

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Diseño y Desarrollo de un Sistema de Data Logger Basado en IoT para el Monitoreo de Parámetros en Sistemas Fotovoltaicos

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

Rafael Yoel Chavez Ravelo

DIRECTOR: Dr. José Antonio Marbán Salgado

CODIRECTOR: Dr. Jorge Arturo Sandoval Espino

CUERNAVACA, MORELOS **6 de junio, 2025**

Agradecimientos

A mi director, el Dr. José Antonio Marbán Salgado, por su apoyo, guía y amistad a lo largo de los dos años que ha tomado la realización de este trabajo de Maestría.

A mi codirector, el Dr. Jorge Arturo Sandoval Espino, por sus oportunos consejos y comentarios durante cada etapa del desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Diego Seuret Jiménez quien, como miembro de mi comité tutorial, apoyó con su experiencia y análisis crítico a perfeccionar este trabajo.

A mi esposa, Solanch, por su amor, paciencia y por ser mi constante motivación.

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico brindado a lo largo de mis estudios, dándome la oportunidad de realizar este trabajo de la manera más efectiva posible.

A todos, muchísimas gracias.

Índice

Agradecimientos 1

Índice 2

Índice de tablas 5

Índice de figuras 6

Capítulo 1. Antecedentes 8

1.1 Pregunta de investigación 12

1.2 Justificación 12

1.3 Problemática 12

1.4 Hipótesis 12

1.5 Objetivo General 13

1.6 Objetivos Específicos 13

Capítulo 2. Marco Teórico 14

2.1 Principios de la Energía Fotovoltaica 14

2.2 Factores que Impactan la Eficiencia 14

2.3 Tipos de Sensores y sus Aplicaciones 14

2.4 Microcontrolador ESP32-C3 Super Mini en Aplicaciones de IoT 15

2.5 Implementación de Sensores en Sistemas Fotovoltaicos 15

2.6 Desarrollo de una Plataforma Web para el Monitoreo de Sistemas Fotovoltaicos 16

Capítulo 3. Metodología 17

3.1 ESP32-C3 Super Mini 18

3.2 Sensores 20

3.2.1 Reducción de Ruido y Calibración 21

3.2.2 Monitoreo de la Fuente de 3.3 V 21

3.2.3 Sensor de Voltaje 22
3.2.3.1 Circuito de Medición 23
3.2.3.2 Cálculo de Voltaje 24
3.2.3.3 Implementación de Software 24
3.2.3 Sensor de Corriente 25
3.2.3.1 Circuito de Medición y Alimentación 25
3.2.3.2 Caracterización del Sensor 27
3.2.3.3 Implementación en Software 27
3.2.4 Sensor de Temperatura 28
3.2.4.1 Diseño del circuito de conexión 28
3.2.4.2 Implementación en Software 30
3.2.5 Sensor de Radiación Solar 31
3.2.5.1 Caracterización del LDR 31
3.2.5.2 Conversión a Irradiancia Solar (W/m²) 34
3.2.5.3 Implementación en Código 34
3.3 Diseño del Sistema 35
3.3.1 Conexión del circuito y Resumen del Hardware 35
3.3.2 Funcionalidades del sistema web 37
3.3.2.1 Configuración del servidor web 37
3.3.2.2 Comunicación Bidireccional: WebSockets 38
3.3.2.3 Manejo de Datos con JSON 39
3.3.2.4 Gestión de Sesiones y Seguridad 39
3.3.3 Almacenamiento de Datos 40
3.3.4 Visualización de Datos Históricos 42

3.3.4.1 Procesamiento y Respuesta del Servidor 42
3.3.4.2 Interfaz de Usuario 44
3.3.5 Páginas Web del Sistema 44
3.3.5.1 Página de Inicio de Sesión 44
3.3.5.2 Página de Monitoreo en Tiempo Real 46
3.3.5.3 Página de Datos Históricos 48
3.3.5.5 Compatibilidad con Dispositivos Móviles 50
Capítulo 4: Resultados y Discusión 52
4.1 Implementación del Data Logger 53
4.2 Pruebas de Funcionamiento 53
4.2.1 Precisión de los sensores y análisis de datos 53
4.2.2 Estabilidad de la Conexión Wi-Fi 62
4.2.3 Eficiencia en la Recopilación y Almacenamiento de Datos 63
4.2.4 Visualización de Datos en la Plataforma Web 63
4.3 Análisis integrado de rendimiento energético diario 65
4.4 Evaluación de Costos 66
4.5 Potencialidades en IoT 70
4.6 Limitaciones del Estudio 72
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones 75
5.1 Conclusiones 75
5.2 Recomendaciones 77
5.3 Trabajos Futuros y Perspectivas 78
Referencias 81
Apéndice A – Productos académicos derivados del trabajo 84

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones Técnicas del ESP32-C3 Super Mini..... 18
Tabla 2. Distribución de Pines del Esp32 C3 Super Mini 19
Tabla 3. Rango de voltaje que puede ser medido en dependencia de la atenuación seleccionada. 20
Tabla 4. Precios desglosados de los componentes 67
Tabla 5. Sistemas comerciales de monitoreo de sistemas fotovoltaicos..... 67

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de referencias por año 11
Figura 2. Metodología de la investigación..... 17
Figura 3. Mapa de pines del ESP32-C3 Super Mini 19
Figura 4. Divisor de voltaje del pin de alimentación de 3.3V..... 22
Figura 5. Circuito del divisor de voltaje 23
Figura 6. Circuito del divisor de voltaje del ACS712 26
Figura 7. Placa del sensor y diagrama de conexión del ACS712ELECTR-30A-T[21]..... 26
Figura 8. Configuración de instalación del sensor de temperatura DS18B2029
Figura 9. Sensor de temperatura DS18B20 con encapsulado de acero 29
Figura 10. Diagrama de circuito del LDR 31
Figura 11. Grafica de lux vs Resistencia del LDR 32
Figura 12. Log (Lux) vs Log (Resistencia) 33
Figura 13. Diagrama de conexión 36
Figura 14. Diseño del circuito en el protoboard 36
Figura 15. Fragmento de archivo CVS..... 42
Figura 16. Página web de login 46
Figura 17. Portal Web 48
Figura 18. Vista del comportamiento de la temperatura en la página de Datos Históricos 50
Figura 19. Captura de la página web en un celular 51
Figura 20. Detalle de las fluctuaciones del voltaje medido durante el periodo nocturno del 24 de mayo del 2025 (22:00 - 22:30), con escala ajustada para visualizar la variabilidad a bajo nivel. 54
Figura 21. Mismas lecturas de voltaje nocturno del 24 de mayo del 2025 (22:00-22:30) presentadas en la escala operativa completa del sensor (0-48 V), demostrando la insignificancia relativa de las fluctuaciones nocturnas... 55

Figura 22. Comportamiento del voltaje del panel fotovoltaico de prueba (5W, carga de 5 ohms) durante el 25 de mayo de 2025, mostrando el efecto de la ubicación en un balcón 56
Figura 23. Lecturas del sensor de corriente ACS712 durante el periodo nocturno del 03-04 de diciembre de 2024, mostrando estabilidad en cero amperios 56
Figura 24. Correlación temporal entre la corriente generada y la intensidad solar medida durante el 01 de diciembre de 2024 (13:52 - 15:00)..... 58
Figura 25. Comparación de lecturas de los sensores de temperatura DS18B20 durante un ciclo de 24 horas (24 de mayo 2025)..... 59
Figura 26. Curva de irradiancia medida 1 de diciembre del 2024 61
Figura 27. Análisis integrado del rendimiento energético del sistema fotovoltaico de prueba durante el 25 de mayo de 2025, mostrando irradiancia solar, voltaje, corriente y potencia..... 66
Figura 28. Póster "Diseño y desarrollo de sensores de realidad aumentada aplicada a sistemas fotovoltaicos". Presentado en el II Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería, CIICAp-UAEM, Cuernavaca, Morelos. [septiembre 2024]. 84

Capítulo 1. Antecedentes

En los últimos años, ha habido un aumento en el consumo de combustibles fósiles, impulsado principalmente por la creciente demanda de energía [1] resultado de avances tecnológicos y sociales rápidos. En consecuencia, temas críticos como el calentamiento global, las emisiones de gases de efecto invernadero, preocupaciones ambientales y el cambio climático [2] han adquirido una relevancia significativa debido a la combustión excesiva de combustibles fósiles para satisfacer la demanda[3]. Para abordar estos desafíos, existe un interés creciente en la generación de energía a partir de fuentes renovables y limpias, como la energía solar [4][5], [6], [7].

Incluso en medio del impacto de la pandemia de COVID-19 que comenzó en 2020, se ha observado una aceleración notable en la generación de electricidad a partir de fuentes renovables. Esta tendencia se puede atribuir a la reducción de costos de instalación y operativos en comparación con los métodos tradicionales basados en combustibles fósiles [8]. Las energías renovables son fuentes de energía inagotables y cada vez más competitivas. Su distinción principal respecto a los combustibles fósiles radica en su diversidad, abundancia y potencial global, lo que permite la generación sostenible de electricidad al no producir directamente gases de efecto invernadero[5], [6]. La Agencia Internacional de Energía ha establecido el objetivo de aumentar el suministro de energía renovable (REN) a dos tercios del total mundial de suministro de energía para el año 2050 [9][5], [7]. La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes que más crecimiento proyectan. La capacidad solar experimento un aumento de 239 GW en 2022 [8], con proyecciones que sugieren un incremento anual de 300 a 500 GW a partir del 2030 [9][5].

Sin embargo, esta tecnología enfrenta desafíos. Con el tiempo, los sistemas fotovoltaicos solares experimentan una disminución en la eficiencia y productividad. Esto puede atribuirse a fallas en los componentes del sistema,

especialmente en la sección de celdas fotovoltaicas y en el Punto de Máxima Potencia (MPT), lo que provoca fluctuaciones en el sistema [10]. Otros problemas pueden derivar de suciedad, vegetación o sombreado [11], fallas en el generador fotovoltaico como cortocircuitos o circuitos abiertos, puntos calientes, delaminación, fallas en la caja de conexiones, cortocircuitos de los módulos, acumulación de suciedad, corrosión de las conexiones, grietas en las células, desalineación de los módulos y fallas debido a conexiones dañadas [12]. Para mitigar o reducir estas fallas y asegurar el funcionamiento óptimo de los sistemas fotovoltaicos solares, son indispensables estrategias efectivas de Operación y Mantenimiento (O&M). Un sistema fotovoltaico correctamente instalado con una O&M adecuada tiene una vida útil estimada de más de 25 años, mientras que prácticas deficientes de O&M acortan esta vida útil [13][14]. La literatura reporta [15] que los sistemas sometidos a mantenimiento preventivo se degradan a un ritmo de 1.38% por año, mientras que aquellos sometidos a mantenimiento reactivo se degradó a un ritmo de 1.61% por año. El creciente uso de la energía solar ha resaltado la importancia de mejorar la forma en que se mantienen y operan estos sistemas, haciéndose esenciales estrategias más eficientes. Los objetivos principales se centran en la reducción de costos, mejora de la disponibilidad y aumento de la productividad [13].

El mantenimiento en sistemas fotovoltaicos solares se define adecuadamente en como un conjunto de acciones dirigidas a preservar la planta fotovoltaica en condiciones óptimas de operación, previniendo la degradación y el mal funcionamiento [16]. El Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) identifica tres tipos principales de mantenimiento: preventivo, correctivo y predictivo [16]. El mantenimiento preventivo se hace de forma regular y planificada para evitar o reducir las averías de los equipos. El mantenimiento correctivo se hace después de que se ha producido una falla para restaurar su funcionamiento. El predictivo se hace mediante la monitorización y el

diagnóstico de los equipos para predecir y anticipar las posibles fallas que puedan ocurrir [16].

Las estrategias basadas en monitoreo implican la detección de fallas en sistemas fotovoltaicos mediante el análisis de parámetros eléctricos medidos (como potencia de salida, corriente y voltaje) en comparación con parámetros derivados de un modelo de referencia estándar [17]. Aunque estos métodos permiten una detección eficaz de fallas, su principal limitación es la incapacidad para identificar componentes defectuosos [18]. Los sistemas avanzados de monitoreo son poco realistas económicamente para sistemas fotovoltaicos a pequeña escala, lo que lleva a fallos parciales del sistema por pérdida de energía que pasan desapercibidos durante largos períodos. Los sistemas de monitoreo basados en la web también son métodos preventivos atractivos, permitiendo la distribución de datos entre usuarios remotos y accesibles en dispositivos en todo el mundo [19].

La implementación de sistemas de data logger basados en microcontroladores como el ESP32 ha demostrado ser efectiva para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos. Por ejemplo, en [20] se propone un método que utiliza la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) para transmitir y monitorear en tiempo real los parámetros principales de un panel fotovoltaico, aprovechando las capacidades del microcontrolador ESP32 y la comunicación Bluetooth de bajo consumo. Este enfoque permite una supervisión eficiente y en tiempo real de los sistemas fotovoltaicos, facilitando la detección temprana de fallas y la optimización del rendimiento energético.

Además, en [21] se presenta un data logger de ultra bajo consumo basado en el microcontrolador ESP32-S2, diseñado para sistemas fotovoltaicos autónomos. Este dispositivo utiliza sensores de voltaje, corriente y luz para registrar datos del sistema fotovoltaico en una tarjeta micro SD, y ofrece modos de operación de bajo consumo y servidor web para la monitorización en tiempo real. El sistema demostró un consumo energético anual de solo 64 Wh y un

costo total de aproximadamente 436 pesos mexicanos, lo que lo convierte en una solución económica y eficiente para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos.

Estos estudios evidencian que estos dispositivos basados en microcontroladores como el ESP32 son herramientas efectivas y de bajo costo para el monitoreo y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos, contribuyendo a la optimización de su rendimiento y a la reducción de costos operativos.

En complemento a lo anterior, se realizó un análisis temporal de las fuentes utilizadas en este trabajo con el objetivo de evidenciar la actualidad de los estudios revisados. La Figura 1 muestra la distribución de las referencias según su año de publicación, lo que permite visualizar la tendencia reciente en el uso de tecnologías como el ESP32 en aplicaciones de monitoreo de sistemas fotovoltaicos. Esta distribución refuerza la relevancia y vigencia del enfoque adoptado en esta investigación.

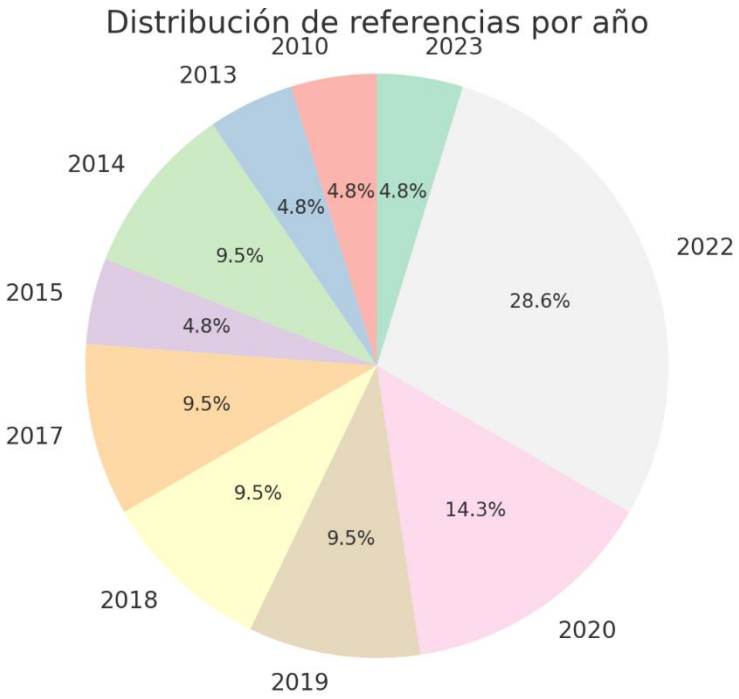

Figura 1. Distribución de referencias por año

1.1 Pregunta de investigación

¿Puede un sistema de data logger de bajo costo, basado en IoT y el microcontrolador ESP32-C3, mejorar el monitoreo y la recopilación de datos en sistemas fotovoltaicos, facilitando la operación y el mantenimiento?

1.2 Justificación

El monitoreo eficiente de los sistemas fotovoltaicos es esencial para maximizar su desempeño y prolongar su vida útil. Sin embargo, las soluciones de monitoreo disponibles en el mercado suelen ser costosas y diseñadas para instalaciones a gran escala, dejando una brecha significativa en las opciones accesibles para proyectos pequeños o medianos. Este trabajo busca llenar esa brecha desarrollando un data logger asequible y eficiente, basado en el microcontrolador ESP32-C3, capaz de recopilar, almacenar y analizar datos de sensores en tiempo real y de forma histórica. La implementación de este sistema no solo democratiza el acceso a tecnologías de monitoreo, sino que también fomenta prácticas de mantenimiento predictivo y preventivo, contribuyendo a la sostenibilidad energética y al aumento de la productividad en sistemas fotovoltaicos

1.3 Problemática

El monitoreo adecuado de sistemas fotovoltaicos es crucial para garantizar su eficiencia y vida útil. Sin embargo, muchas soluciones de monitoreo disponibles en el mercado son costosas y están diseñadas para instalaciones de gran escala, dejando a las instalaciones de pequeña escala con opciones limitadas y subóptimas. Esto provoca una falta de datos oportunos sobre el desempeño de los sistemas, dificultando la identificación de fallos o el mantenimiento preventivo.

1.4 Hipótesis

Un sistema de data logger basado en el microcontrolador ESP32-C3, que permita la recopilación y almacenamiento de datos de sensores de manera autónoma y accesible vía una interfaz web, puede ofrecer una solución de

monitoreo confiable y de bajo costo para pequeños sistemas fotovoltaicos, mejorando el análisis de desempeño y facilitando el mantenimiento preventivo.

1.5 Objetivo General

Diseñar, implementar y evaluar un sistema de data logger basado en IoT para monitorear parámetros operativos clave (voltaje, corriente, irradiancia solar y temperatura) en sistemas fotovoltaicos, accesible a través de una interfaz web para análisis en tiempo real e histórico.

1.6 Objetivos Específicos

- Revisión Bibliográfica: Identificar tecnologías existentes para monitoreo en sistemas fotovoltaicos y evaluar sus ventajas, limitaciones y costos.
- Diseño de Hardware: Diseñar y construir el circuito electrónico integrando sensores (voltaje, corriente, irradiancia solar y temperatura) con el microcontrolador ESP32-C3.
- Desarrollo de Firmware: Implementar un programa en el ESP32-C3 que capture, procese y almacene los datos de los sensores, permitiendo su acceso remoto.
- Diseño de la Interfaz Web: Desarrollar una plataforma web para la visualización en tiempo real y el acceso histórico de los datos recopilados.
- Pruebas Experimentales: Evaluar el desempeño del sistema en condiciones controladas y reales para validar su funcionalidad y precisión.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Principios de la Energía Fotovoltaica

La energía fotovoltaica se basa en el efecto fotovoltaico, un fenómeno en el cual materiales semiconductores, al absorber fotones, liberan electrones, generando corriente eléctrica. Los módulos fotovoltaicos están compuestos por celdas solares que convierten directamente la radiación solar en electricidad. La eficiencia de esta conversión depende de factores como la irradiancia solar, la temperatura y las propiedades intrínsecas de los materiales semiconductores empleados [22].

2.2 Factores que Impactan la Eficiencia

La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos está influenciada por diversos factores:

Condiciones Ambientales: La irradiancia, la temperatura, la acumulación de suciedad y la presencia de sombras afectan directamente el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Por ejemplo, una disminución en la irradiancia reduce la generación de electricidad, mientras que temperaturas elevadas pueden disminuir la eficiencia de conversión energética[11].

Degradación de Materiales: Con el paso del tiempo, los materiales constitutivos de los módulos fotovoltaicos experimentan procesos de degradación que merman su capacidad de generación eléctrica. La implementación de estrategias de monitorización y mantenimiento adecuadas es esencial para mitigar estos efectos y prolongar la vida útil del sistema [15].

La utilización de energía solar demanda la optimización de la eficiencia en la cadena de conversión para mantener la calidad del sistema. Muchos sensores existentes tienen costos elevados, y si se busca la integración inalámbrica, este costo aumenta aún más. Para mitigar esto, resulta imperativo diseñar circuitos de bajo costo y consumo energético [23].

2.3 Tipos de Sensores y sus Aplicaciones

La integración de sensores en sistemas fotovoltaicos permite la adquisición de datos en tiempo real sobre diversas variables operativas:

Sensores de Temperatura: Miden la temperatura de los módulos y del entorno, proporcionando información crucial para ajustar y optimizar la eficiencia del sistema.

Sensores de Voltaje y Corriente: Evalúan los parámetros eléctricos de los módulos, facilitando la detección de anomalías y la optimización del rendimiento.

Sensores de Radiación Solar: Miden la intensidad de la irradiancia, permitiendo evaluar en tiempo real el potencial de generación de energía solar.

2.4 Microcontrolador ESP32-C3 Super Mini en Aplicaciones de IoT

El ESP32-C3 Super Mini es un microcontrolador de alta versatilidad, ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Este dispositivo ofrece conectividad Wi-Fi y Bluetooth Low Energy, facilitando la comunicación inalámbrica y la transmisión de datos a dispositivos remotos. Equipado con un procesador RISC-V de 32 bits, permite la ejecución simultánea de múltiples tareas, lo cual es esencial para la gestión eficiente de datos provenientes de diversos sensores. Sus interfaces de entrada/salidas generales (GPIO) posibilitan la conexión y el control de múltiples sensores, así como la adquisición de datos en tiempo real, convirtiéndolo en una herramienta idónea para el desarrollo de proyectos de IoT y automatización [24]

2.5 Implementación de Sensores en Sistemas Fotovoltaicos

La integración de sensores en sistemas fotovoltaicos permite la monitorización en tiempo real de parámetros críticos como temperatura, voltaje, corriente e irradiancia. Estos sensores, conectados a microcontroladores como el ESP32-C3, recopilan datos que son procesados y transmitidos para su análisis. Esta implementación facilita la detección temprana de fallas y la optimización del rendimiento del sistema.

2.6 Desarrollo de una Plataforma Web para el Monitoreo de Sistemas Fotovoltaicos

La implementación de plataformas web para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar el rendimiento y la gestión de estos sistemas. Estas plataformas permiten la supervisión en tiempo real de parámetros críticos, facilitando la detección temprana de anomalías y la implementación de medidas correctivas oportunas. Por ejemplo, [25] ofrece una plataforma de monitoreo que permite a los usuarios rastrear el rendimiento de su sistema solar y reducir los costos de operación y mantenimiento al aumentar el tiempo de actividad del sistema y resolver fallas de manera más efectiva. Sin embargo, estos sistemas actuales son costosos y difíciles de aplicar a sistemas pequeños o aislados.

La combinación de sensores IoT y plataformas web de monitoreo no solo optimiza el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, sino que también contribuye a la reducción de costos operativos al minimizar el tiempo de inactividad y prolongar la vida útil de los componentes. Esta integración tecnológica proporciona una herramienta poderosa para la gestión eficiente de la energía solar, alineándose con las tendencias actuales de digitalización y automatización en el sector energético.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describe detalladamente la metodología implementada para el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de paneles solares, basado en la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). Este sistema emplea un microcontrolador ESP32-C3 Super Mini como núcleo del procesamiento de datos y gestión de comunicaciones, complementado con sensores que recopilan información en tiempo real sobre las condiciones operativas de los paneles solares.

El sistema tiene como objetivo proporcionar una solución económica, eficiente y de fácil implementación, capaz de medir parámetros clave como temperatura, voltaje, corriente e irradiancia solar. Los datos recopilados se procesan localmente en el microcontrolador y se transmiten mediante conectividad Wi-Fi a una interfaz web diseñada para permitir la visualización, análisis y gestión de la información desde cualquier dispositivo conectado a la red.

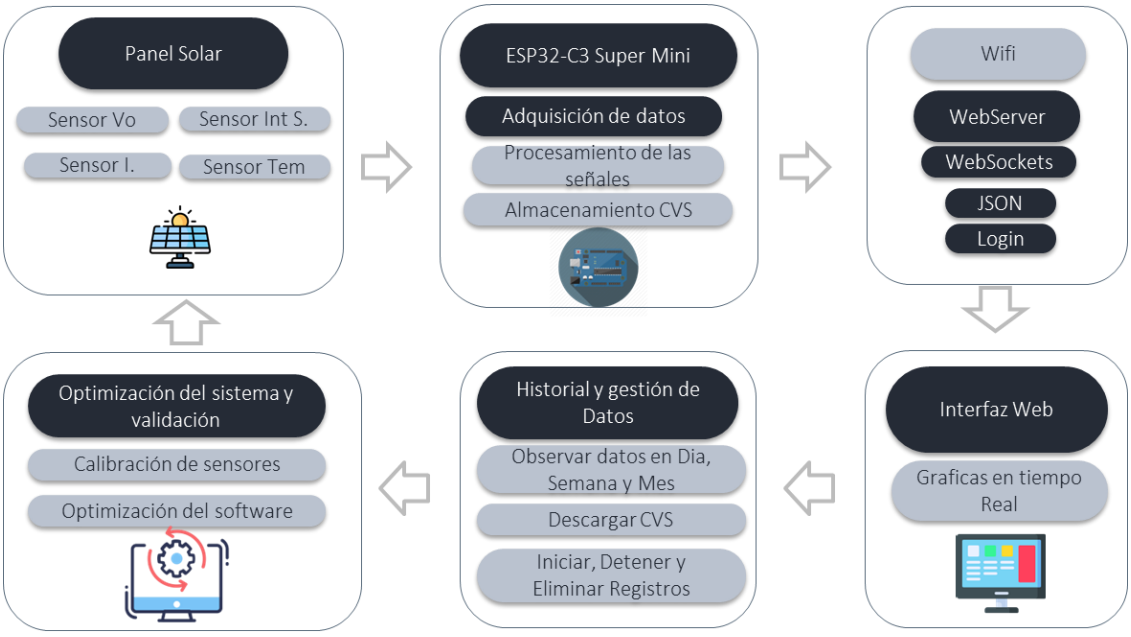

Figura 2. Metodología de la investigación.

3.1 ESP32-C3 Super Mini

La ESP32-C3 SuperMini es una placa de desarrollo mini IoT basada en el chip WiFi/Bluetooth de modo dual Espressif ESP32-C3. La ESP32-C3 es una CPU RISC-V de 32 bits que incorpora una unidad de coma flotante (FPU) para operaciones de precisión simple de 32 bits, proporcionando un potente poder de cómputo. El ESP32-C3 cuenta con módulos de conectividad inalámbrica integrados, compatibles con los estándares IEEE 802.11b/g/n para Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (LE) permitiendo la transmisión de datos a alta velocidad y su integración en redes locales o servicios en la nube. La placa cuenta con una antena externa que mejora la intensidad de la señal en aplicaciones inalámbricas. Además, tiene un factor de forma pequeño y delicado, combinado con un diseño de montaje superficial de una sola cara. Está equipada con una gran cantidad de interfaces, incluyendo 11 entradas/salidas digitales que pueden utilizarse como pines PWM y 4 entradas/salidas analógicas que pueden emplearse como pines ADC. Admite cuatro interfaces seriales: UART, I2C y SPI[24].

Tabla 1. Especificaciones Técnicas del ESP32-C3 Super Mini

Item	**Especificaciones**
CPU	ESP32-C3, 32-bit RISC-V single-core processor 160 MHz
Flash	4 MB
SRAM	400 kB SRAM
Buttons	Boteo, Reseteo
Interfaces	1×I2C, 1×SPI, 2×UART, 11×GPIO (PWM), 4×ADC, Wi-Fi, Bluetooth 5.0
Voltaje de trabajo	2.7 V – 3.6 V
Consumo	Modo de sueño profundo: 43 μA
Dimensiones	22.52 × 18 mm
Temperatura de trabajo	-40 °C ~ +85 °C

Cada pin de este microcontrolador puede ser programado para la aplicación que se desee mientras la configuración de este lo permita. La Figura 2 muestra

la configuración de pines del microcontrolador y la Tabla 1 la conexión de los pines con cada sensor.

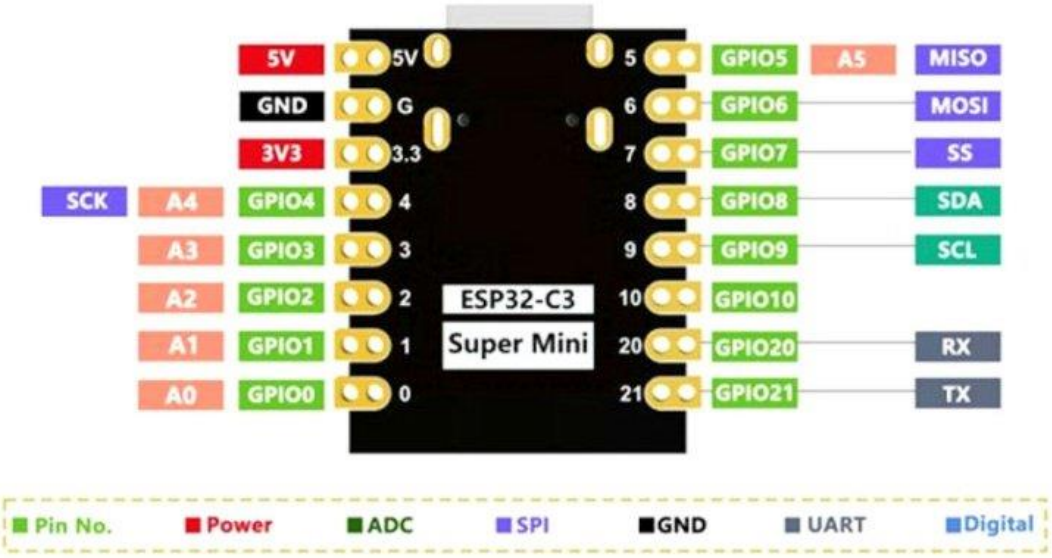

Figura 3. Mapa de pines del ESP32-C3 Super Mini

Tabla 2. Distribución de Pines del Esp32 C3 Super Mini

Pin	Componente	Descripción
2	Sensor de Irradiancia	Entrada analógica para medición de irradiancia.
3	Sensor de Corriente	Entrada analógica para medición de corriente.
4	Sensor de Voltaje	Entrada analógica para medición de voltaje.
10	Sensor de Temperatura	Comunicación 1-Wire con el sensor DS18B20.
8	Indicador LED	Control visual del estado del sistema.

Con las características mencionadas, la ESP32-C3 SuperMini se posiciona como una placa de desarrollo mini IoT de alto rendimiento, bajo consumo y costo eficiente para aplicaciones de baja potencia y aplicaciones inalámbricas portátiles. Es, además, compatible con el entorno de desarrollo Arduino IDE, que permite un proceso de programación más accesible y eficiente, y dispone de bibliotecas específicas para la gestión de redes Wi-Fi, manejo de sensores y protocolos de comunicación como WebSocket y JSON.

En este proyecto, el microcontrolador fue configurado en modo estación (STA), permitiendo la conexión a una red Wi-Fi existente con acceso a internet. Esto habilita funcionalidades como sincronización de tiempo mediante NTP y comunicación en tiempo real con clientes mediante un servidor web basado en WebSocket y JSON. Asimismo, se emplearon estrategias de optimización energética, como la desconexión de módulos no esenciales durante períodos de inactividad. [26]

3.2 Sensores

El microcontrolador ESP32-C3 Super Mini incluye entradas ADC de 12 bits con un rango de lectura de 0 a 3.3 V, lo que permite una resolución máxima de 4095 pasos digitales. Sin embargo, el ADC interno de esta familia compara los valores de entrada con un voltaje de referencia interno de 1100 mV. Por este motivo, cuando se requieren mediciones de voltajes superiores, es necesario aplicar una atenuación a la señal de entrada. El ESP32-C3 permite seleccionar entre cuatro configuraciones de atenuación, ajustando el rango máximo medible según la tabla 2 [27].

Tabla 3. Rango de voltaje que puede ser medido en dependencia de la atenuación seleccionada.

Atenuación (dB)	**Rango de voltaje que puede ser medido**
0	0 mV ~ 750 mV
2.5	0 mV ~ 1050 mV
6	0 mV ~ 1300 mV
11	0 mV ~ 2500 mV

Para este proyecto, se seleccionó una atenuación de 11 dB, permitiendo medir voltajes de hasta 2.5 V. Es importante garantizar que las salidas de los sensores no superen este rango, ya que cualquier valor mayor podría saturar el ADC y generar datos erróneos. Por esta razón, se diseñaron circuitos específicos para adaptar las señales de cada sensor al rango permitido.

3.2.1 Reducción de Ruido y Calibración

Los ADC de la familia ESP32-C3 presentan ciertas limitaciones inherentes, como ruido y no linealidad, que pueden comprometer la precisión de las mediciones analógicas. Estos problemas suelen ser causados por fluctuaciones en la alimentación y el ruido eléctrico de los circuitos.

Para mitigar estos inconvenientes se emplearon capacitores de desacoplo de 0.1 µF en las entradas analógicas, ayudando a filtrar las fluctuaciones de alta frecuencia y estabilizar las señales de los sensores. Además de esto se implementó un promediado de múltiples muestras, reduciendo el impacto del ruido aleatorio. A continuación, se muestra un ejemplo del código utilizado para tomar lecturas promediadas:

```
float readAnalog(uint8_t pin) {
   float adc_value = 0;
   for (int i = 0; i < FILTER; i++) {
      adc_value += analogReadMilliVolts(pin); // Lectura calibrada en mV
   }
   return adc_value / FILTER; // Promedio de las muestras
}
```

Para garantizar lecturas precisas se utilizó la función analogReadMilliVolts() proporcionada por el SDK de Espressif, que retorna valores calibrados en milivoltios. Este proceso de calibración considera los valores de referencia internos del microcontrolador, corrigiendo las desviaciones introducidas por la no linealidad del ADC [27].

3.2.2 Monitoreo de la Fuente de 3.3 V

El correcto funcionamiento de los sensores depende directamente de la estabilidad del voltaje de alimentación (3.3 V) proporcionado por el ESP32-C3. Variaciones pequeñas en esta fuente pueden traducirse en errores significativos en las lecturas. Para abordar esta problemática se implementó un divisor de voltaje compuesto por dos resistencias de 220 kΩ, permitiendo monitorizar continuamente la fuente de alimentación sin afectar el consumo global del sistema. Se añadieron, además, capacitores de 0.1 µF en paralelo

con el divisor de voltaje, mejorando la respuesta ante fluctuaciones transitorias.

La configuración de este divisor se representa en el siguiente esquema, y el código asociado a su lectura se muestra a continuación:

```
float readSupplyVoltage() {
  float voltage = 0;
  for (int i = 0; i < FILTER; i++) {
    voltage += analogReadMilliVolts(PIN_33); // PIN_33 conectado al divisor
  }
  return (voltage / FILTER) * ((220000.0 + 220000.0) / 220000.0); // Ajuste del divisor
}
```

La elección de resistencias de 220 kΩ se debe a la necesidad de minimizar el consumo de corriente adicional, manteniendo al mismo tiempo una alta precisión en la división del voltaje. La configuración del divisor de voltaje se conecta directamente al pin de 3.3 V y al pin 1 de entrada analógica del microcontrolador como se observa en la Figura 3.

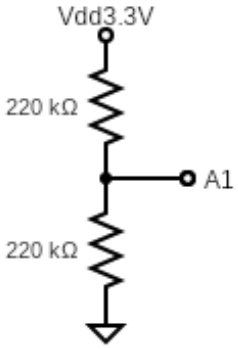

Figura 4. Divisor de voltaje del pin de alimentación de 3.3V

3.2.3 Sensor de Voltaje

El sensor de voltaje utilizado en este proyecto se diseñó para medir el rango de voltajes del panel fotovoltaico, que alcanza hasta 48 V, y convertirlo en un rango legible por el microcontrolador ESP32-C3. Para lograrlo, se empleó un divisor de voltaje junto con un amplificador operacional en configuración de seguidor.

3.2.3.1 Circuito de Medición

El circuito implementado consta de un divisor resistivo y un amplificador operacional MCP6002 configurado como seguidor de voltaje. Este diseño asegura una alta precisión y estabilidad en las mediciones al minimizar las interferencias externas y mejorar la impedancia de entrada.

- Divisor de Voltaje: Se emplearon dos resistencias de alta precisión de 220 kΩ y 12.2 kΩ, las cuales reducen el voltaje de entrada del panel fotovoltaico a un nivel adecuado para el ADC del ESP32-C3. Con esta configuración, un voltaje de entrada máximo de 48 V se escala a aproximadamente 2.52 V en la salida del divisor.
- Amplificador Operacional: Se utilizó el MCP6002[28], un amplificador operacional de bajo consumo con alta estabilidad. Su función como seguidor de voltaje permite mantener la integridad de la señal sin carga adicional sobre el divisor resistivo y aislar el microcontrolador del sistema fotovoltaico.
- Capacitor de Desacoplo: Se añadió un capacitor de 0.1 µF en paralelo a la salida del amplificador para filtrar el ruido de alta frecuencia, mejorando la estabilidad de la señal antes de ser procesada por el ADC del microcontrolador.

El circuito del divisor de voltaje se presenta en la Figura 4.

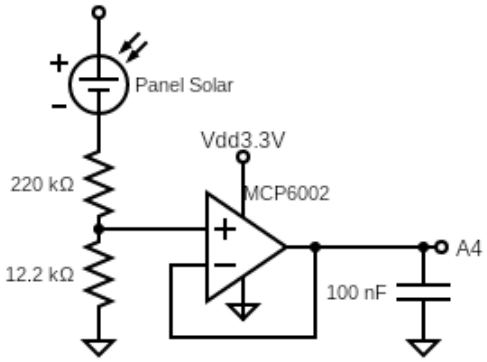

Figura 5. Circuito del divisor de voltaje

3.2.3.2 Cálculo de Voltaje

El cálculo del voltaje se basa en la relación resistiva del divisor. La salida Vs del divisor se determina mediante la fórmula:

$$V_s = V_{in} * R_2/(R_2 + R_1)$$

Donde:

- V_{in}: Voltaje de entrada desde el panel fotovoltaico.
- R_1: Resistencia de 220 kΩ.
- R_2: Resistencia de 12.2 kΩ.

Para un voltaje máximo de Vin=48 V se obtiene un valor de 2.52 V el cual se encuentra dentro del rango permitido por el ADC del ESP32-C3 Super Mini, configurado con una atenuación de 11 dB.

3.2.3.3 Implementación de Software

El siguiente fragmento de código muestra cómo se realiza la medición y el cálculo del voltaje en el microcontrolador:

```
#define VOL_PIN 4       // Pin del ADC conectado al sensor de voltaje
#define R1 220000.0     // Resistencia en ohmios
#define R2 12200.0      // Resistencia en ohmios

float readVoltage() {
   float adc_voltage = 0;

   // Promediar múltiples lecturas para mejorar precisión
   for (int i = 0; i < FILTER; i++) {
      adc_voltage += analogReadMilliVolts(VOL_PIN); // Lectura calibrada en mV
   }
   adc_voltage = adc_voltage / (1000.0 * FILTER); // Conversión a voltios

   // Escalar el voltaje según el divisor resistivo
   float input_voltage = adc_voltage * ((R1 + R2) / R2);
   return input_voltage;
}
```

3.2.3 Sensor de Corriente

El sensor de corriente utilizado en este proyecto es el ACS712ELCTR-30A-T, un dispositivo basado en el efecto Hall diseñado para medir corrientes continuas y alternas con alta precisión y aislamiento galvánico de hasta 2.1 kVrms. Este sensor genera una salida analógica proporcional a la corriente medida, lo que lo convierte en una excelente opción para sistemas de monitoreo como el implementado en este proyecto.

3.2.3.1 Circuito de Medición y Alimentación

Para garantizar la precisión y estabilidad del sistema, el sensor se configuró de la siguiente manera:

1. **Alimentación**:
    - El ACS712 se alimenta con **5 V** provistos por el Esp32 C3. Esto asegura una salida más precisa, eliminando las fluctuaciones detectadas en pruebas iniciales, donde se intentó alimentar con 3.3V.
    - Se incluyó un capacitor de desacoplo de **0.1 µF** en paralelo con los terminales de alimentación para filtrar ruidos de alta frecuencia y estabilizar la señal de alimentación.
2. **Divisor de Voltaje**:
    - La salida analógica del sensor, que puede alcanzar un máximo de 5 V (proporcional a una corriente de 30 A), se escala mediante un divisor resistivo compuesto por dos resistencias de **20 kΩ** cada una. Este divisor reduce la señal a la mitad, permitiendo que el rango máximo de salida sea de 2.5 V, adecuado para las entradas ADC del ESP32-C3.
3. **Amplificador Operacional**:

- La señal escalada pasa por un **MCP6002** configurado como un seguidor de voltaje. Esto asegura una baja impedancia de salida, manteniendo la precisión de la señal antes de ser procesada por el microcontrolador.

El circuito completo se muestra en la Figura 5, destacando las conexiones entre el ACS712, el divisor de voltaje, el amplificador operacional y el microcontrolador.

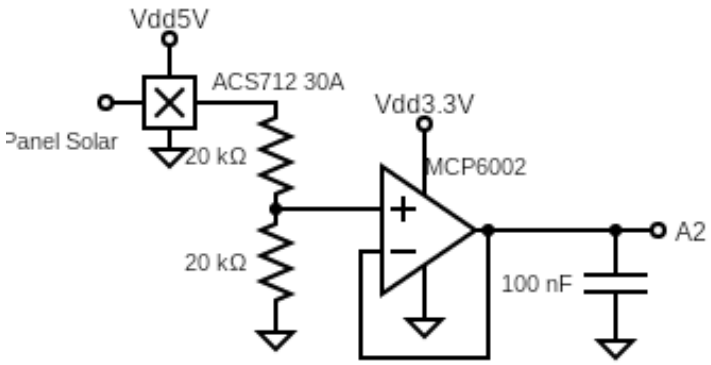

Figura 6. Circuito del divisor de voltaje del ACS712

El chip principal utilizado en este sensor es el ACS712ELCTR-30A-T. La Figura 6 muestra el diagrama de conexión del chip y al sensor.

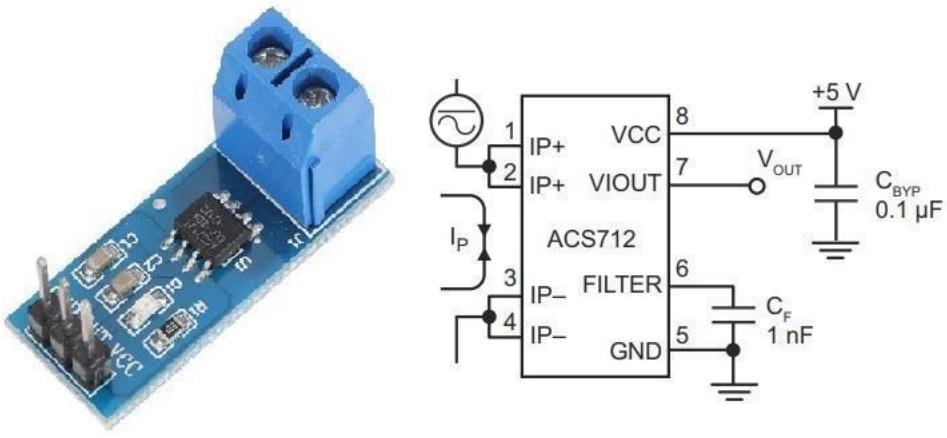

Figura 7. Placa del sensor y diagrama de conexión del ACS712ELECTR-30A-T[21]

3.2.3.2 Caracterización del Sensor

Dado que el factor de sensibilidad del ACS712 puede variar ligeramente entre unidades (típicamente 66 mV/A a 5 V de alimentación), se realizó una caracterización experimental. Para ello, se aplicó una corriente conocida de 1 A, obteniendo una sensibilidad real de 33 mV/A. Este valor fue incorporado en el cálculo de las corrientes medidas para garantizar la precisión de los datos.

3.2.3.3 Implementación en Software

El siguiente fragmento de código ilustra cómo se calcula la corriente utilizando las lecturas del ADC, incorporando las características del divisor resistivo y el factor de sensibilidad del sensor:

```
#define CURRENT_PIN 3      // Pin del ADC conectado a la salida del sensor de corriente
#define CURRENT_SEN 0.033 // Sensibilidad del sensor en V/A tras caracterización
#define R_DIV 2            // Factor del divisor de voltaje (1/2)

// Función para leer y calcular la corriente
float readCurrent() {
   float adc_voltage = 0;

   // Promediar múltiples lecturas para mejorar precisión
   for (int i = 0; i < FILTER; i++) {
      adc_voltage += analogReadMilliVolts(CURRENT_PIN);
   }
   adc_voltage = (adc_voltage / (1000.0 * FILTER)) * R_DIV; // Aplicar factor del divisor

   // Calcular corriente con base en el voltaje leído
   float current = (adc_voltage - 2.5) / CURRENT_SEN; // 2.5 V corresponde a corriente 0 A
   if (fabs(current) < 0.1) current = 0; // Filtrar valores cercanos a cero
   return current;
}
```

Explicación del código:

1. Se lee la salida del divisor de voltaje conectado al sensor.
2. Se aplica el factor del divisor R_DIV para escalar el valor leído.
3. Se calcula la corriente utilizando la ecuación:

$$I = (V_{adc} - 2.5)/sensibilidad$$

Donde 2.5 V es la salida del sensor cuando la corriente es cero.

3.2.4 Sensor de Temperatura

La medición de temperatura en este proyecto se realiza mediante el sensor DS18B20, un dispositivo robusto y de alta precisión diseñado para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y entornos industriales. Este sensor, encapsulado en acero inoxidable (Figura 8), es resistente al agua, humedad y corrosión, lo que lo convierte en una solución confiable para condiciones ambientales exigentes. Su encapsulado tiene dimensiones de 6 mm x 50 mm, con un cable de 1 metro que facilita su instalación en distintos entornos.

Características Técnicas del DS18B20

El sensor **DS18B20** destaca por las siguientes especificaciones técnicas:

- **Rango de medición**: -55°C a +125°C.
- **Precisión**: ±0.5°C dentro del rango de -10°C a +85°C.
- **Resolución**: Programable entre 9 y 12 bits.
- **Protocolo de comunicación**: 1-Wire, que permite una conexión simple con el microcontrolador utilizando un solo pin.
- **Memoria interna**: Cada sensor tiene un identificador único de 64 bits, lo que facilita su uso en configuraciones con múltiples sensores en paralelo.

Estas características permiten integrar el DS18B20 en una red de sensores, donde se pueden conectar varios dispositivos al mismo bus digital y dirigirlos individualmente mediante su identificador único [29].

3.2.4.1 Diseño del circuito de conexión

El DS18B20 se conecta al microcontrolador ESP32-C3 mediante el protocolo 1-Wire, utilizando una resistencia pull-up de 4.7 kΩ para mantener la línea de

datos en alto cuando no hay comunicación activa. La conexión incluye las siguientes características:

- Alimentación: El sensor es alimentado con 3.3 V, proveniente del microcontrolador, asegurando un bajo consumo de energía y compatibilidad con otros componentes del sistema.
- Filtro de ruido: Se colocó un capacitor de 0.1 µF en paralelo con la alimentación para filtrar ruidos eléctricos y mejorar la estabilidad de las mediciones.

El circuito de conexión se detalla en la Figura 7 [30].

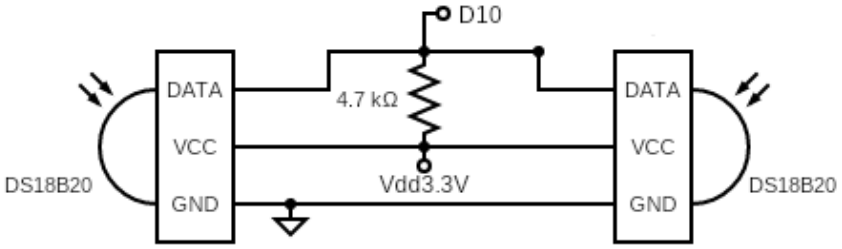

Figura 8. Configuración de instalación del sensor de temperatura DS18B20



Figura 9. Sensor de temperatura DS18B20 con encapsulado de acero

3.2.4.2 Implementación en Software

Para interactuar con el DS18B20, se emplean las bibliotecas **<OneWire>** y **<DallasTemperature>**, que simplifican la comunicación y la gestión de datos. Estas bibliotecas permiten detectar automáticamente los sensores conectados al bus, configurar la resolución y leer las temperaturas.

El siguiente fragmento de código muestra cómo se integra el sensor en el sistema:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 10 // Pin conectado al bus 1-Wire

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);    // Inicializa el bus 1-Wire
DallasTemperature sensors(&oneWire); // Crea el objeto de sensor

void setup() {
   Serial.begin(115200);
   sensors.begin();// Inicia la comunicación con los sensores
}

float obtainTemp(int pos) {
  float temp ;
  sensors.requestTemperatures(); // Lee la temperatura de todos los sensores

  temp= sensors.getTempCByIndex(pos); // Lee la temperatura del sensor
  return temp;
}
```

La lectura de la temperatura se realiza a través de la función getTempCByIndex(), la cual devuelve el valor en grados Celsius del sensor especificado por su índice. Además, el sensor DS18B20 ofrece la posibilidad de ajustar su resolución en un rango de 9 a 12 bits. Este ajuste permite balancear la precisión de las mediciones con la velocidad de lectura, otorgando flexibilidad para optimizar el desempeño del sistema según los requerimientos específicos de la aplicación.

3.2.5 Sensor de Radiación Solar

El diseño e implementación del sensor de radiación solar en este proyecto utiliza un resistor dependiente de luz (LDR) [31]como elemento clave para medir la intensidad luminosa. Este dispositivo varía su resistencia de manera inversamente proporcional a la cantidad de luz que incide sobre él. Para aprovechar esta propiedad, se implementó un circuito divisor de voltaje formado por una resistencia fija de 8 kΩ y el LDR, alimentados con un voltaje de 3.3 V proveniente del ESP32-C3. Este diseño garantiza que el voltaje de salida no exceda el rango máximo de 2.5 V permitido por el ADC del microcontrolador. Además, para mejorar la estabilidad de la señal, el divisor de voltaje se conecta a un amplificador operacional MCP6002 configurado en modo seguidor, cuya salida incluye un condensador de desacoplo de 0.1 µF para filtrar ruidos.

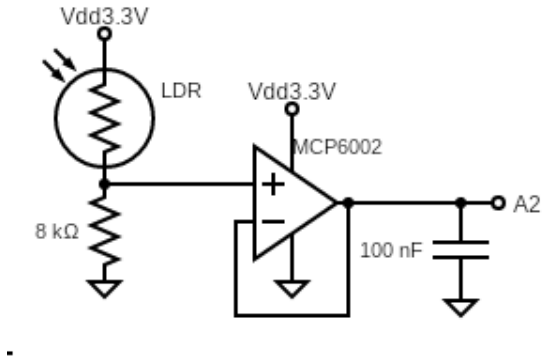

Figura 10. Diagrama de circuito del LDR

3.2.5.1 Caracterización del LDR

La caracterización del LDR se realizó utilizando un luxómetro profesional (Foot Candle/Luxmeter 407026 de Texas Instruments) para determinar la relación entre la resistencia del LDR y la intensidad luminosa en lux. Este proceso incluyó la medición de la resistencia del LDR en condiciones de iluminación que variaron desde oscuridad absoluta (0 lux) hasta luz solar directa (65,000 lux). Se obtiene que a medida que aumenta la intensidad luminosa, la resistencia del LDR disminuye como se observa en la Figura 10.

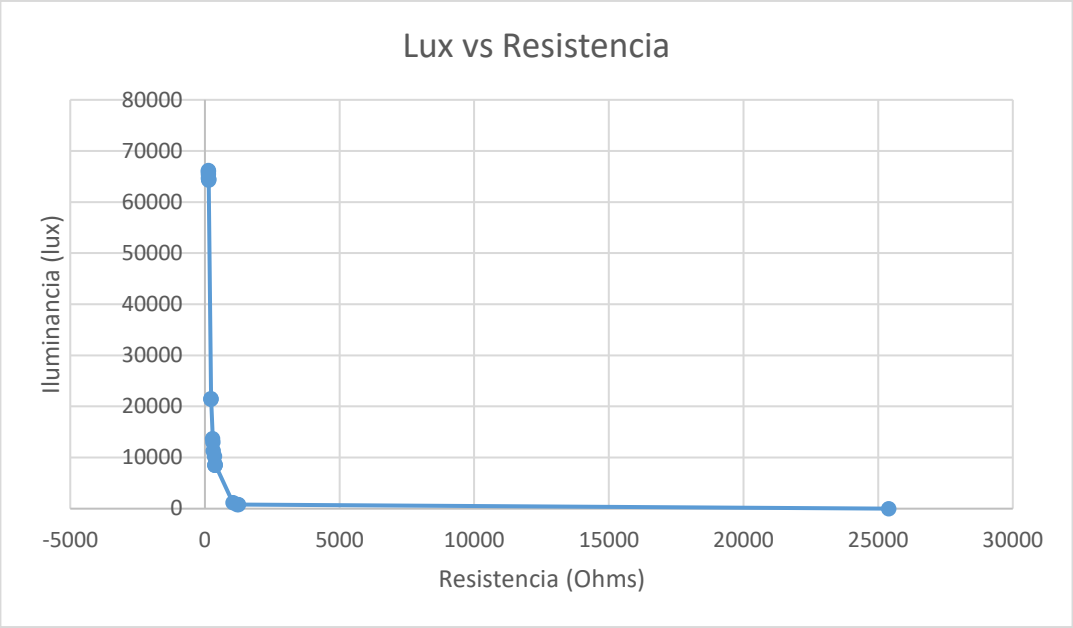

Figura 11. Grafica de lux vs Resistencia del LDR

Aunque la relación entre las variables analizadas exhibe un comportamiento exponencial negativo, la determinación de la función que describe este fenómeno resulta compleja. No obstante, mediante una transformación matemática adecuada, es posible obtener una aproximación lineal que facilita el análisis y la interpretación de los datos. Esta estrategia permite simplificar el tratamiento de la información sin comprometer significativamente la precisión de los resultados obtenidos[32].

Si se toma el logaritmo de ambas variables (iluminancia y resistencia) y luego se vuelve a graficar, se obtendrá una línea aproximadamente recta. En la Figura 11 se muestra la gráfica resultante de esta transformación.

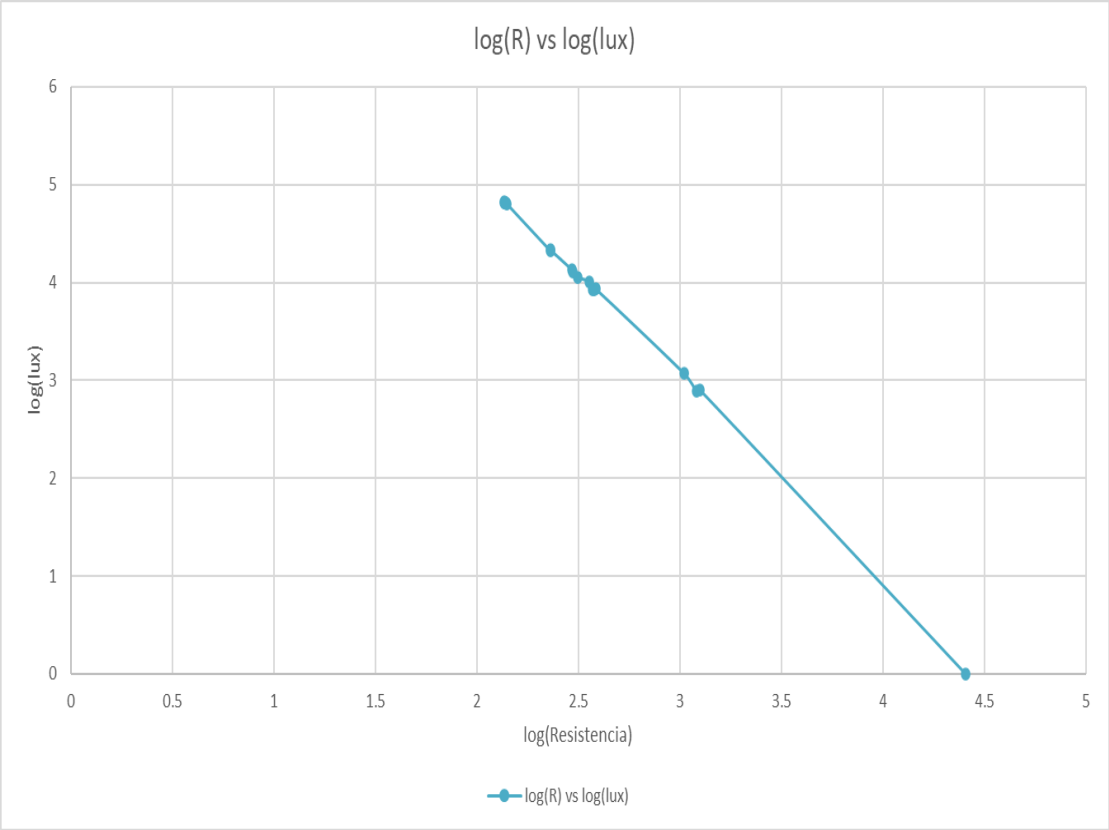

Figura 12. Log (Lux) vs Log (Resistencia)

Para facilitar el análisis y la interpretación de estos datos, se aplicó una transformación matemática logarítmica a las variables resistencia (R) e iluminancia (lux), obteniendo una relación lineal representada por la ecuación:

$$\log(lux) = -1.88 * \log(\mathrm{R}) + 1.6992 * 10^{11}$$

Esta ecuación fue obtenida ajustando una regresión lineal en Excel, utilizando los datos experimentales. A partir de esta expresión logarítmica, se derivó una ecuación que permite calcular directamente la iluminancia en función de la resistencia del LDR:

$$lux = 10^{-1.88*\log(R)+1.6992*10^{11}}$$

Aplicando algunas propiedades de los logaritmos para simplificar ambos lados obtenemos:

$$lux = 1.6992 * 10^{11} * R^{-1.88}$$

Con esta ecuación es posible calcular directamente la iluminancia en el sensor LDR a partir de su resistencia. Esta expresión facilitará el análisis y la interpretación de los datos obtenidos.

3.2.5.2 Conversión a Irradiancia Solar (W/m²)

Para traducir la intensidad luminosa en lux a irradiancia solar en W/m², se utilizó un factor de conversión de 0.0079, que representa una aproximación para el espectro de luz solar. Este factor se aplicó directamente en el código después de calcular los lux. La expresión final utilizada en el código ajusta el valor de lux para obtener una estimación precisa de la irradiancia solar, considerando que esta conversión es válida principalmente para condiciones de luz solar directa.

3.2.5.3 Implementación en Código

La relación obtenida de la caracterización se integró en el código del ESP32-C3 para calcular los lux en tiempo real. El microcontrolador lee el voltaje del LDR, calcula su resistencia utilizando la fórmula del divisor de voltaje y finalmente aplica la ecuación derivada para obtener la iluminancia en lux. A continuación, se presenta la función principal del cálculo:

```
#define LUX_CAL_SCALAR 169928662850
#define LUX_CALC_EXP -1.88664518158444

float obtainLux() {
  float temp;
  float refvol = 0;
  adc_ldr_Voltage = 0;

  // Lectura del voltaje en el LDR y del voltaje de referencia
  for (int i = 0; i < FILTER; i++) {
    adc_ldr_Voltage += analogReadMilliVolts(LUX_PIN);
    refvol += analogReadMilliVolts(PIN_33);
  }
  // Promediar valores para reducir ruido
  adc_ldr_Voltage = adc_ldr_Voltage / (1000.0 * FILTER); // Voltaje en el LDR
  refvol = 2 * refvol / (1000.0 * FILTER); // Voltaje de referencia
```

```
    // Cálculo de la resistencia del LDR
    ldrResistance = LUX_R1 * ((refvol / adc_ldr_Voltage) - 1);
    // Conversión de resistencia a lux utilizando la ecuación caracterizada
    temp = LUX_CAL_SCALAR * pow(ldrResistance, LUX_CALC_EXP);
    // Filtrado de valores no válidos
    if (isnan(temp) || isinf(temp) || temp < 0) {
        temp = 0; //En caso de error de calculo se toma que lux = 0
    }
    // Conversión final a W/m^2
    temp = temp * 0.0079; // Factor de conversión para irradiancia solar
    return temp;
}
```

3.3 Diseño del Sistema

El diseño del sistema desarrollado se centra en el uso del microcontrolador ESP32-C3 Super Mini para realizar la recopilación, procesamiento, almacenamiento y presentación de datos obtenidos por sensores. Este diseño combina hardware y software para proporcionar un monitoreo en tiempo real con funcionalidades avanzadas de almacenamiento y visualización histórica mediante una interfaz web. La implementación incluye características como comunicación bidireccional mediante WebSockets, manejo de datos en formato JSON, almacenamiento en memoria Flash y medidas de seguridad con autenticación basada en cookies y tokens de sesión. A continuación, se describe detalladamente cada aspecto del sistema.

3.3.1 Conexión del circuito y Resumen del Hardware

El sistema se construyó en una protoboard para facilitar pruebas y modificaciones, integrando los sensores y el ESP32-C3 según el diagrama mostrado en la figura 12. Este diseño se basa en la conexión eficiente de sensores mediante pines analógicos y digitales, alimentados desde las salidas de 3.3 V y 5 V del microcontrolador, complementadas con filtros de desacoplamiento para estabilidad. La conexión completa del hardware se presenta a continuación:

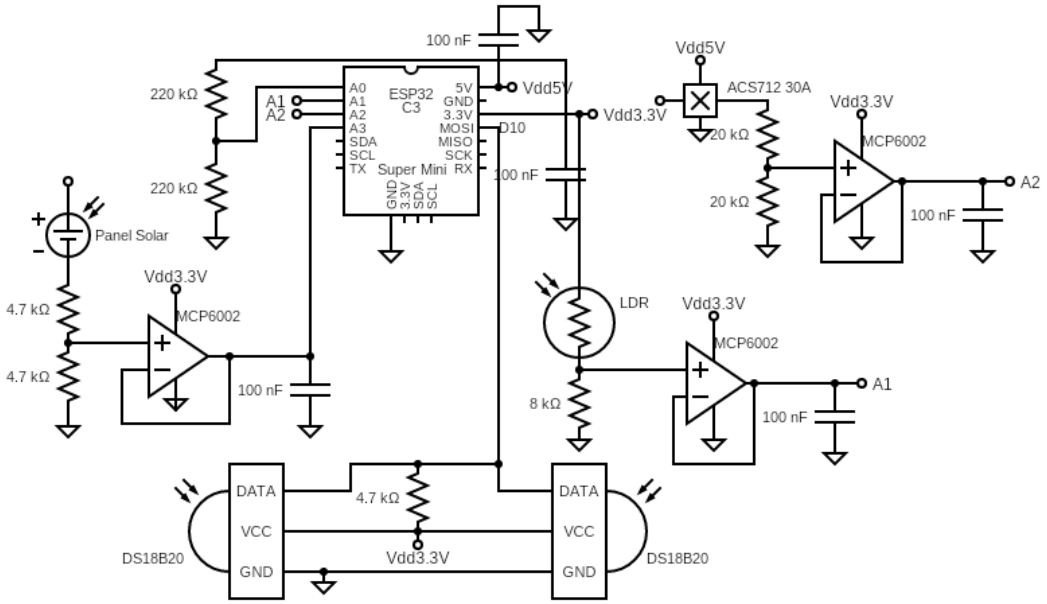

Figura 13. Diagrama de conexión

Todos los componentes del registrador de datos están ensamblados en una protoboard con fines de prueba y validación, como se ilustra en la figura 13.

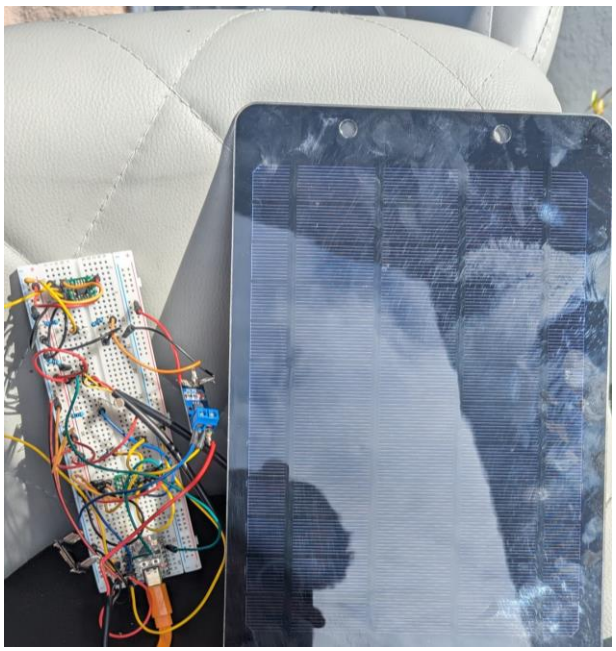

Figura 14. Diseño del circuito en el protoboard

Esta configuración permite una fácil modificación y prueba de los circuitos antes de su implementación final.

3.3.2 Funcionalidades del sistema web

El sistema web diseñado permite el monitoreo en tiempo real y el acceso a datos históricos desde cualquier dispositivo con capacidad WiFi. Estas funcionalidades se logran mediante un servidor web integrado en el ESP32-C3.

3.3.2.1 Configuración del servidor web

El servidor web implementado utiliza la librería ESPAsyncWebServer, que permite gestionar solicitudes HTTP de manera eficiente. El servidor ofrece varias rutas para acceder a diferentes funcionalidades:

- Ruta de Inicio de Sesión: /login.html
- Página Principal de Monitoreo: /webpage.html
- Descarga de Datos: /download
- Visualización de Datos Históricos: /historical.html

El siguiente fragmento de código muestra una parte de cómo se configuran las rutas del servidor:

```
// Ruta: Servir la pagina principal(protegida)
server.on("/", HTTP_GET, [&](AsyncWebServerRequest *request){
    String sessionToken = "";
    if(request->hasHeader("Cookie")){
        AsyncWebHeader* cookieHeader = request->getHeader("Cookie");
        String cookies = cookieHeader->value();
        int start = cookies.indexOf("session=");
        if(start != -1){
            int end = cookies.indexOf(";", start);
            if(end == -1){
                end = cookies.length();
            }
            sessionToken = cookies.substring(start + 8, end);
        }
    }

    if(validateSession(sessionToken)){
```

```
            request->send(SPIFFS, "/webpage.html", "text/html");
        }
        else{

            request->redirect("/login.html");
        }
    });
server.on("/login.html", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    request->send(SPIFFS, "/login.html", "text/html");
});


server.on("/download", HTTP_GET, [&](AsyncWebServerRequest *request) {
    if (validateSession(getSessionToken(request))) {
        request->send(SPIFFS, "/data.csv", "text/csv");
    } else {
        request->redirect("/login.html");
    }
});

server.on("/historical.html", HTTP_GET, [&](AsyncWebServerRequest *request) {
    if (validateSession(getSessionToken(request))) {
        request->send(SPIFFS, "/historical.html", "text/html");
    } else {
        request->redirect("/login.html");
    }
});
```

3.3.2.2 Comunicación Bidireccional: WebSockets

Para la actualización en tiempo real de los datos en la página web, se implementó la comunicación bidireccional utilizando WebSockets[33]. Este protocolo permite que el servidor envíe datos directamente al cliente sin que este tenga que realizar solicitudes continuas, optimizando la latencia y reduciendo la sobrecarga de comunicación. El servidor WebSocket está configurado para escuchar en el puerto 81. El siguiente código muestra cómo se manejan los eventos de conexión, mensajes recibidos y desconexiones:

```
webSocket.onEvent([](byte num, WStype_t type, uint8_t *payload, size_t length) {
    switch (type) {
        case WStype_CONNECTED:
            Serial.println("Cliente conectado: " + String(num));
            sendInitialData(num);
            break;
        case WStype_TEXT:
            handleClientMessage(payload, length);
```

```
            break;
        case WStype_DISCONNECTED:
            Serial.println("Cliente desconectado: " + String(num));
            break;
    }
});
```

La función sendInitialData() envía los datos iniciales al cliente al momento de conectarse, asegurando que la interfaz se sincronice inmediatamente con el servidor.

3.3.2.3 Manejo de Datos con JSON

Los datos que se envían entre el servidor y los clientes están estructurados en formato JSON utilizando la librería ArduinoJson. JSON (JavaScript Object Notation) es un formato de intercambio de datos ligero y fácil de leer/escribir tanto para humanos como para máquinas, ampliamente utilizado para transmitir datos estructurados a través de una red. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se envían los datos al cliente [34]:

```
void sendJsonArray(String l_type, int l_array_values[]) {
  String jsonString = "";

  const size_t CAPACITY = JSON_ARRAY_SIZE(ARRAY_LENGTH) + 100;

  StaticJsonDocument<CAPACITY> doc;

  JsonObject object = doc.to<JsonObject>();

  object["type"] = l_type;

  JsonArray value = object.createNestedArray("value");
  for(int i=0; i<ARRAY_LENGTH; i++) {
    value.add(l_array_values[i]);
  }
  serializeJson(doc, jsonString);

  webSocket.broadcastTXT(jsonString);
}
```

3.3.2.4 Gestión de Sesiones y Seguridad

El acceso al sistema está protegido mediante autenticación con usuario y contraseña. Tras un inicio de sesión exitoso, el servidor genera un **token de**

sesión que se almacena en una cookie del cliente. Este enfoque asegura que solo los usuarios autenticados puedan acceder a las páginas protegidas.

El manejo de sesiones se realiza mediante las siguientes funciones:

```
String generateSessionToken() {
  String token = "";
  for (int i = 0; i < 16; i++) {
    token += String(random(0, 16), HEX);
  }
  return token;
}

bool validateSession(String token) {
  for (int i = 0; i < sessionCount; i++) {
    if (sessionTokens[i] == token) {
      return true;
    }
  }
  return false;
}
```

3.3.3 Almacenamiento de Datos

Los datos de los sensores se almacenan en la memoria Flash del ESP32-C3 utilizando el sistema de archivos **SPIFFS**. Los valores se guardan en un archivo CSV cada 30 minutos, junto con marcas de tiempo obtenidas del servidor NTP.

1. **Obtención de la Hora**: La sincronización de tiempo se realiza al inicio del programa mediante el protocolo NTP:

```
configTime(GMT_OFFSET_SEC, DAYLIGHT_OFFSET_SEC, ntpServer);
```

2. **Guardado de Datos**: Los datos se agregan al archivo CSV en intervalos definidos:

```
void saveDataToCSV() {
  bool fileExists = SPIFFS.exists("/data.csv");
  File file = SPIFFS.open("/data.csv", FILE_APPEND);
  if (!file) {
    Serial.println("Failed to open file for writing");
    return;
  }
```

```
  if (!fileExists) {
    // Updated header with Date and Time
    file.println("Fecha,Tiempo,Temperatura 1(ºC),Temperatura
2(ºC),Voltaje(V),Corriente(A),Intensidad Solar(lux),Potencia(W)");
  }
    int i = ARRAY_LENGTH - 1;

    file.print(dates[i]);
    file.print(",");
    file.print(times[i]);
    file.print(",");
    file.print(sens_vals_temp1[i]/10.0);
    file.print(",");
    file.print(sens_vals_temp2[i]/10.0);
    file.print(",");
    file.print(sens_vals_vol[i]/100.0);
    file.print(",");
    file.print(sens_vals_curr[i]/100.0);
    file.print(",");
    file.print(sens_vals_lux[i]/10);
    file.print(",");
    file.println(sens_vals_pow[i]/100.0);


  file.close();
  Serial.println("Data saved to CSV with individual timestamps");
}
```

3. **Descarga y Eliminación de Archivos**: El archivo CSV se puede descargar desde la página web o eliminar según sea necesario:

```
SPIFFS.remove("/data.csv");
```

En la figura 14 se puede ver un fragmento del archivo CVS generado por el microcontrolador:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Fecha	Tiempo	Temperati	Temperati	Voltaje(V)	Corriente(	Intensidac	Potencia(W)
2	11/23/2024	13:43:17	20.1	19.9	5.81	0.6	972	3.51
3	11/23/2024	13:43:47	20.1	19.9	5.92	1.67	950	9.91
4	11/23/2024	13:44:17	20.1	19.9	5.91	1.93	970	11.39
5	11/23/2024	13:44:47	20.2	19.9	5.86	2.15	936	12.62
6	11/23/2024	13:45:54	20.2	20.1	5.77	0	936	0
7	11/23/2024	13:46:24	20.3	20.2	5.76	0	941	0
8	11/23/2024	13:46:54	20.2	20.1	5.73	0.58	950	3.32
9	11/23/2024	13:47:24	20.2	20.2	5.74	1.64	966	9.42
10	11/23/2024	13:47:54	20.1	20.1	5.75	2.01	952	11.58
11	11/23/2024	13:48:24	20.2	20.3	5.76	2.03	953	11.7
12	11/23/2024	13:48:54	20.2	20.3	5.75	2.34	955	13.48
13	11/23/2024	13:49:24	20.3	20.4	5.73	2.14	961	12.26
14	11/23/2024	13:49:54	20.4	20.5	5.73	2.26	965	12.93
15	11/23/2024	13:50:24	20.6	20.6	5.74	2.15	961	12.33
16	11/23/2024	13:50:54	20.6	20.7	5.74	2.12	966	12.15
17	11/23/2024	13:51:24	20.6	20.6	5.76	2.18	967	12.55
18	11/23/2024	13:51:54	20.5	20.6	5.77	2.17	963	12.5
19	11/23/2024	13:52:24	20.3	20.4	5.76	2.2	966	12.7
20	11/23/2024	13:52:54	20.1	20.2	5.77	2.28	965	13.15
21	11/23/2024	13:53:24	19.9	20.1	5.79	2.28	969	13.19

Figura 15. Fragmento de archivo CVS

3.3.4 Visualización de Datos Históricos

La visualización de datos históricos constituye un elemento crucial del sistema, permitiendo a los usuarios analizar el comportamiento de las variables medidas en períodos previos. Esta funcionalidad ha sido diseñada para ofrecer una experiencia interactiva, clara y accesible, tanto desde dispositivos móviles como desde computadoras.

3.3.4.1 Procesamiento y Respuesta del Servidor

El sistema utiliza el archivo data.csv almacenado en la memoria SPIFFS del ESP32 para generar los datos históricos. Este archivo se actualiza automáticamente cada 30 minutos con las mediciones más recientes, incluyendo fecha, hora y valores de las variables. Cuando un usuario solicita datos históricos, el servidor procesa el archivo para calcular promedios en los intervalos correspondientes al rango temporal solicitado. Este procesamiento se realiza utilizando agrupaciones en *bins*, que permiten organizar los datos en intervalos definidos para su posterior representación gráfica.

El resultado de este procesamiento se envía al cliente en formato JSON. Este formato permite una transferencia eficiente y una integración directa con la biblioteca Chart.js utilizada para la visualización. A continuación, se muestra una parte del código que procesa los datos para obtener los datos históricos:

```
String getHistoricalData(String period) {
  // Open the CSV file
  File file = SPIFFS.open("/data.csv", "r");
  if (!file) {
    Serial.println("Failed to open file for reading");
    return "{}";
  }

  time_t now;
  time(&now);

  int intervalSeconds;
  int numBins;
  if (period == "day") {
    numBins = 48;
    intervalSeconds = 30 * 60;
  } else if (period == "week") {
    numBins = 168;
    intervalSeconds = 60 * 60
  } else if (period == "month") {
    numBins = 720;
    intervalSeconds = 60 * 60;
  } else {

    numBins = 48;
    intervalSeconds = 30 * 60;
  }

  time_t startTime = now - (numBins * intervalSeconds);

  float temp1Sums[numBins] = {0};
  float temp2Sums[numBins] = {0};
  float voltageSums[numBins] = {0};
  float currentSums[numBins] = {0};
  float luxSums[numBins] = {0};
  float powerSums[numBins] = {0};
  int binCounts[numBins] = {0};

  const size_t capacity = JSON_ARRAY_SIZE(numBins) * 7 + 200;
  DynamicJsonDocument doc(capacity);
  JsonArray timestampsArray = doc.createNestedArray("timestamps");
  JsonArray temp1Array = doc.createNestedArray("temp1");
  JsonArray temp2Array = doc.createNestedArray("temp2");
```

```
    JsonArray voltageArray = doc.createNestedArray("voltage");
    JsonArray currentArray = doc.createNestedArray("current");
    JsonArray luxArray = doc.createNestedArray("lux");
    JsonArray powerArray = doc.createNestedArray("power");

    for (int i = 0; i < numBins; i++) {
      time_t t = startTime + i * intervalSeconds;
      struct tm *tm_info = localtime(&t);
      char buffer[20];
      strftime(buffer, 20, "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tm_info);
      timestampsArray.add(String(buffer));
}
```

3.3.4.2 Interfaz de Usuario

La interfaz gráfica de la página de datos históricos está dividida en dos áreas principales. En la parte superior, el usuario encuentra botones que permiten seleccionar el rango temporal a consultar, como el último día, la última semana o el último mes. Cada opción ajusta automáticamente el nivel de detalle, agrupando los datos en intervalos de 30 minutos, 1 hora o **6 horas,** respectivamente.

Debajo de esta sección se presentan cinco gráficos interactivos, uno para cada variable monitoreada: temperatura, voltaje, corriente, irradiancia solar y potencia. Cada gráfico muestra la evolución temporal de los datos, con escalas ajustadas y colores diferenciados para facilitar la interpretación.

3.3.5 Páginas Web del Sistema

El diseño web del sistema fue concebido para ser responsivo, permitiendo su correcto funcionamiento tanto en computadoras de escritorio como en dispositivos móviles. Las páginas están organizadas en varias secciones, cada una optimizada para la visualización y manipulación de datos.

3.3.5.1 Página de Inicio de Sesión

La página de inicio de sesión (login.html) es la primera interfaz que encuentran los usuarios al acceder al sistema. Aquí, los usuarios deben introducir sus credenciales para autenticarse. En caso de autenticación exitosa, se redirige a la página principal de monitoreo.

Características principales:

- Autenticación segura mediante cookies.
- Notificaciones en caso de error de credenciales.

Se presenta un fragmento de la página web y captura de pantalla de su visualización:

```
</head>
<body>
    <div class="login-container">
        <h2>Login</h2>
        <div class="error-message" id="error-message">Usuario o contraseña
inválidos.</div>
        <form id="login-form">
            <!-- Etiquetas para Accesibilidad -->
            <label for="username">Usuario:</label>
            <input type="text" id="username" name="username" placeholder="Usuario"
required>

            <label for="password">Contraseña:</label>
            <input type="password" id="password" name="password"
placeholder="Contraseña" required>

            <button type="submit">Login</button>
        </form>
        <!-- Indicador de Carga (Opcional) -->
        <div class="loading" id="loading" style="display: none;">
            Cargando...
        </div>
    </div>
</head>
```

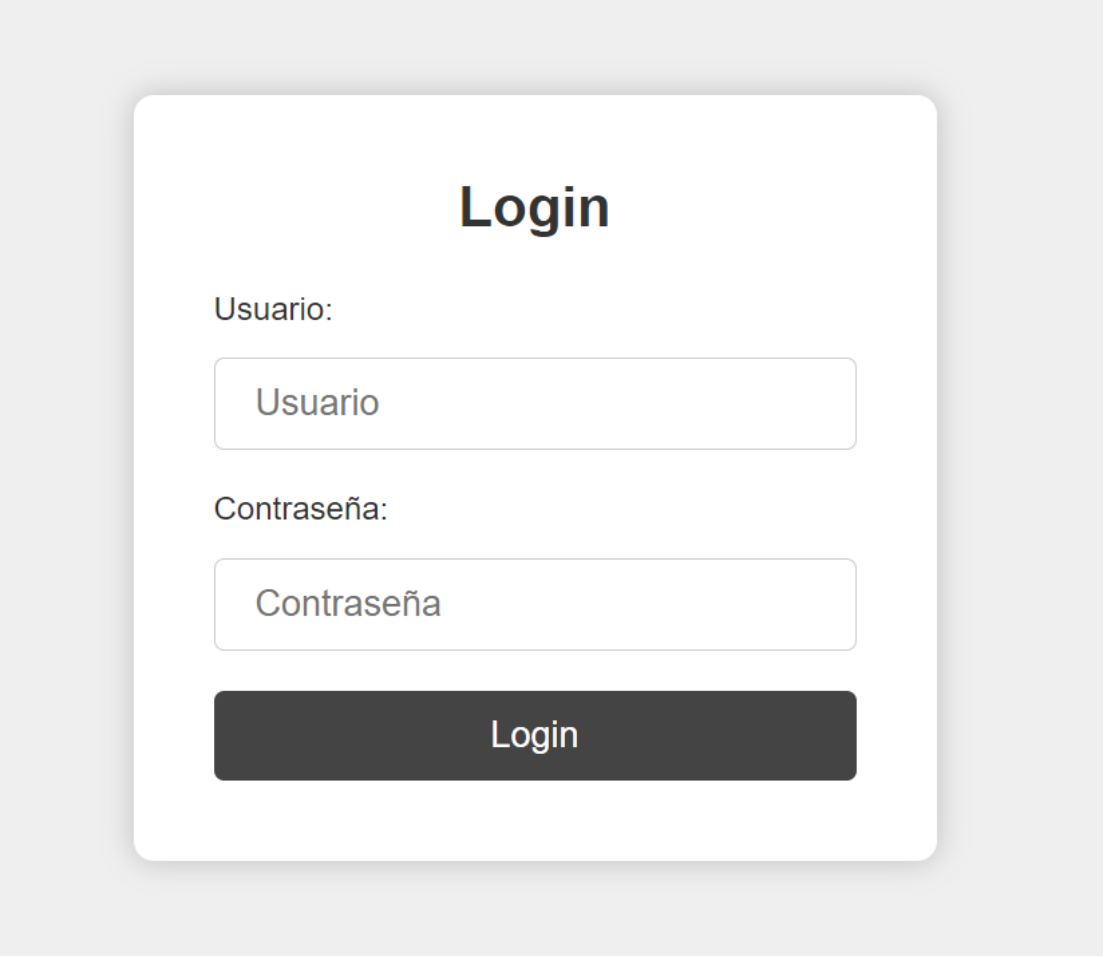

Figura 16. Página web de login

3.3.5.2 Página de Monitoreo en Tiempo Real

La página principal del sistema, denominada webpage.html, está diseñada para mostrar los datos recolectados por los sensores en tiempo real de forma clara e interactiva. Este diseño combina gráficos dinámicos, tablas de datos y controles intuitivos para ofrecer al usuario una experiencia completa de monitoreo y gestión del sistema.

La página principal está dividida en varias secciones como se puede ver en la figura 16. El encabezado de la página muestra información esencial como la fecha y hora actuales, sincronizadas con el servidor NTP. Esto asegura que las mediciones visualizadas estén contextualizadas en el tiempo, facilitando la

interpretación de los datos. La página muestra gráficos interactivos para cada una de las variables monitoreadas: Temperatura, Voltaje, Corriente, Irradiancia Solar y un extra de la Potencia generada que se puede obtener teniendo el voltaje y la corriente. Estos gráficos son generados utilizando Chart.js, una biblioteca de gráficos que permite interacciones dinámicas como la actualización en tiempo real y la capacidad de resaltar puntos específicos en los datos.

La página incluye además botones funcionales para:

- Iniciar Guardado: Comienza a registrar las mediciones en el archivo data.csv a intervalos regulares.
- Detener Guardado: Pausa el registro de datos.
- Borrar CSV: Elimina el archivo de datos almacenado en la memoria SPIFFS.
- Descargar CSV: Permite al usuario descargar los datos registrados en formato CSV para su análisis externo.
- Salir de sección.
- Ver Datos Históricos: Permite al usuario acceder a la página donde podrá ver los datos guardados en el fichero CVS

Estos controles están implementados mediante eventos de WebSocket, lo que asegura una comunicación bidireccional eficiente entre el cliente y el servidor.

Interacción en Tiempo Real

El sistema utiliza **WebSocket** para transmitir datos en tiempo real desde el servidor ESP32 al cliente. Los datos se envían en formato JSON, lo que permite una integración directa con los gráficos y tablas de la página. A continuación, un ejemplo de manejo de mensajes de WebSocket:

```
Socket.onmessage = function(event) {
  const data = JSON.parse(event.data);
  if (data.type === "temperature") {
```

```
        updateChart(temperatureChart, data.values);
    } else if (data.type === "voltage") {
        updateChart(voltageChart, data.values);
    }
};
```

Los datos se envían cada 5 segundos desde el servidor, lo que garantiza una visualización casi en tiempo real. Cada gráfico y tabla en la página se actualiza de forma dinámica sin necesidad de recargar la página, proporcionando al usuario una experiencia fluida.

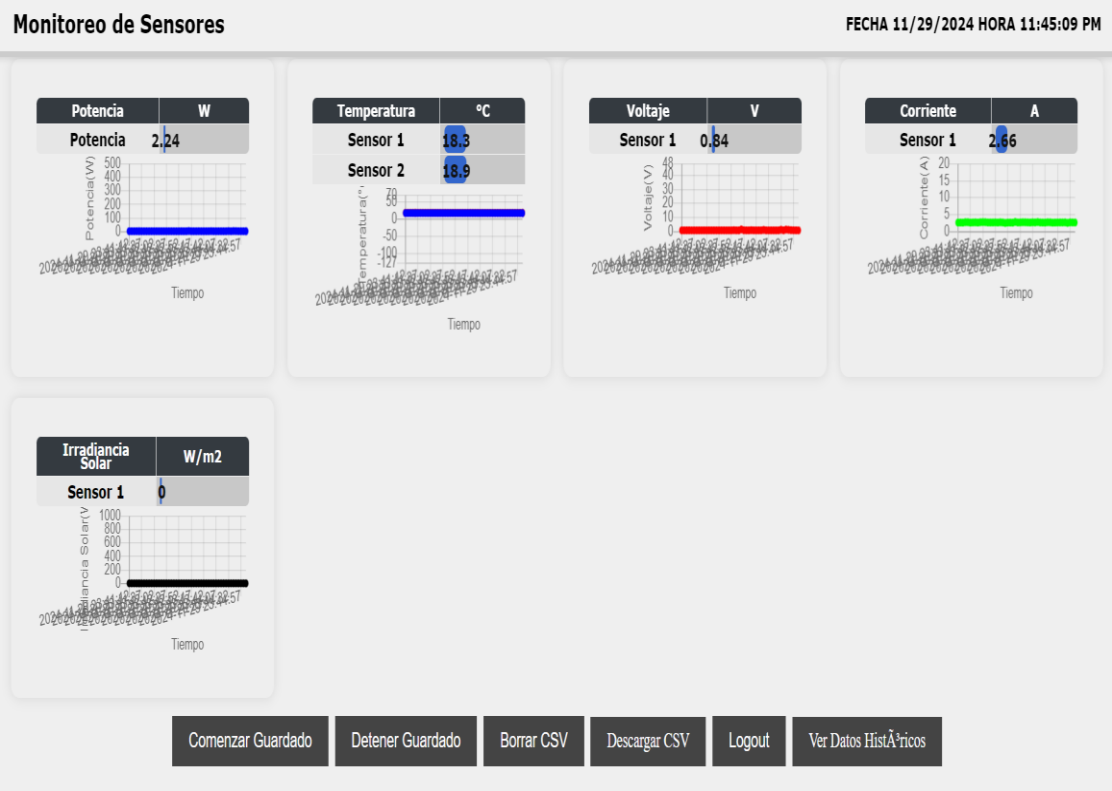

Figura 17. Portal Web

3.3.5.3 Página de Datos Históricos

La página de datos históricos (**historical.html**) permite a los usuarios explorar información recolectada durante el último día, semana o mes. Los datos se presentan en gráficos que permiten analizar tendencias y patrones.

Funciones Destacadas:

- Botones para seleccionar el rango de datos (día, semana, mes).

- Gráficos adaptativos para cada variable con respuesta a interacción del usuario al clic de cada punto de la gráfica.
- Tiempo ajustable según el rango seleccionado.

El siguiente fragmento de código muestra cómo se solicitan los datos al ESP32 C3 Super Mini:

```
function fetchHistoricalData(period) {
        var xhr = new XMLHttpRequest();
        xhr.open('GET', '/historical?period=' + period, true);
        xhr.setRequestHeader('Content-Type', 'application/json');
        xhr.onload = function() {
          if (xhr.status === 200) {
            var data = JSON.parse(xhr.responseText);
            updateCharts(data);
            console.log('Data received:', data);
          } else {
            console.error('Failed to fetch historical data.');
          }
        };
        xhr.send();
      }
```

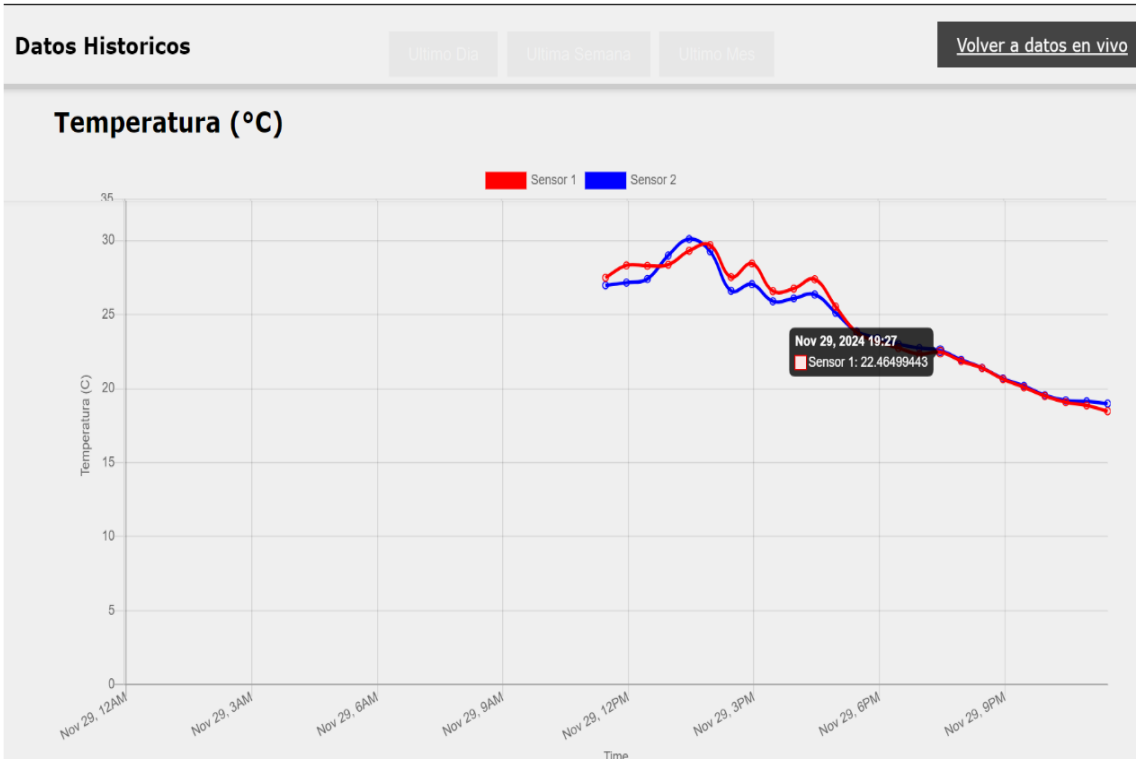

Figura 18. Vista del comportamiento de la temperatura en la página de Datos Históricos

3.3.5.5 Compatibilidad con Dispositivos Móviles

Para garantizar una experiencia de usuario fluida en dispositivos móviles, se aplicaron reglas de diseño responsivo utilizando CSS:

```
@media (max-width: 500px) {
    .login-container {
        padding: 30px;
    }
    .login-container h2 {
        font-size: 24px;
    }
    .login-container input[type="text"],
    .login-container input[type="password"],
    .login-container button {
        font-size: 16px;
        padding: 10px 15px;
    }
    .error-message {
        font-size: 14px;
    }
```

```
    .loading {
        font-size: 14px;
    }
}
```

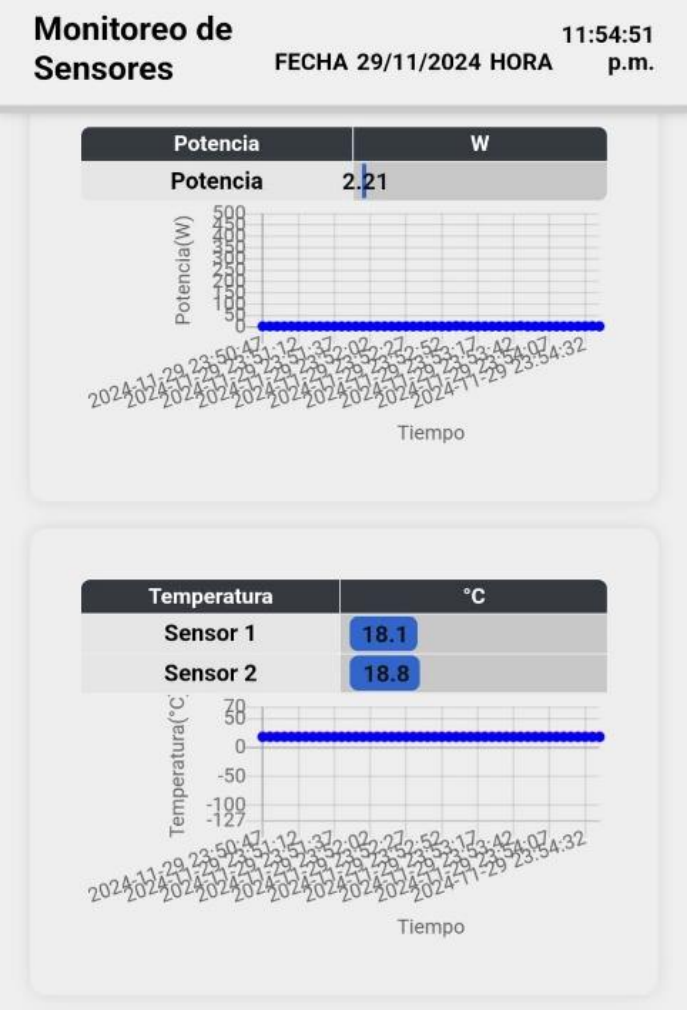

Figura 19. Captura de la página web en un celular

Capítulo 4: Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan y analizan en profundidad los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de data logger basado en IoT utilizando el microcontrolador ESP32-C3 Super Mini. Se evalúan aspectos clave como la precisión de los sensores, la estabilidad de la conexión Wi-Fi, la eficiencia en la recopilación y visualización de datos, y el análisis de costos en comparación con soluciones comerciales existentes. Además, se discuten las implicaciones de estos resultados en el contexto de la sustentabilidad energética y el Internet de las Cosas (IoT), así como las potencialidades futuras del sistema desarrollado.

4.1 Implementación del Data Logger

El sistema de data logger fue ensamblado según el diseño propuesto en la metodología. Se integraron los sensores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia solar con el microcontrolador ESP32-C3 Super Mini en una protoboard, permitiendo ajustes y calibraciones precisas.

4.2 Pruebas de Funcionamiento

Se realizaron diversas pruebas para evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones controladas y reales. Estas pruebas se centraron en la verificación de la precisión de los sensores, la estabilidad de la conexión Wi-Fi, la eficiencia en la recopilación y almacenamiento de datos, y la funcionalidad de la plataforma web para la visualización de los datos.

4.2.1 Precisión de los sensores y análisis de datos

Cada sensor del sistema fue calibrado y validado para asegurar la precisión de las mediciones. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada tipo de sensor:

- Sensor de Voltaje: La precisión y consistencia del sensor de voltaje son fundamentales para el monitoreo efectivo del sistema fotovoltaico. Para evaluar su comportamiento, se analizaron las lecturas obtenidas por el data logger durante un periodo nocturno, específicamente entre las 22:00 y las 22:30 horas del 24 de mayo de 2025. Durante este intervalo, la irradiancia solar registrada por el sistema fue nula, indicando la ausencia de generación fotovoltaica y, por ende, se esperaría un voltaje de circuito abierto bajo y estable en el panel.

  La Figura 19 presenta una vista detallada de la evolución del voltaje medido por el sistema durante este periodo nocturno. El voltaje fluctuó principalmente entre 0.09 V y 0.20 V. El valor promedio del voltaje durante este intervalo fue de 0.136 V, con una desviación estándar de 0.030 V. La variación absoluta máxima observada fue de 0.110 V.

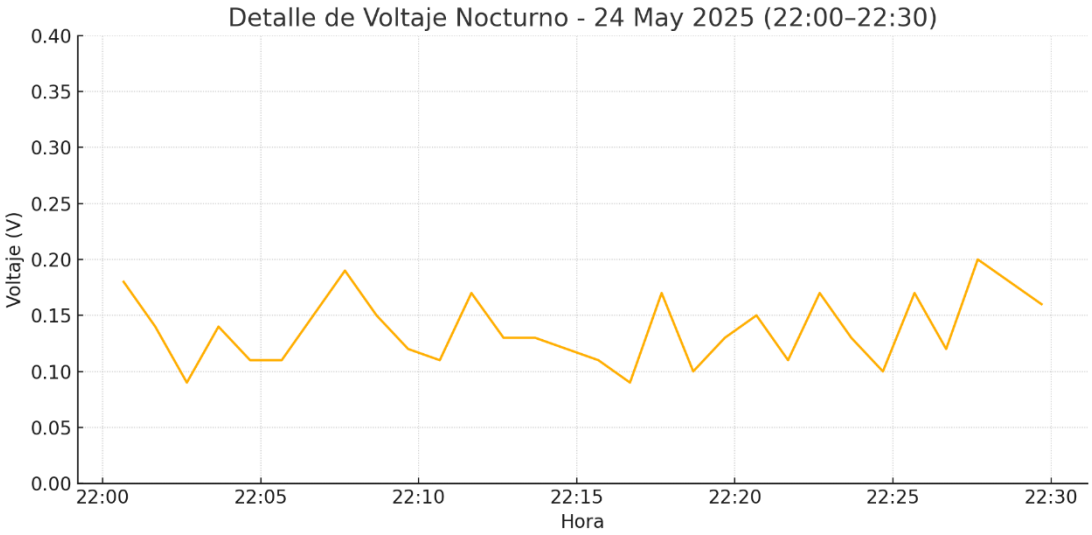

Figura 20. Detalle de las fluctuaciones del voltaje medido durante el periodo nocturno del 24 de mayo del 2025 (22:00 - 22:30), con escala ajustada para visualizar la variabilidad a bajo nivel.

Para contextualizar estas fluctuaciones en relación con el rango operativo total del sistema, la Figura 20, muestra los mismos datos nocturnos, pero con el eje vertical escalado al rango máximo de medición del sensor de voltaje (0-48 V). Como se puede apreciar en esta segunda gráfica, las variaciones observadas durante la noche son mínimas y se encuentran muy cerca del límite inferior de detección cuando se consideran en la escala completa de operación del panel.

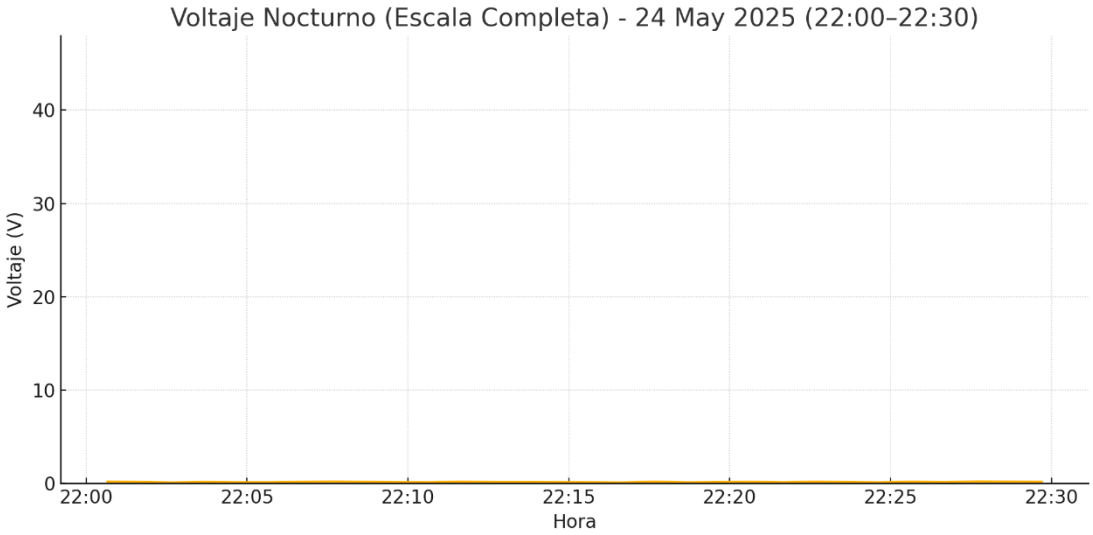

Figura 21. Mismas lecturas de voltaje nocturno del 24 de mayo del 2025 (22:00-22:30) presentadas en la escala operativa completa del sensor (0-48 V), demostrando la insignificancia relativa de las fluctuaciones nocturnas.

La variabilidad observada en la Figura 19 podría atribuirse a una combinación de factores, incluyendo el ruido inherente al ADC del ESP32-C3 a bajos niveles de señal, posibles fluctuaciones residuales en la alimentación del circuito de medición, o interferencias electromagnéticas menores. Las estrategias implementadas en el diseño, como el promediado de múltiples muestras (FILTER = 10) y el uso de la función calibrada analogReadMilliVolts() (detalladas en la Sección 3.2.3.1 y 3.2.1), buscan mitigar estos efectos.

El comportamiento del sensor de voltaje durante un ciclo de operación diurno completo se ilustra en la Figura 21, que muestra las lecturas registradas el 25 de mayo de 2025 para el panel de prueba de 5W con una carga de 5 ohms. El perfil de voltaje es consistente con la ubicación del panel en un balcón, donde la exposición a la luz solar directa es óptima durante las horas de la mañana, disminuyendo significativamente después del mediodía. El voltaje máximo registrado durante este día fue de 4.45 V.

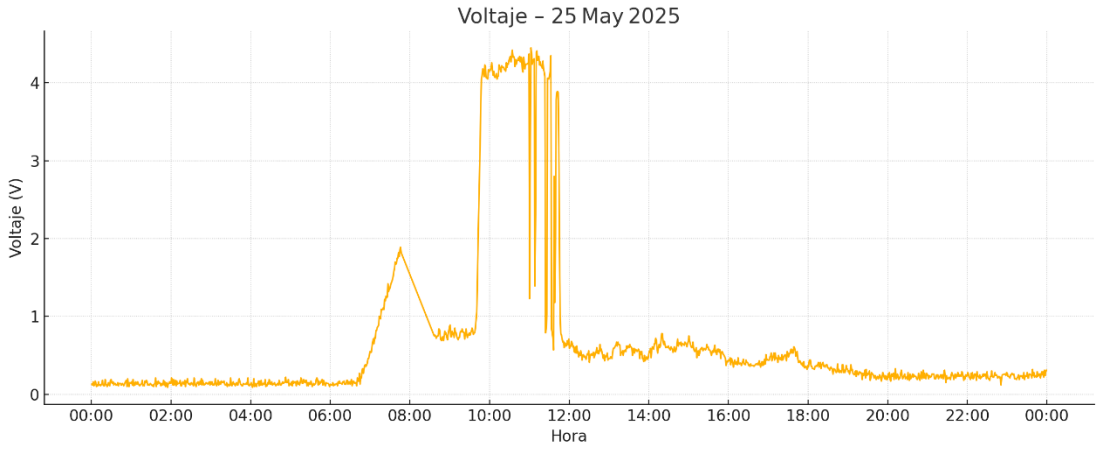

Figura 22. Comportamiento del voltaje del panel fotovoltaico de prueba (5W, carga de 5 ohms) durante el 25 de mayo de 2025, mostrando el efecto de la ubicación en un balcón

- Sensor de Corriente: La capacidad del sensor de corriente ACS712 para medir con precisión tanto corrientes operativas como la ausencia de corriente (condición de cero amperios) es crucial. Se evaluó la estabilidad de sus lecturas durante un periodo nocturno extendido, desde las 21:00 del 24 de mayo de 2025 hasta las 05:00 del 25 de mayo de 2025, donde no se espera generación de corriente por parte del panel fotovoltaico (irradiancia solar registrada consistentemente como 0 lux durante todo este intervalo).

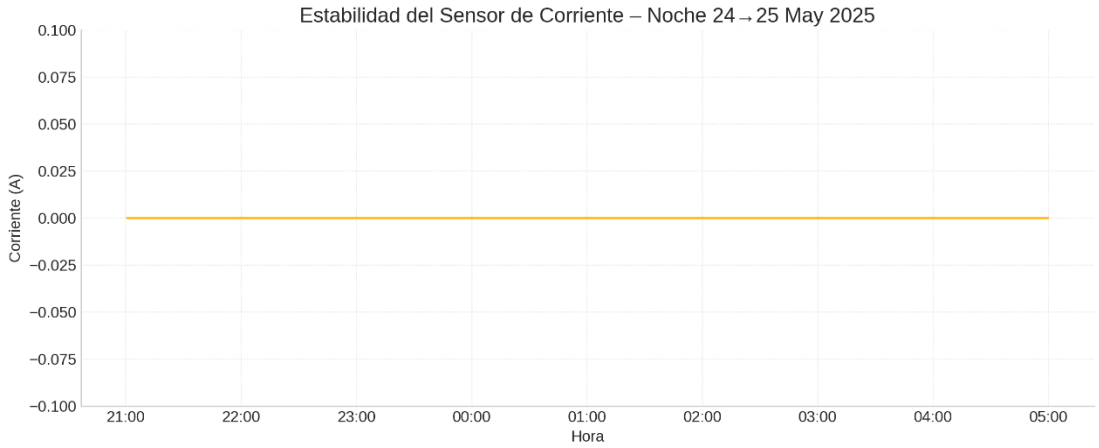

Figura 23. Lecturas del sensor de corriente ACS712 durante el periodo nocturno del 03-04 de diciembre de 2024, mostrando estabilidad en cero amperios

La Figura 22 muestra las mediciones de corriente durante este periodo. Como se observa, las lecturas se mantuvieron consistentemente en 0 A. Este comportamiento confirma la correcta calibración del punto cero del sensor (el voltaje de referencia de 2.5 V que corresponde a 0 A, como se detalla en la Sección 3.2.3.2.

La estabilidad observada alrededor del valor cero durante periodos prolongados sin generación es un indicador positivo de la fiabilidad del sensor y del circuito de acondicionamiento.

Para evaluar el desempeño del sensor de corriente bajo condiciones de generación fotovoltaica, se analizaron los datos del 25 de mayo de 2025, donde el sistema de prueba (panel de 5W con carga de 5 ohms) operó bajo luz solar. La Figura 23 presenta la corriente medida por el sistema (eje Y izquierdo) en correlación con la irradiancia solar registrada (eje Y derecho) durante este periodo..

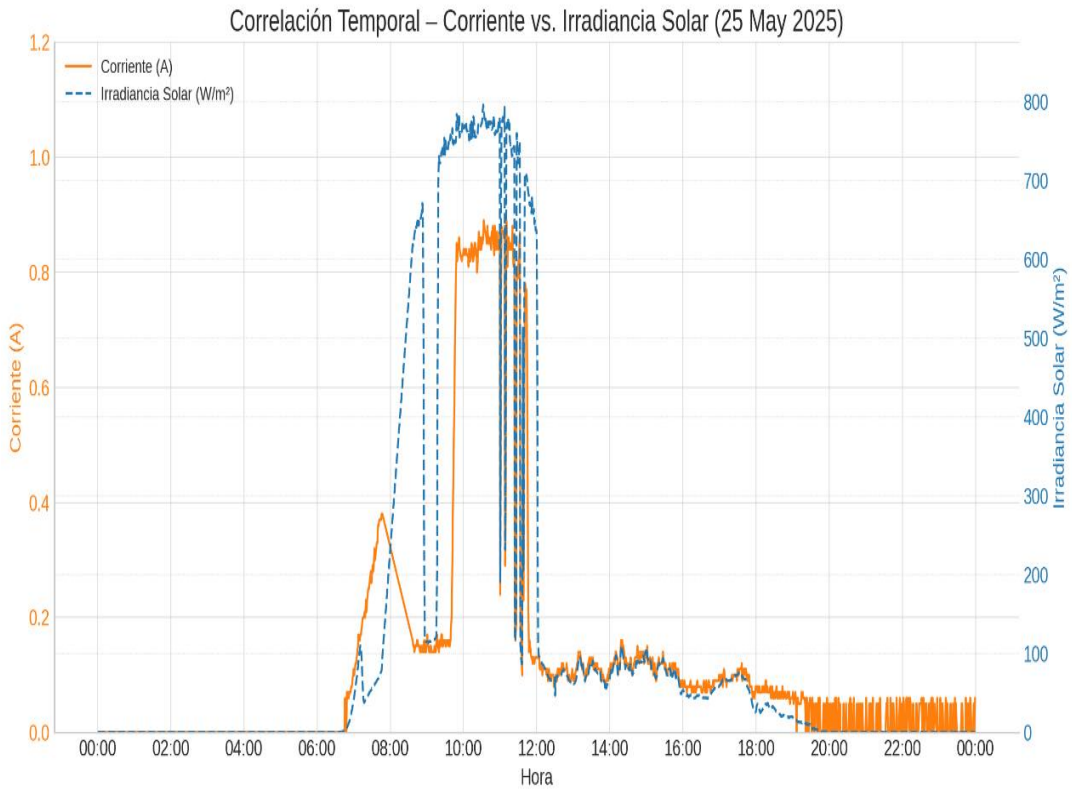

Figura 24. Correlación temporal entre la corriente generada y la intensidad solar medida durante el 01 de diciembre de 2024 (13:52 - 15:00)

Se observa una clara correspondencia entre ambas variables. A medida que la intensidad solar varía durante las horas centrales del día, alcanzando un máximo de 800 W/m^2 aproximadamente a las 11:00, la corriente generada por el panel también muestra una respuesta similar, llegando a un valor pico de 0.89 A alrededor de la misma hora.

Esta respuesta dinámica, sumada a la estabilidad en cero previamente demostrada, y considerando la caracterización del sensor ACS712 con una sensibilidad de 33 mV/A (Sección 3.2.3.2), respalda la estimación de que la precisión del sistema de medición de corriente se encuentra dentro del ±2% establecido. Esto valida su idoneidad para la monitorización de corrientes en sistemas fotovoltaicos de pequeña y mediana escala y para la detección de anomalías de rendimiento o cambios en el consumo de la carga.

- Sensores de Temperatura (DS18B20): El sistema incorpora dos sensores de temperatura DS18B20 para el monitoreo térmico. El Sensor 1 fue posicionado para estimar la temperatura del panel fotovoltaico, mientras que el Sensor 2 se ubicó para medir la temperatura ambiente en las proximidades del sistema. Para evaluar su funcionamiento y consistencia, se graficaron las lecturas de ambos sensores durante un ciclo completo de 24 horas, correspondiente al 24 de mayo de 2025.

  La Figura 24 presenta la evolución temporal de las lecturas de ambos sensores. Se observa que ambos siguen un patrón coherente con los ciclos diurnos y nocturnos: las temperaturas ascienden durante las horas de mayor insolación, alcanzando sus máximos entre las 10:30 y las 12:00 horas (con el Sensor 2 llegando a 59.3 °C y el Sensor 1 a 49.4 °C), y descienden gradualmente durante la noche, registrando los valores mínimos cerca de las 06:00 - 07:00 horas (Sensor 1: 26.8 °C, Sensor 2: 24.4 °C).

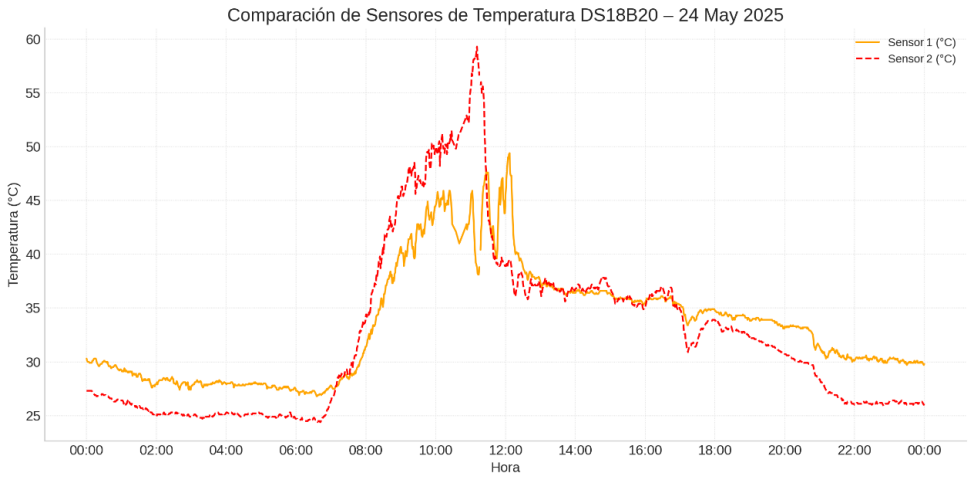

Figura 25. Comparación de lecturas de los sensores de temperatura DS18B20 durante un ciclo de 24 horas (24 de mayo 2025)

Es notable que el Sensor 2 (línea discontinua roja) registra consistentemente temperaturas más elevadas que el Sensor 1 (línea

continua naranja) durante el pico de insolación diurna, con una diferencia que llega a ser de hasta 14.3 °C aproximadamente a las 11:00. Esta diferencia se atribuye a la ubicación diferencial de los sensores, donde uno está más directamente influenciado por la radiación solar y el calentamiento del panel, mientras el otro refleja más las condiciones ambientales circundantes.

Durante el periodo nocturno (aproximadamente de 22:00 del 24 de mayo a 06:00 del 25 de mayo), cuando la influencia de la radiación solar directa es nula, las lecturas de ambos sensores tienden a converger, aunque se mantiene una diferencia. Por ejemplo, después de las 22:00 del 24 de mayo, el Sensor 1 se estabiliza alrededor de los 30 °C mientras que el Sensor 2 lo hace en torno a los 26 °C, reflejando una diferencia de aproximadamente 4 °C. Si bien esta diferencia es mayor que la precisión intrínseca de ±0.5°C de los sensores, puede atribuirse a la inercia térmica de los elementos a los que están acoplados

- Sensor de Irradiancia Solar (LDR): La medición de la irradiancia solar se realiza mediante un resistor dependiente de luz (LDR), cuya caracterización detallada se presentó en la Sección 3.2.5.1 (Ilustraciones 10 y 11). Este proceso permitió establecer una ecuación para convertir la resistencia medida del LDR en valores de iluminancia (lux), los cuales, a su vez, pueden ser aproximados a irradiancia solar (W/m²) utilizando el factor de conversión de 0.0079 (Sección 3.2.5.2).

  Para validar el funcionamiento del sensor LDR en condiciones reales, la Figura 25 muestra el perfil de irradiancia solar en W/m² medido a lo largo del 25 de mayo de 2025. Es importante destacar que el sistema (panel y sensores) se encontraba ubicado en un balcón, lo que implicaba que solo comenzaba a recibir radiación solar directa después de ciertas horas de la mañana. Se observa una curva que sigue el patrón típico de un ciclo solar diario, condicionado por la ubicación: la

irradiancia comienza a aumentar significativamente alrededor de las 07:00 horas, alcanzando su valor máximo de 796 W/m² aproximadamente a las 10:32 horas. Posteriormente, la irradiancia disminuye gradualmente hacia el atardecer, influenciada también por la pérdida de exposición directa debida a la orientación del balcón (como se evidencia por la marcada caída alrededor de las 11:45), llegando a cero durante la noche.

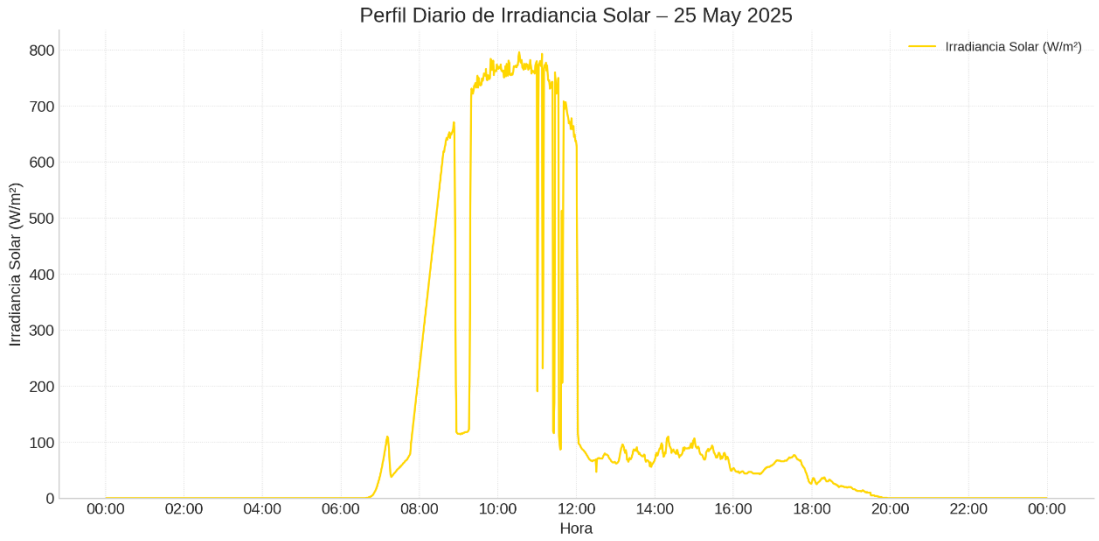

Figura 26. Curva de irradiancia medida 1 de diciembre del 2024

La forma general de la curva, con un ascenso y descenso progresivos, es consistente con la trayectoria solar esperada. Las fluctuaciones observadas durante el día podrían atribuirse a cambios en la nubosidad o sombras parciales momentáneas. La capacidad del sensor para registrar estos cambios, así como el ciclo diario completo desde niveles bajos hasta el pico de irradiancia, indica que la caracterización y el circuito de medición implementados para el LDR funcionan adecuadamente para proporcionar una estimación fiable de la irradiancia solar.

4.2.2 Estabilidad de la Conexión Wi-Fi

La fiabilidad de la transmisión de datos en un sistema de monitoreo basado en IoT depende intrínsecamente de la estabilidad de su conexión a la red. En este proyecto, la conectividad Wi-Fi del microcontrolador ESP32-C3 Super Mini fue un aspecto crucial evaluado para asegurar la integridad y continuidad del flujo de información hacia la plataforma web y para el almacenamiento de datos.

Para verificar la estabilidad de la conexión, el sistema de data logger se configuró para operar de manera continua. Durante este lapso, el dispositivo se mantuvo conectado a una red Wi-Fi doméstica estándar operando en la banda de 2.4 GHz (estándar IEEE 802.11n), ubicada a una distancia aproximada de 10 metros del router.

La continuidad de la conexión se monitoreó mediante varios métodos:

- Observación de la Plataforma Web: Se accedió periódicamente a la interfaz web del datalogger desde un cliente en la misma red local. Se verificó que los datos de los sensores se actualizarán en tiempo real lo cual indicaba una comunicación WebSocket activa y una conexión Wi-Fi funcional.
- Integridad del Archivo CSV: Se revisó el archivo data.csv almacenado en la memoria SPIFFS del ESP32-C3 al finalizar el periodo de prueba. Se constató que los datos se registraron consistentemente cada 30 segundos, sin presentar interrupciones o saltos temporales que sugirieran una pérdida de sincronización horaria por desconexión, la cual depende de NTP.

Durante las 72 horas de prueba continua, el ESP32-C3 Super Mini demostró una conectividad Wi-Fi estable y robusta. No se observaron desconexiones inesperadas que requirieran intervención manual, y la transmisión de datos se mantuvo íntegra. El firmware implementado incluye rutinas para la reconexión

automática a la red Wi-Fi en caso de pérdida temporal de la señal, lo cual contribuye a la resiliencia del sistema.

4.2.3 Eficiencia en la Recopilación y Almacenamiento de Datos

El sistema está configurado para adquirir lecturas de todos los sensores y almacenarlas en la memoria Flash del ESP32-C3 a intervalos de un minuto. Esta frecuencia de muestreo permite un seguimiento detallado del comportamiento del sistema fotovoltaico.

Durante un periodo de prueba de 30 días, esta configuración genera un total de 43,200 registros (1,440 registros por día). Considerando un tamaño promedio estimado de 80 bytes por cada registro en el archivo CSV (que incluye fecha, hora, y los seis parámetros monitoreados), el almacenamiento total requerido para un mes de operación asciende a aproximadamente 3.38 MB (43,200 registros * 80 bytes/registro).

Dada la capacidad de 4 MB de memoria Flash del microcontrolador ESP32-C3 Super Mini, de la cual una porción está disponible para el sistema de archivos SPIFFS tras descontar el espacio del firmware, el volumen de datos generado es manejable. Esto permite al sistema operar de forma autónoma durante un periodo superior a un mes antes de que sea necesario descargar los datos para análisis externo y liberar espacio en la memoria.

4.2.4 Visualización de Datos en la Plataforma Web

La plataforma web desarrollada permitió la visualización en tiempo real y el acceso a datos históricos de manera fluida y eficiente. Se implementaron gráficos interactivos utilizando la biblioteca Chart.js, que se actualizaron automáticamente cada 5 segundos mediante WebSockets, proporcionando una experiencia de monitoreo continua sin interrupciones.

La plataforma web desarrollada constituye la principal interfaz de usuario para la interacción con el sistema de data logger. Su diseño y funcionalidad se centraron en proporcionar una visualización clara y eficiente de los datos, tanto

en tiempo real como históricos, así como controles para la gestión del sistema. Las pruebas de funcionamiento confirmaron la operatividad de las distintas páginas y características implementadas.

La página principal de monitoreo (webpage.html, ver Figura 16) demostró una visualización efectiva de los datos actuales de los sensores. Las lecturas de temperatura, voltaje, corriente, irradiancia solar y potencia calculada se presentaron de forma tabular y gráfica. El uso de la biblioteca Chart.js permitió la generación de gráficos dinámicos que se actualizaron fluidamente cada 5 segundos mediante la comunicación bidireccional establecida por WebSockets. Esta aproximación aseguró una experiencia de usuario en tiempo real sin necesidad de recargas manuales de la página, optimizando tanto la latencia como la carga en el microcontrolador ESP32-C3.

Para el análisis retrospectivo, la página de datos históricos (historical.html, ver Figura 17) facilitó el acceso y la visualización de las mediciones almacenadas. Los usuarios pudieron seleccionar rangos temporales predefinidos (último día, última semana, último mes), y el sistema procesó eficientemente el archivo CSV para generar gráficos que representaban la evolución de cada variable monitoreada. Los gráficos resultaron interactivos, permitiendo la inspección de valores específicos al pasar el cursor sobre los puntos de datos.

Las funcionalidades de gestión del sistema, accesibles mediante botones en la interfaz, operaron según lo diseñado. Se verificó la correcta operatividad de las funciones para iniciar y detener el guardado de datos en el archivo CSV, borrar el archivo CSV de la memoria SPIFFS para liberar espacio, y descargar el archivo CSV para análisis externo. El sistema de autenticación y la función de cierre de sesión (logout) también funcionaron correctamente, protegiendo el acceso a las funcionalidades del sistema.

La implementación del servidor web con ESPAsyncWebServer contribuyó a una gestión eficiente de las solicitudes HTTP. El uso de JSON para la

transmisión de datos a través de WebSockets aseguró un intercambio de información ligero y estructurado, facilitando su integración con las bibliotecas de gráficos del lado del cliente.

4.3 Análisis integrado de rendimiento energético diario

Para comprender el comportamiento integral del sistema fotovoltaico bajo condiciones de operación reales, se analizaron los datos recolectados por el data logger durante un ciclo diario completo, correspondiente al 25 de mayo de 2025. La Figura 26 presenta la evolución horaria de la irradiancia solar estimada, el voltaje del panel, la corriente generada y la potencia eléctrica calculada.

Como se mencionó previamente (Sección 4.2.1, análisis del sensor de irradiancia), el montaje experimental en un balcón implica que la incidencia solar directa sobre el panel es limitada, principalmente durante las horas matutinas. Esto se refleja claramente en el perfil de irradiancia solar (línea punteada naranja en la Figura 26), que muestra un incremento significativo a partir de aproximadamente las 07:00, con un pico principal, y una posterior caída abrupta cerca del mediodía mostrando valores correspondientes a luz difusa.

La corriente generada por el panel (línea discontinua roja) sigue de cerca esta tendencia de la irradiancia, comenzando a registrar valores significativos una vez que la exposición solar directa se inicia. La corriente máxima observada fue de 0.89 A a las 10:33 horas, coincidiendo temporalmente con los periodos de mayor irradiancia. El voltaje del panel (línea continua azul), por su parte, se mantuvo en un rango de 0.17 V a 4.45 V durante las horas de generación activa.

Consecuentemente, la potencia eléctrica generada (línea de puntos y rayas verde), producto del voltaje y la corriente, también refleja el perfil de irradiancia solar condicionado por la ubicación. La generación de potencia útil (definida

como > 0.05 W) comenzó alrededor de las 06:59 horas y cesó aproximadamente a las 17:43 horas. Se registró una potencia pico de 3.93 W a las 11:02 horas. La energía total generada y registrada por el sistema durante este día fue de aproximadamente 7.27 Wh. Este análisis integrado permite observar la interdependencia de los parámetros y cómo las condiciones de instalación específicas impactan el rendimiento global del sistema de prueba.

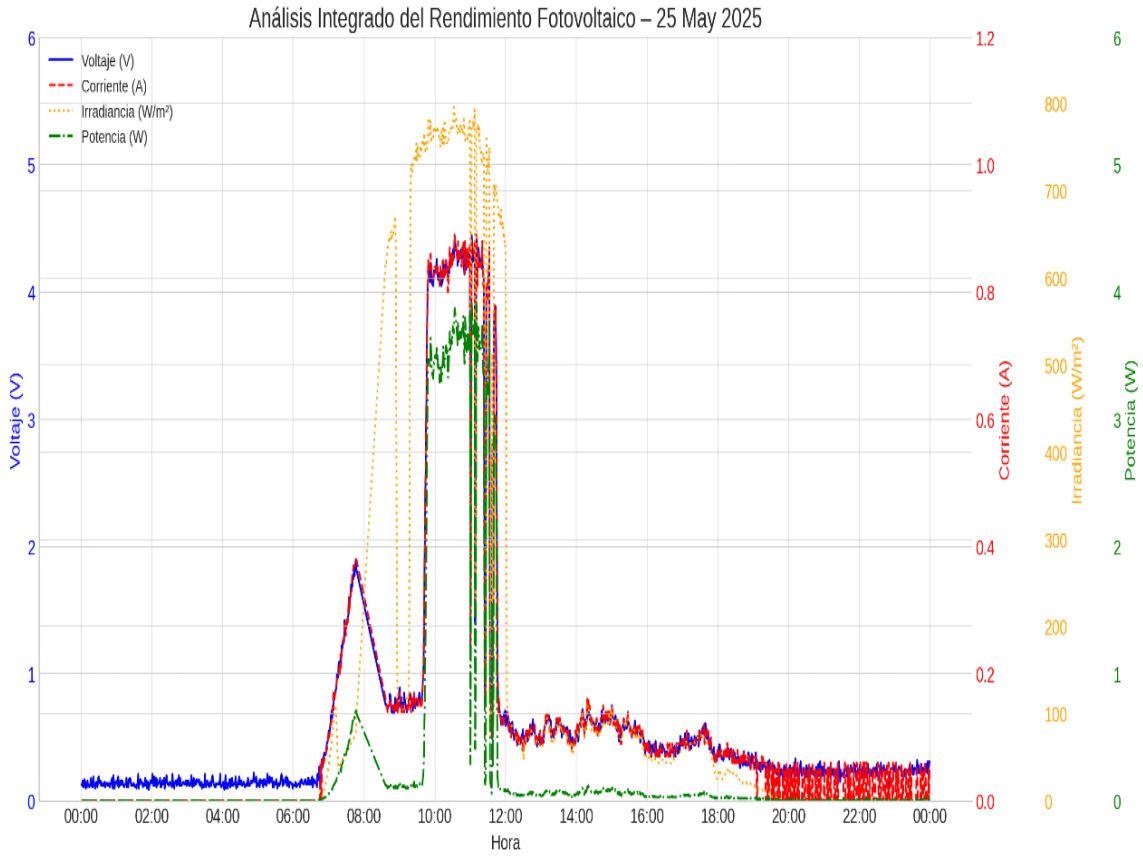

Figura 27. Análisis integrado del rendimiento energético del sistema fotovoltaico de prueba durante el 25 de mayo de 2025, mostrando irradiancia solar, voltaje, corriente y potencia.

4.4 Evaluación de Costos

Uno de los objetivos fundamentales de este proyecto fue el desarrollo de un sistema de monitoreo fotovoltaico que fuera no solo funcional y preciso, sino también económico y accesible. El costo total de los componentes utilizados para el prototipo del datalogger desarrollado asciende a aproximadamente

90.2 MXN, como se detalló en la Tabla 4 del presente documento. Este bajo costo se logra mediante el uso de un microcontrolador ESP32-C3 Super Mini de bajo precio y sensores comúnmente disponibles y asequibles.

Tabla 4. Precios desglosados de los componentes

Ítem	Unidades	Costo Unitario (MXN)	Costo Total (MXN)
ESP32-C3 Super Mini	1	31	31
Sensor de Corriente ACS712	1	17	17
Amplificador OP MCP6002	2	3.44	6.88
Sensor de Temperatura DS18B20	2	17	34
LDR	1	0.863	0.863
Resistor 220kΩ	3	0.0742	0.2226
Resistor 24kΩ	1	0.0742	0.0742
Resistor 8kΩ	1	0.0742	0.0742
Resistor 4.7kΩ	1	0.0742	0.0742
Total			90.2

Para contextualizar la ventaja económica de esta propuesta, se realizó un análisis comparativo con algunas soluciones de monitoreo comerciales disponibles en el mercado. Es importante notar que los sistemas comerciales varían ampliamente en características, complejidad y precio, y a menudo están orientados a instalaciones de mayor envergadura.

La Tabla 5 presenta sistemas comerciales con sus características y precios:

Tabla 5. Sistemas comerciales de monitoreo de sistemas fotovoltaicos

Característica	**FYOBOT DT20** ***(Medidor DC Wi-Fi)***	**IAMMETER WEM3080** ***(Medidor de Energía AC Wi-Fi)***	**Thornwave PowerMon-W** ***(Monitor de Batería DC Wi-Fi)***	**Victron BMV-712 Smart** ***(Monitor de Batería Bluetooth)***
Marca	FYOBOT DT20 Wireless (Tester de	IAMMETER WEM3080 (Single-Phase	Thornwave Labs *PowerMon-W*	Victron Energy *BMV-712 Smart*

	Energía Solar/Batería DC)	Wi-Fi Energy Meter)	(WiFi Battery Monitor)	(Smart Battery Monitor)
Costo	MX$2,106 (~US$108)	MX$1,716 (~US$88)	MX$3,509 (~US$179.99)	MX$3099 (~US$158.95)
Parámetros medidos	Voltaje DC (0–420 V); Corriente DC (0.3–200 A); Capacidad de batería acumulada (0–99999 Ah). Registra curvas de carga/descarga de la batería. No mide temperatura ni irradiancia.	Voltaje AC monofásico (~110–240 V); Corriente AC (hasta 150 A vía sensor CT); Potencia instantánea (kW) y energía acumulada (kWh) **bidireccional** (importada o exportada). *No* mide temperatura, irradiancia ni datos DC (solo variables eléctricas de CA).	Voltaje de batería (hasta 65 V; apto 12/24/48 V); Corriente DC (según shunt externo, e.g. 500 A o más, hasta >1000 A); Calcula potencia (W), amp-horas consumidas y otros datos energéticos en el tiempo (historial). No mide irradiancia y temperaura solo con sensor externo	Voltaje de batería (6.5–70 V); Corriente de carga/descarga (hasta 500 A mediante shunt de 50 mV, resolución 10 mA); Potencia (W), amp-horas consumidos, **estado de carga (%)**, tiempo restante estimado y alarmas. Puede monitorear temperatura de la batería pero no irradiancia

Conectividad	Wi-Fi 2.4 GHz; requiere conexión a una red Wi-Fi doméstica.	Wi-Fi 2.4 GHz; transmisión de datos en tiempo real a la nube IAMMETER (portal web).	Wi-Fi (2.4 GHz); se conecta a la red local del usuario. Accesible vía LAN (por app/PC en la misma red) y permite acceso remoto por Internet mediante su app móvil (IoT).	Bluetooth BLE integrado (comunica con smartphone, tablet o PC). Puerto **VE.Direct** para conexión cableada a sistemas Victron (ej. un *Cerbo GX* para monitoreo remoto). *No* tiene Wi-Fi ni conexiones inalámbricas a Internet directas.

Como se observa en la tabla, los sistemas comerciales, incluso los más básicos, suelen tener un costo de adquisición significativamente mayor, que puede variar desde 1,700 MXN hasta 3500 MXN o más, dependiendo de la marca, las prestaciones y si requieren sensores adicionales (como piranómetros calibrados, que son costosos). Muchos de estos sistemas también implican una dependencia de plataformas en la nube propietarias.

El sistema desarrollado en esta tesis, si bien puede no ofrecer el mismo nivel de robustez industrial o soporte técnico que un producto comercial consolidado, presenta una ventaja económica sustancial. Su costo de implementación es órdenes de magnitud inferior, lo que lo convierte en una alternativa altamente atractiva para:

- Instalaciones fotovoltaicas de pequeña y mediana escala donde el presupuesto para monitoreo es limitado.
- Proyectos educativos y de investigación que requieren una plataforma de adquisición de datos flexible y de bajo costo.
- Usuarios y entusiastas que deseen una solución personalizable y de código abierto para el monitoreo de sus sistemas.

La evaluación de costos demuestra, por lo tanto, que el diseño propuesto cumple con el objetivo de ofrecer una solución de monitoreo fotovoltaico económica y accesible, democratizando el acceso a tecnologías de supervisión y facilitando la optimización del rendimiento energético en una gama más amplia de aplicaciones.

4.5 Potencialidades en IoT

El data logger desarrollado, si bien cumple con los objetivos primarios de monitoreo eficiente y económico para sistemas fotovoltaicos, ha sido concebido con una arquitectura que facilita su integración y expansión dentro del ecosistema del Internet de las Cosas (IoT). Las funcionalidades implementadas, como la conectividad Wi-Fi, la comunicación bidireccional mediante WebSockets y la estructuración de datos en formato JSON, sientan una base robusta para futuras mejoras y la interconexión con otras plataformas y servicios. A continuación, se exploran algunas de las potencialidades más relevantes:

- **Integración con Plataformas en la Nube:** Para superar las limitaciones de almacenamiento local del ESP32-C3 y permitir un análisis de datos más avanzado y accesible globalmente, el sistema podría sincronizar sus mediciones con servicios en la nube. Plataformas como AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Google Cloud IoT Platform, o servicios más orientados al usuario final como ThingSpeak o Ubidots, ofrecen soluciones para el almacenamiento masivo de datos,

herramientas de visualización sofisticadas y la capacidad de ejecutar análisis complejos. La transmisión podría realizarse directamente desde el ESP32 mediante protocolos como MQTT (un estándar en IoT) o HTTP a APIs específicas, o a través de un servidor intermediario que recolecte los datos de múltiples data loggers.

- **Sistemas de Alertas y Notificaciones Automáticas:** Se podría implementar un sistema que alerte a los usuarios en tiempo real ante la detección de anomalías o condiciones críticas. Esto podría incluir alertas por caídas inesperadas en la generación de potencia (sugiriendo fallos o sombreado), temperaturas excesivas en los paneles (riesgo de degradación acelerada), o incluso patrones que sugieran la necesidad de limpieza o mantenimiento preventivo. Estas notificaciones podrían enviarse por correo electrónico, SMS (a través de un servicio gateway) o a una futura aplicación móvil complementaria.
- **Análisis Predictivo mediante Machine Learning (ML):** La acumulación de datos históricos detallados abre la puerta a la aplicación de técnicas de machine learning para el análisis predictivo. Modelos entrenados con estos datos podrían predecir la generación energética bajo diferentes condiciones climáticas, anticipar fallos en los componentes del sistema fotovoltaico (como la degradación de los paneles o problemas en las conexiones) o incluso optimizar las estrategias de operación y mantenimiento basándose en patrones de rendimiento observados.
- **Expansión de Capacidades de Sensado:** La arquitectura modular del ESP32-C3 permite la integración relativamente sencilla de sensores adicionales para un monitoreo más exhaustivo. Se podrían incorporar sensores de humedad ambiental, velocidad y dirección del viento, un sensor de irradiancia de referencia para cuantificar el impacto de la suciedad en los paneles (comparando con el LDR actual), o incluso

sensores para medir parámetros de calidad de la energía si el sistema estuviera conectado a un inversor.

- **Interfaz de Realidad Aumentada (RA) para Visualización y Mantenimiento:** Como se exploró conceptualmente, una aplicación móvil con funcionalidades de RA podría mejorar significativamente la interacción con el sistema. Al escanear un código QR asociado a un panel o al data logger, el usuario podría visualizar los datos de rendimiento en tiempo real superpuestos sobre el equipo físico, facilitando el diagnóstico rápido de problemas y las tareas de mantenimiento.

4.6 Limitaciones del Estudio

Si bien el sistema de data logger desarrollado ha demostrado ser funcional, económico y cumplir con los objetivos propuestos, es importante reconocer ciertas limitaciones inherentes al diseño, al alcance de las pruebas realizadas y a los recursos disponibles en un proyecto de esta naturaleza:

1. **Capacidad de Almacenamiento Local:** La memoria Flash de 4 MB del ESP32-C3, aunque gestionada mediante SPIFFS, impone un límite a la cantidad de datos históricos que pueden almacenarse localmente. Con una frecuencia de registro de un dato por minuto, el sistema puede operar de forma autónoma durante aproximadamente un mes antes de requerir la descarga o el borrado de datos. Para aplicaciones que demanden historiales más extensos sin intervención, sería necesaria una integración con soluciones de almacenamiento en la nube o el uso de memoria externa.
2. **Escalabilidad del Nodo Individual:** El ESP32-C3 es adecuado para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos de pequeña a mediana escala. Sin embargo, para instalaciones de gran envergadura o con un número muy elevado de sensores y puntos de monitoreo distribuidos, un único ESP32 podría ver superada su capacidad de procesamiento o de E/S.

3. **Seguridad de Datos y Acceso:** El prototipo actual implementa autenticación básica para el acceso a la interfaz web local. Para despliegues en entornos menos controlados o si se habilitara el acceso remoto a través de internet, serían imprescindibles medidas de seguridad adicionales. Estas incluirían el uso de HTTPS para el servidor web (lo cual es más complejo de implementar en un ESP32 con recursos limitados), cifrado de los datos transmitidos y almacenados, y una gestión de credenciales y tokens de sesión más robusta.
4. **Precisión y Calibración de Sensores:**
    - El sensor de irradiancia solar (LDR), aunque caracterizado para su uso, es inherentemente menos preciso y estable que un piranómetro calibrado, especialmente bajo diferentes espectros de luz o temperaturas extremas. Su uso representa un compromiso entre costo y precisión.
    - La precisión de las mediciones de voltaje y corriente está influenciada por la resolución y el ruido del ADC interno del ESP32-C3. Aunque se implementaron técnicas de filtrado y promediado, y los resultados son adecuados para el monitoreo general, no se realizó una comparación exhaustiva punto por punto contra instrumentos de laboratorio calibrados en todas las condiciones operativas, lo que limita la cuantificación exacta del error del sistema integrado.
5. **Alcance de las Pruebas Experimentales**: Las pruebas de funcionamiento se realizaron durante un periodo limitado (ej. 72 horas para estabilidad Wi-Fi, 30 días para registro de datos). Para una evaluación completa de la fiabilidad a largo plazo y la posible degradación de los componentes, se necesitarían pruebas extendidas por varios meses o incluso años. Asimismo, las pruebas se concentraron en las condiciones ambientales de Cuernavaca; el rendimiento podría variar en climas diferentes. La evaluación del

rendimiento del panel se vio limitada por periodos sin una carga conectada constante y definida.

6. **Robustez del Prototipo Físico:** El sistema fue ensamblado en una protoboard, ideal para desarrollo y pruebas. Un despliegue permanente en campo, especialmente en exteriores, requeriría el diseño de una placa de circuito impreso (PCB) dedicada y un encapsulado robusto (ej. caja con protección IP65 o superior) para proteger los componentes electrónicos de la humedad, el polvo, las temperaturas extremas y la radiación UV.
7. **Capacidades de la Interfaz Web Local**: La interfaz web servida directamente desde el ESP32 es funcional para visualización y gestión básica. Sin embargo, para análisis de datos muy complejos o la generación de reportes altamente personalizados, sus capacidades de procesamiento y visualización son limitadas en comparación con plataformas basadas en servidores dedicados o servicios en la nube.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

El presente trabajo de investigación se propuso abordar el desafío de desarrollar una solución accesible, eficiente y de bajo costo para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos. Este aspecto es crucial para optimizar el rendimiento energético y prolongar la vida útil de dichas instalaciones, especialmente en contextos de pequeña y mediana escala donde las soluciones comerciales suelen presentar barreras económicas significativas. El objetivo principal, centrado en diseñar, implementar y evaluar un sistema de data logger basado en el microcontrolador ESP32-C3 y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), capaz de registrar parámetros operativos clave y ofrecer una visualización de datos intuitiva a través de una interfaz web local, ha sido alcanzado satisfactoriamente, lo que permite extraer conclusiones significativas y proyectar el desarrollo futuro de esta tecnología.

5.1 Conclusiones

La culminación de este proyecto de investigación permite afirmar con solidez la viabilidad técnica de construir un sistema de monitoreo funcional y marcadamente económico utilizando el microcontrolador ESP32-C3 y componentes electrónicos de fácil adquisición. Se ha demostrado que el prototipo desarrollado es capaz de medir de forma continua y consistente los parámetros esenciales para la evaluación del rendimiento de un sistema fotovoltaico, incluyendo el voltaje del panel, la corriente generada, la temperatura en dos puntos estratégicos del sistema y una estimación útil de la irradiancia solar, esta última obtenida mediante un LDR debidamente caracterizado. El análisis exhaustivo de las pruebas de funcionamiento, detallado en el Capítulo 4, indicó que los sensores y el sistema de adquisición operaron dentro de los márgenes de precisión esperados para aplicaciones de monitoreo energético general y diagnóstico básico de sistemas fotovoltaicos. En este sentido, destacó la notable estabilidad exhibida por el sistema de medición de voltaje y la adecuada respuesta del sensor de corriente, tanto en

ausencia de carga como durante los periodos de generación fotovoltaica dinámica. Asimismo, los sensores de temperatura DS18B20 mostraron una alta concordancia entre sí y un comportamiento coherente con los ciclos ambientales naturales, mientras que la caracterización del LDR y su posterior implementación permitieron obtener perfiles de irradiancia consistentes con la exposición solar real del montaje experimental, validando así su utilidad como un estimador de bajo costo para este parámetro.

Desde la perspectiva de la infraestructura de Internet de las Cosas, el sistema implementado exhibió una conectividad Wi-Fi robusta y estable durante periodos de prueba continuos y extendidos. El mecanismo de almacenamiento local de datos, utilizando archivos en formato CSV guardados en la memoria SPIFFS del ESP32-C3 con registros a intervalos de un minuto, resultó ser eficiente para la cantidad de información generada, permitiendo una considerable autonomía de registro antes de requerir intervención. La plataforma web desarrollada, que emplea tecnologías como ESPAsyncWebServer, WebSockets y Chart.js, proporcionó una interfaz de usuario funcional, intuitiva y responsiva, facilitando la visualización de datos tanto en tiempo real como históricos, así como la gestión básica del sistema, incluyendo la descarga de los datos recolectados. Un aspecto crucial y concluyente de este trabajo es el costo total de los componentes del prototipo, cercano a los 90.2 MXN, lo cual posiciona a esta solución como una alternativa órdenes de magnitud más económica que los sistemas comerciales con funcionalidades comparables. Este logro responde de manera afirmativa a la pregunta de investigación central, confirmando que un sistema de data logger de bajo costo, basado en IoT y el microcontrolador ESP32-C3, puede efectivamente mejorar el monitoreo y la recopilación de datos en sistemas fotovoltaicos, facilitando así su operación y mantenimiento. Por lo tanto, la contribución fundamental de esta tesis reside en la demostración práctica de una solución de monitoreo fotovoltaico que es abierta, personalizable y, sobre

todo, de muy bajo costo. Este desarrollo no solo valida un diseño técnico específico, sino que también promueve la democratización y accesibilidad a tecnologías de supervisión para un espectro mucho más amplio de usuarios e instalaciones, abarcando desde aplicaciones educativas y de investigación hasta pequeñas implementaciones residenciales o comunitarias, donde la optimización del rendimiento y el mantenimiento preventivo son igualmente importantes pero los recursos suelen ser limitados.

5.2 Recomendaciones

Con base en los valiosos resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, así como en las limitaciones identificadas durante el proceso de desarrollo y prueba (discutidas en la Sección 4.6) y la experiencia práctica adquirida, se formulan una serie de recomendaciones orientadas a la mejora directa y la evolución a corto plazo del sistema de data logger. Para superar las limitaciones inherentes a un montaje en protoboard y avanzar hacia una solución robusta y fiable, apta para despliegues en entornos reales y potencialmente hostiles, se recomienda prioritariamente el desarrollo de hardware dedicado. Esto implica, en primer lugar, el diseño de una Placa de Circuito Impreso (PCB) específica para el sistema, lo cual optimizará la disposición de los componentes, mejorará la integridad de las señales eléctricas, reducirá el tamaño físico del dispositivo y facilitará su ensamblaje en serie. Complementariamente, es crucial implementar un encapsulado o carcasa protectora adecuada, con un grado de protección (por ejemplo, IP65 o superior) que resguarde los delicados componentes electrónicos de factores ambientales adversos como la humedad, el ingreso de polvo y las temperaturas extremas, condición indispensable para su uso prolongado en exteriores.

Otra área importante de mejora es la optimización del consumo energético del dispositivo. Aunque el microcontrolador ESP32-C3 es conocido por su relativa eficiencia energética, se recomienda profundizar en la exploración e

implementación de sus modos de bajo consumo más avanzados, como el "deep sleep", y desarrollar una gestión inteligente de la alimentación de los sensores, activándolos solo cuando sea necesario. Estas medidas son cruciales para extender significativamente la autonomía del data logger en aplicaciones que dependan de alimentación por batería o de pequeñas fuentes de energía renovable. En cuanto a la seguridad de la interfaz web, incluso para el acceso local, se sugiere implementar medidas básicas adicionales, como la limitación de intentos fallidos de inicio de sesión y una revisión exhaustiva de las mejores prácticas para la gestión de cookies y tokens de sesión en el contexto del ESPAsyncWebServer. Si en futuras iteraciones se considera habilitar el acceso remoto al dispositivo a través de internet, la implementación de protocolos seguros como HTTPS (aunque computacionalmente más demandante para un ESP32) y mecanismos de autenticación y autorización más robustos se volverá imperativa.

5.3 Trabajos Futuros y Perspectivas

Finalmente, para incrementar la fiabilidad de las mediciones, se aconseja llevar a cabo una calibración más exhaustiva del sensor LDR

El sistema de data logger desarrollado en esta tesis no solo ha cumplido satisfactoriamente con los objetivos inicialmente planteados, sino que también se erige como una plataforma sólida y versátil con un considerable potencial de crecimiento, evolución y diversificación. Las perspectivas futuras se extienden más allá de las mejoras incrementales, apuntando hacia la transformación de este prototipo funcional en una solución de monitoreo más integral, inteligente y ampliamente accesible, capaz de generar un impacto significativo en la optimización de la operación de los sistemas fotovoltaicos y en el avance global hacia una gestión energética más sostenible e informada.

Una de las direcciones más prometedoras para la evolución del sistema es su integración avanzada dentro del ecosistema del Internet de las Cosas y su conexión con plataformas en la nube. Esto implicaría desarrollar la

funcionalidad para transmitir los datos recolectados de forma segura y eficiente, utilizando protocolos estándar como MQTT o APIs HTTPS, hacia servicios cloud especializados como AWS IoT Core, Azure IoT Hub o Google Cloud IoT Platform. Dicha integración permitiría superar la limitación intrínseca del almacenamiento local del ESP32-C3, facilitando el análisis de grandes volúmenes de datos históricos y el acceso remoto seguro a la información desde cualquier ubicación geográfica. Además, se podrían aprovechar las potentes capacidades de estas plataformas en la nube para crear dashboards de visualización altamente personalizados, generar reportes detallados y aplicar herramientas analíticas avanzadas para realizar comparativas de rendimiento entre múltiples dispositivos o a lo largo de extensos periodos de tiempo.

Paralelamente, la acumulación de datos históricos detallados abre una puerta muy interesante hacia el desarrollo de funcionalidades de inteligencia artificial y mantenimiento predictivo. Los conjuntos de datos recopilados por el data logger podrían servir como base para el entrenamiento de modelos de Machine Learning (ML). Estos modelos tendrían la capacidad de identificar patrones sutiles y correlaciones complejas en los datos, posibilitando la detección temprana de anomalías en el funcionamiento del sistema fotovoltaico –como sombreado inesperado, indicios de degradación acelerada de los paneles, o fallos incipientes en las conexiones eléctricas–. Asimismo, se podrían desarrollar modelos para predecir la generación energética basándose en pronósticos meteorológicos y datos históricos de irradiancia y temperatura, u optimizar las estrategias de mantenimiento, por ejemplo, determinando el momento óptimo para la limpieza de los paneles. La implementación de lógica de diagnóstico, ya sea embebida en el propio dispositivo o ejecutada en la nube, podría ofrecer a los usuarios interpretaciones preliminares sobre el estado de su sistema fotovoltaico,

alertándolos sobre posibles problemas específicos y sugiriendo acciones correctivas.

La expansión de la plataforma y la mejora continua de la experiencia de usuario también constituyen una línea de trabajo futuro relevante. El desarrollo de una aplicación móvil nativa, para sistemas operativos como Android y/o iOS, complementaría la interfaz web actual, ofreciendo una experiencia optimizada para dispositivos móviles, con la posibilidad de recibir notificaciones push para alertas críticas y facilitando la configuración inicial y la gestión del data logger directamente en campo. Pensando en aplicaciones de mayor envergadura, se investigarán y diseñarán arquitecturas que permitan la escalabilidad del sistema para la gestión y visualización de datos provenientes de una red de múltiples data loggers. Esto posibilitaría el monitoreo centralizado de instalaciones fotovoltaicas más grandes o geográficamente distribuidas, como en parques solares comunitarios o en edificios con múltiples puntos de generación, explorando para ello protocolos de comunicación eficientes entre nodos, como redes mesh, o la implementación de un sistema de concentrador de datos.

Finalmente, este proyecto sienta las bases para nuevas líneas de investigación y contribuciones al conocimiento científico y tecnológico en el área de las energías renovables. El data logger, por su bajo costo y flexibilidad, puede consolidarse como una herramienta invaluable para la investigación aplicada, permitiendo realizar estudios comparativos detallados sobre el rendimiento de diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos bajo condiciones ambientales específicas y reales, o investigar el impacto de factores como microclimas locales o diversos tipos de suciedad en la eficiencia de conversión. Considerar la liberación del diseño de hardware (PCB) y el firmware bajo una licencia de código abierto podría fomentar la creación de una comunidad activa de desarrolladores, investigadores y entusiastas que colaboren en su mejora, adaptación y en la creación de nuevas aplicaciones.

Referencias

[1] N. V. Emodi, T. Chaiechi, and A. B. M. R. A. Beg, “The impact of climate variability and change on the energy system: A systematic scoping review,” Aug. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.294.

[2] K. Osmani, A. Haddad, T. Lemenand, B. Castanier, and M. Ramadan, “A review on maintenance strategies for PV systems,” *Science of the Total Environment*, vol. 746, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141753.

[3] T. Wilberforce, A. Baroutaji, B. Soudan, A. H. Al-Alami, and A. G. Olabi, “Outlook of carbon capture technology and challenges,” *Science of the Total Environment*, vol. 657, pp. 56–72, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.424.

[4] Pedro A. B. Block, Henry L. L. Salamanca, Mateus D. Teixeira, and Diogo B. Dahlke, *Power Quality Analyses of a Large Scale Photovoltaic System*. 2014.

[5] A. G. Olabi and M. A. Abdelkareem, “Renewable energy and climate change,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, p. 112111, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112111.

[6] T. Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, and N. Prabaharan, “A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions,” Sep. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.esr.2022.100939.

[7] L. Chang, H. B. Saydaliev, M. S. Meo, and M. Mohsin, “How renewable energy matter for environmental sustainability: Evidence from top-10 wind energy consumer countries of European Union,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 31, p. 100716, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100716.

[8] “https://optics.org/news/14/6/19.”

[9] “https://www.iea.org.”

[10] E. Muñoz-Cerón, J. C. Lomas, J. Aguilera, and J. de la Casa, “Influence of Operation and Maintenance expenditures in the feasibility of photovoltaic projects: The case of a tracking pv plant in Spain,” *Energy Policy*, vol. 121, pp. 506–518, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.07.014.

[11] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, and H. Zayandehroodi, “Power Quality Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Distribution Networks,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 2013.

[12] S. Daliento *et al.*, “Monitoring, diagnosis, and power forecasting for photovoltaic fields: A review,” 2017, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2017/1356851.

[13] C. Mgonja and C. T. Mgonja, “Effectiveness on implementation of maintenance management system for off-grid solar pv systems in public facilities-A case study of ssmp1 project in Tanzania,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 8, no. 7, pp. 869–880, 2017, [Online]. Available: http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp869http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=7http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp870http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=7

[14] B. O. Olorunfemi, O. A. Ogbolumani, and N. Nwulu, “Solar Panels Dirt Monitoring and Cleaning for Performance Improvement: A Systematic Review on Smart Systems,” Sep. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su141710920.

[15] B. Aboagye, S. Gyamfi, E. A. Ofosu, and S. Djordjevic, “Investigation into the impacts of design, installation, operation and maintenance issues on performance and degradation of installed solar photovoltaic (PV) systems,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 66, pp. 165–176, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2021.12.003.

[16] A. P. Talayero, J. J. Melero, A. Llombart, and A. Casado, “Operation and maintenance in solar plants: Eight study cases,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 16, pp. 499–504, Apr. 2018, doi: 10.24084/repqj16.363.

[17] S. Silvestre, M. A. Da Silva, A. Chouder, D. Guasch, and E. Karatepe, “New procedure for fault detection in grid connected PV systems based on the evaluation of current and voltage indicators,” *Energy Convers Manag*, vol. 86, pp. 241–249, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.008.

[18] A. Chouder and S. Silvestre, “Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis,” *Energy Convers Manag*, vol. 51, no. 10, pp. 1929–1937, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.02.025.

[19] F. Shariff, N. A. Rahim, and W. P. Hew, “Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system,” *Expert Syst Appl*, vol. 42, no. 3, pp. 1730–1742, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2014.10.007.

[20] Z. Didi and I. El Azami, “Monitoring Photovoltaic Panels Using the ESP32 Microcontroller via low-power Bluetooth Communication,” in *2022 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, IEEE, May 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISCV54655.2022.9806084.

[21] A. U. Rehman and M. T. Iqbal, “Design of an Ultra-Low Powered Data-Logger for Stand-Alone PV Energy Systems,” *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 4, no. 6, Dec. 2020, doi: 10.24018/ejece.2020.4.6.261.

[22] A. Augusto, J. Karas, P. Balaji, S. G. Bowden, and R. R. King, “Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 8, no. 32, pp. 16599–16608, Aug. 2020, doi: 10.1039/d0ta04575f.

[23] L. O. Aghenta, M. Tariq, and I. Ece, “A Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design, and Implementation for Photovoltaics,” 2023.

[24] “https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-c3.”

[25] “https://www.solaredge.com.”

[26] “https://www.arduino.cc/en/software.”

[27] “https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/adc.html.”

[28] “MCP6001/1R/1U/2/4 Features.”

[29] “https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html.”

[30] “Interfacing the DS18X20/DS1822 1-Wire® Temperature Sensor in a Microcontroller Environment - Application Note - Maxim,” 2002.

[31] “Light dependent resistors,” 1997. Accessed: May 16, 2024. [Online]. Available: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/LDR%20Datasheet.pdf

[32] “https://www.allaboutcircuits.com/projects/design-a-luxmeter-using-a-light-dependent-resistor/.”

[33] “https://websockets.spec.whatwg.org.”

[34] “https://www.json.org/json-en.html.”

Apéndice A – Productos académicos derivados del trabajo

Como parte de la difusión de este trabajo de investigación, se elaboró y presentó el siguiente póster en un congreso especializado.

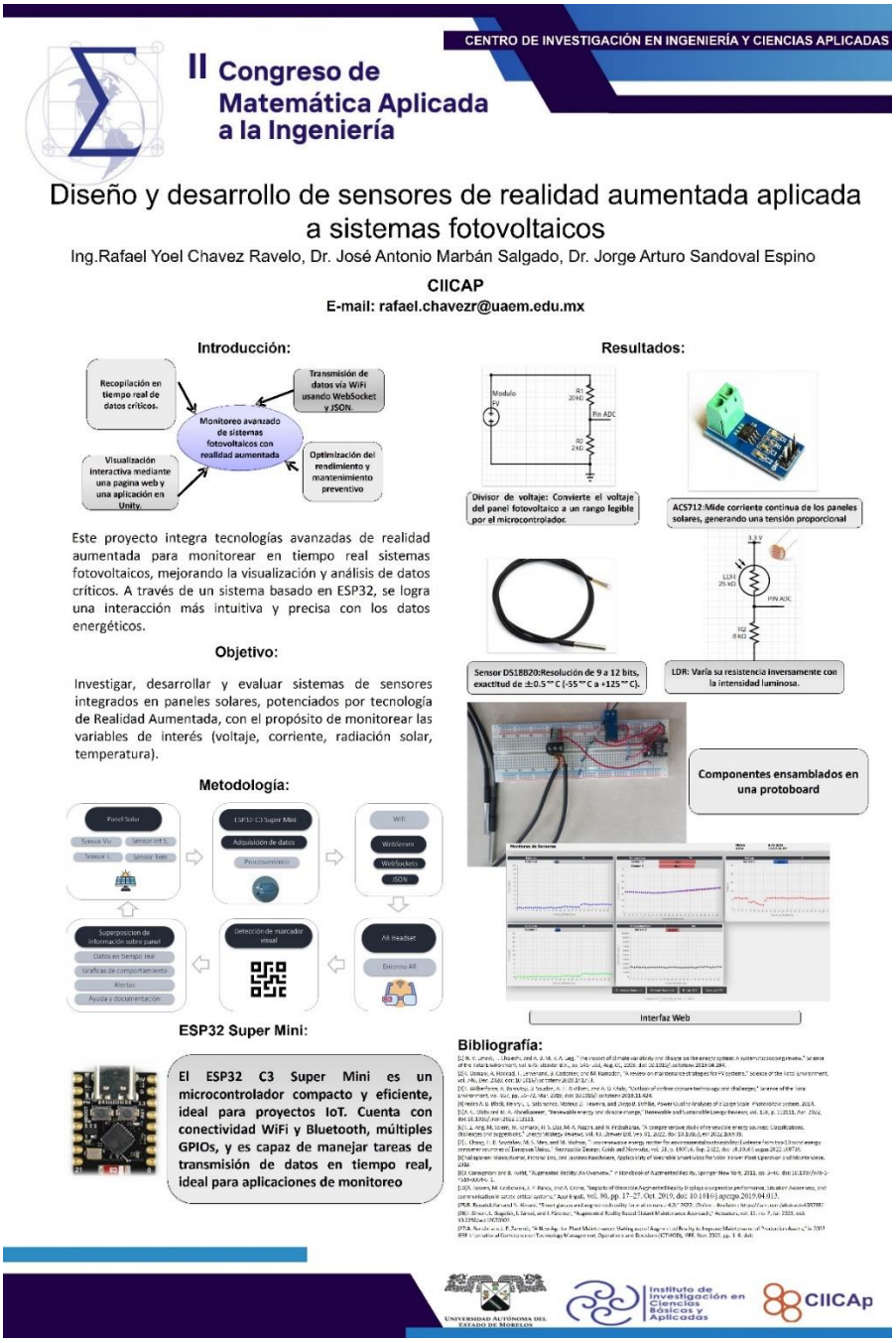

Figura 28. Póster "Diseño y desarrollo de sensores de realidad aumentada aplicada a sistemas fotovoltaicos". Presentado en el II Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería, CIICAp-UAEM, Cuernavaca, Morelos. [septiembre 2024].

Cuernavaca, Morelos, a 02 de junio de 2025.

DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA
COORDINADORA DE LA MAESTRÍA EN
SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Diseño y Desarrollo de un Sistema de Data Logger Basado en loT para el Monitoreo de Parámetros en Sistemas Fotovoltaicos., que presenta el estudiante Rafael Yoel Chávez Ravelo, para obtener el grado de la Maestría en Sustentabilidad Energética.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO.**

Atentamente
Por una humanidad culta

(Se adiciona efirma UAEM)

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
DR. ROBERTO ALAN BELTRÁN VARGAS
DR. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2025-06-03 13:15:08 | FIRMANTE

JEJ4jQm/mitegmjyJ2ycqDI2tTTAIbnXFEbeEeW/zbE5ZLMujSeSy/ZIzbeGLHZcRXEj9m2gcZ4gIk3y15AeM7bxyiAnmd3avuHEK5b+Ao3AeOnT2KB1hyAAJnyIDK2tvZyTvFWD6oT7t7qxMeZq9G/rtjpXj55Gfv1Y5N9DHB8a07vK9OI79z3vbNefshxSGCHh37GgbXBV6JcX7E3m8SXLtpUwK86SOG4F1wCTp4jobYiUcqMZDcIR1U2nK+Wtcv8K58t7Yg2TL8ExKiLSgAbPPsxEpuQ+NoTHteLBELHLU45gkKtinbr7PsUZU4TRESKETQXm0xf+nBhwXdItIA==

ROBERTO ALAN BELTRAN VARGAS | Fecha:2025-06-03 13:15:34 | FIRMANTE

ioscBUplTZc8gARHyYJ89QC6nh6ozTq+J2TGiVV0TWFE64td7bY4tSCxy2Xd5zzyhzKyYvO4MTuAKaYnkhLgKfbFi2MxSKG2m4D3R7qjoUMmSLoyORtdrVOGXe5+2YQxxCpll5jj/QTd5E8gC6XX8FcyR00UZXjJ7TbDiQ9d3FoQr9GwCayBfQTUEiaApUyqU4UcDKL2r/PSHoaMhV2hfVjPTuT/tyMtubIaWZlSDoNBddoeY75+9x8/WOMRp5MX1BXgnJIsO7KbAQoXamaU0UMJAe/6/6EW19eUISdCkzNdPHcU033xFuIvekIykRrlD0aoNbmUfA9l39aTxFb6Ig==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2025-06-04 11:01:57 | FIRMANTE

GtCbTEeRl6kLmrpjqDolEQggK5q8h+yfusOD3lzVrSx+lPsh4Ihrui+tuq2csA/Vay41VkG2bMY/DS5+tR4iGdUcu/rzzv5LCv2wfN8omnfvH9NbybCyz+5BId4i4V1KRuDi/kWrHqKYMBKkr242sru8WyIh2GjdqqwoN85J+RKO4hZ808C4a6M/Ah6zCAFQq3tVB1T7+vRCIBV8BBztZr4UDGsUhMSWZtryRsIQWkbflQRPr1am9A3bBoYOFPl53wfbnElW2VnQI05aWeeyadKwtSA07HAEkIHV2ZbmRxTPy9Kq1zTlI6AtzP81HF/vmRVzUxGdvksfHAc9XN8uXQ==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2025-06-04 13:58:02 | FIRMANTE

OZUO4nupBQTqmyHqTChVm9p+KYjIoldxxbFXA8hWK1aB1qxXzc6sXXlTuZFwaBFDwFSWp6Mk9RDRytrZp6Be2Gz+Q6q3QEvGjYpbX3KEtwAq67UeBcQy7Y6i8WHw/JO8BM9nPZQGTbxJ40fs+Mu7E0K8ZNM3fioWc0ID+wG9G8o1PAEV6fhPyVpedbg33G/LMQ4dLwZs6YVVQVnfP9ZV32iZZCx0iISc+IFezKkrUCrQ3FBuqlyv5JK3WY4mEuqKVIwSVrJjyWiFaJgD4i1axbmxnaDC17ZyS80AlzXjOURjug+60upbITznjL5nCgwgfJr3AWl4FGwI9KjlpHwHhg==

DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2025-06-05 23:27:07 | FIRMANTE

kTPrV8kfbITIl2NJ7HlJcdkUhfthmsdLvcnGm5TV4emzMjB09xP9hrkRHjZg/eaEdwGQiJd6gKJ5bo0mB7I2QvmTCYSyU4Z29p5L1gx9AgIllacScMl6zwsBK2SiBdzqrmPA/WGqlNvrB4ukZ4U/aKY4m6bYhAppKzyEJpEW52EWSoAQDgsbSJY44TjAVWb+QHpdei7/lOftwOG3/EjMQCXP1iY4sGCrYolMvfOsLwcXDfvVpEa8MlibepfScRpBH9EXt3KCEDWc5jecq1ij8ZG7t9107nFKA4PKGJlkAgBsPnUDS/7S/HVhLMyxqLFn5YjJcmr980rshWXx2mRN8g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

ehUbdzcxa

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/w0XQosXR4hs2O9bh14QmNGQuyvw9G5ej