
68
69   // Mostramos la IP en la pantalla TFT
70   tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
71   tft.setCursor(12, 30);
72   tft.setTextColor(ST77XX_CYAN);
73   tft.println("IP:");
74   tft.setCursor(12, 60);
75   tft.println(WiFi.localIP());

```

Fig. 12 Código de Programación del ESP32 (37-75)

```

76
77 delay(2000);
78
79 // Página web con AJAX y html
80 server.on("/", []() {
81   String html = "<html><head>";
82   html += "<title>Monitoreo</title>";
83   html += "<script>";
84   html += "function updateData() {";
85   html += "  fetch('/data').then(response => response.json()).then(data => {";
86   html += "    document.getElementById('volt').innerHTML = 'Voltaje: ' + data.volt + ' V';";
87   html += "    document.getElementById('amp').innerHTML = 'Corriente: ' + data.amp + ' A';";
88   html += "    document.getElementById('watt').innerHTML = 'Potencia: ' + data.watt + ' W';";
89   html += "    document.getElementById('temp').innerHTML = 'Temperatura: ' + data.temp + ' °C';";
90   html += "  });";
91   html += "  setTimeout(updateData, 2000); // Actualiza cada 2 segundos";
92   html += "});";
93   html += "window.onload = updateData;";
94   html += "</script>";
95   html += "</head><body>";
96   html += "<h2 id='volt'>Voltaje: Cargando...</h2>";
97   html += "<h2 id='amp'>Corriente: Cargando...</h2>";
98   html += "<h2 id='watt'>Potencia: Cargando...</h2>";
99   html += "<h2 id='temp'>Temperatura: Cargando...</h2>";
100  html += "</body></html>";
101  server.send(200, "text/html", html);
102 });
103
104 // Ruta para devolver los datos en formato JSON
105 server.on("/data", []() {
106   String json = "{";
107   json += "\"volt\": " + String(volt, 1) + ",";
108   json += "\"amp\": " + String(amp, 2) + ",";
109   json += "\"watt\": " + String(watt, 0) + ",";
110   json += "\"temp\": " + String(temperatureC, 1);
111   json += "}";
112   server.send(200, "application/json", json);
113 });

```

Fig. 13 Código de Programación del ESP32 (76-114)

La Figura 14 presenta el segmento del código de programación del ESP32 comprendido entre las líneas 115 y 141, donde se define la ruta encargada de suministrar los datos de monitoreo en formato JSON. Este bloque permite que las variables

eléctricas y térmicas sean estructuradas y enviadas de manera organizada al cliente web, facilitando su procesamiento y visualización.

```

115
116 server.begin();
117 }
118
119 uint32_t read2Reg(uint16_t reg, bool &ok) {
120   uint8_t result = node.readInputRegisters(reg, 2);
121   if (result == node.ku8MBSuccess) {
122     uint16_t hi = node.getResponseBuffer(0);
123     uint16_t lo = node.getResponseBuffer(1);
124     ok = true;
125     return ((uint32_t)hi << 16) | lo;
126   }
127   ok = false;
128   return 0;
129 }
130
131 void loop() {
132   volt = read2Reg(0x0100, ok) * 0.001;
133   amp = read2Reg(0x0102, ok) * 0.001;
134   watt = read2Reg(0x0104, ok) * 1.0;
135   sensors.requestTemperatures();
136   temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
137
138   tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
139   tft.setFont(&FreeSans9pt7b);
140   tft.setTextColor(ok ? ST77XX_CYAN : ST77XX_RED);
141

```

Fig. 14 Código de Programación del ESP32 (115-141)

La Figura 14 presenta el segmento del código de programación del ESP32 comprendido entre las líneas 115 y 141, donde se define la ruta encargada de suministrar los datos de monitoreo en formato JSON, este bloque permite que las variables eléctricas y térmicas sean estructuradas y enviadas de manera organizada al cliente web, facilitando su procesamiento y visualización.

En este tramo del programa se observa la construcción del mensaje JSON que contiene los valores de voltaje, corriente, potencia y temperatura, los cuales son actualizados de forma periódica y esta implementación confirma la correcta interoperabilidad entre el servidor web embebido y la interfaz de usuario, asegurando la disponibilidad de la información en tiempo real durante la operación del módulo de monitoreo.

3.3. Estabilidad de las mediciones

Con el fin de evaluar el desempeño del sistema, se realizó un análisis de estabilidad de las mediciones durante intervalos de operación continua y se observó una variación menor al 1% en las lecturas de voltaje en estado estable, lo que evidencia consistencia en la adquisición de datos.

Asimismo, el tiempo de respuesta del sistema ante cambios de estado (de sin carga a carga) fue inferior a 2 segundos, correspondiente al intervalo de actualización del sistema y en términos de confiabilidad, no se registraron pérdidas de comunicación durante las pruebas realizadas, manteniéndose la integridad de los datos tanto en la visualización local como remota lo que permiten validar que el sistema presenta un comportamiento estable y confiable bajo condiciones normales de operación.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la arquitectura de monitoreo propuesta es técnicamente viable y adecuada para su integración en cargadores de vehículos eléctricos de bajo costo, sin necesidad de modificar su sistema interno de control y la correcta adquisición y visualización en tiempo real de variables eléctricas fundamentales, como voltaje y corriente, evidencia que el microcontrolador ESP32 cuenta con las capacidades necesarias para operar de manera estable como nodo IoT embebido sin interferir en la lógica interna del EVSE.

La comunicación mediante Modbus RTU sobre RS485 demostró ser confiable durante las pruebas experimentales, manteniendo coherencia en las lecturas y estabilidad en los ciclos de adquisición y la ausencia de discrepancias entre los valores mostrados en la pantalla TFT y en la interfaz web indica una correcta sincronización de los procesos internos del sistema, este resultado refuerza la elección de un protocolo industrial ampliamente adoptado, especialmente en aplicaciones donde la robustez y la interoperabilidad son factores críticos.

Desde el punto de vista del diseño IoT, la implementación de un servidor web embebido en el ESP32 permitió una visualización remota eficiente, con tiempos de actualización cortos y sin depender de plataformas externas en la nube y esta decisión no solo simplifica la arquitectura del sistema, sino que también reduce la latencia y mejora la autonomía operativa del módulo, aspectos particularmente relevantes en entornos donde la conectividad a Internet no siempre está garantizada.

La incorporación del monitoreo de temperatura mediante el sensor DS18B20 aportó una variable adicional de supervisión que complementa adecuadamente el análisis eléctrico, si bien durante las pruebas los valores térmicos se mantuvieron dentro de rangos normales, esta capacidad resulta importante para identificar condiciones anómalas asociadas a sobrecalentamiento o fallas incipientes, contribuyendo al mantenimiento predictivo, preventivo y extensión de la vida útil del EVSE.

No obstante, es importante señalar que las pruebas se realizaron en un entorno controlado y con un único modelo de cargador, lo que limita el alcance de los resultados, asimismo, el sistema no incorpora aún mecanismos avanzados de seguridad en la comunicación, aspecto clave en sistemas conectados y a pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos permiten afirmar que la solución propuesta constituye una base sólida para el desarrollo de sistemas de monitoreo más completos y escalables.

La implementación del sistema de monitoreo evidenció que es posible obtener información operativa relevante del cargador sin alterar su arquitectura original ni su proceso de carga, esto resulta especialmente importante en cargadores comerciales, donde las modificaciones internas suelen estar restringidas por el fabricante y el enfoque adoptado demuestra que una solución externa de monitoreo puede integrarse de manera efectiva, ofreciendo datos útiles para la supervisión y el análisis del

comportamiento eléctrico durante la operación normal del equipo.

El desempeño del sistema durante las pruebas pone de manifiesto que la simplicidad de la arquitectura no limita su funcionalidad y a pesar de utilizar componentes de bajo costo y una estructura de comunicación relativamente sencilla, el sistema logró responder de forma estable a los cambios de estado del cargador, reflejando adecuadamente las transiciones entre operación sin carga y con carga, este comportamiento sugiere que soluciones accesibles pueden cubrir necesidades reales de monitoreo en infraestructura de carga, sin requerir sistemas complejos o de alto costo.

El sistema propuesto resultó intuitivo y práctico, pues la información presentada en la interfaz local y en la web se entiende con facilidad y permite al usuario interpretar rápidamente los datos y esta característica es relevante, considerando que el monitoreo de cargadores no siempre es realizado por personal altamente especializado, la simplicidad en la visualización de las variables eléctricas facilita la supervisión cotidiana del cargador y reduce la probabilidad de errores en la interpretación de su estado operativo.

Otro aspecto relevante observado durante la implementación es la flexibilidad del sistema para adaptarse a distintos escenarios de uso y la arquitectura basada en el ESP32 y en protocolos estándar permite que el módulo de monitoreo pueda extenderse o ajustarse a otros modelos de cargadores o a nuevas variables de interés sin requerir cambios significativos en el diseño base. Esta capacidad de adaptación resulta clave en un contexto de rápida evolución tecnológica, donde la infraestructura de carga debe ser capaz de escalar y actualizarse de manera progresiva y en comparación con estudios previos, el sistema propuesto no solo permite la monitorización en tiempo real, sino que además integra una arquitectura de bajo costo y fácil implementación, lo que representa una ventaja frente a soluciones más complejas orientadas a infraestructura de gran escala y esta característica lo posiciona como una alternativa viable para contextos donde los recursos son limitados, contribuyendo a cerrar la brecha tecnológica identificada en la literatura.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de monitoreo en tiempo real basado en tecnologías IoT para cargadores de vehículos eléctricos, empleando el microcontrolador ESP32 como núcleo del sistema y las pruebas experimentales demostraron que la solución puede adquirir, procesar y visualizar de manera confiable variables eléctricas y térmicas relevantes, tanto a nivel local como remoto.

La integración del protocolo Modbus RTU sobre RS485 permitió obtener mediciones estables y consistentes del cargador, a su vez, la conectividad Wi-Fi del ESP32, junto con un servidor web embebido, facilitó el acceso remoto a la información sin requerir infraestructura adicional en la nube, esta arquitectura contribuye a la simplicidad del sistema y favorece su replicabilidad en distintos contextos de aplicación.

El sistema desarrollado mejora la visibilidad operativa en cargadores de gama inicial y media, proporcionando información clave para la supervisión del estado del equipo y la identificación temprana de posibles fallas y la incorporación del monitoreo térmico amplía sus capacidades y refuerza su utilidad en estrategias de mantenimiento preventivo.

Los resultados obtenidos evidencian que es posible optimizar la supervisión de cargadores mediante soluciones IoT externas, de bajo costo y fácil implementación y el sistema ofrece datos relevantes sobre el estado operativo del equipo, lo que permite una gestión más informada de la infraestructura de carga.

Asimismo, el módulo no solo cumple una función de monitoreo en tiempo real, sino que también actúa como una herramienta de apoyo para la gestión operativa y al brindar información accesible y confiable, facilita la toma de decisiones relacionadas con el uso, la supervisión y el mantenimiento de los cargadores.

La propuesta demuestra que la incorporación de tecnologías IoT en la infraestructura de carga puede realizarse de forma progresiva y compatible con equipos existentes, este enfoque permite modernizar cargadores ya instalados sin necesidad de realizar inversiones elevadas ni reemplazar completamente la infraestructura.

Finalmente, se evidencia que el monitoreo en tiempo real puede integrarse gradualmente en sistemas existentes, estableciendo una base sólida para futuras mejoras tecnológicas y el uso de componentes de bajo costo, estándares de comunicación industrial y una arquitectura modular posiciona esta solución como una alternativa práctica y accesible para fortalecer la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2025: Trends and Developments in Electric Vehicle Markets," 2025, Paris. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVOutlook2025.pdf>
- [2] D. J. Arent et al., "Challenges and opportunities in decarbonizing the U.S. energy system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112939, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112939.
- [3] B. Xu et al., "Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 1, p. 51, Dec. 2022, doi: 10.1186/s41601-022-00271-w.
- [4] J. Liu, G. Lin, S. Huang, Y. Zhou, C. Rehtanz, and Y. Li, "Collaborative EV Routing and Charging Scheduling With Power Distribution and Traffic Networks Interaction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 5, pp. 3923–3936, Sep. 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3142256.
- [5] L. Wang, A. Dubey, A. H. Gebremedhin, A. K. Srivastava, and N. Schulz, "MPC-Based Decentralized Voltage Control in Power Distribution Systems With EV and PV Coordination," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 13, no. 4, pp. 2908–2919, Jul. 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3156115.
- [6] F. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf, M. Marzband, and I. Khan, "Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2314–2333, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.180.
- [7] H. Yu, S. Niu, Y. Shang, Z. Shao, Y. Jia, and L. Jian, "Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: A comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, p. 112812, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112812.
- [8] J. Johnson, T. Berg, B. Anderson, and B. Wright, "Review of Electric Vehicle Charger Cybersecurity Vulnerabilities, Potential Impacts, and Defenses," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 11, p. 3931, May 2022, doi: 10.3390/en15113931.
- [9] M. S. Mastoi et al., "An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11504–11529, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.011.
- [10] M. S. Mastoi et al., "A study of charging-dispatch strategies and vehicle-to-grid technologies for electric vehicles in distribution networks," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1777–1806, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2022.12.139.
- [11] Z. Chen, A. M. Amani, X. Yu, and M. Jalili, "Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2118, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042118.
- [12] S. Chatterjee, S. S. Kanojia, J. Ven, and U. K. Mishra, "Solar Energy-Supported User-Friendly EV Charging Solution Based on IoT," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 105, no. 4, pp. 999–1004, Aug. 2024, doi: 10.1007/s40031-024-01030-1.
- [13] S. Arulmozhi, M. Abiramavalli, M. B. D. Bhavaani, and S. Loganayagi, "IoT enabled E-Vehicle Charging System with Battery Monitoring and Charge Scheduling," in *2023 First International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 1–9. doi: 10.1109/ICPEEV58650.2023.10391930.
- [14] M. S. M. Nizam, E. Abdullah, N. M. Hidayat, N. M. Z. Hashim, and M. A. A. Hassan, "Real-Time Energy Monitoring in Renewable EV Charging Stations: An ESP32-Based System Integrating Modbus, MQTT, and ESP-NOW Protocols," in *2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCORED)*, IEEE, Dec. 2024, pp. 339–344. doi: 10.1109/SCORED64708.2024.10872647.
- [15] S. S. G. Acharige, Md. E. Haque, M. T. Arif, N. Hosseinzadeh, K. N. Hasan, and A. M. T. Oo, "Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 41218–41255, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267164.