

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto IoT de
parámetros para un sistema fotovoltaico aislado

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en electrónica y automatización

Presentado por:

Edwin Vidal Zarria Totoy

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron al desarrollo de este proyecto de manera directa o indirecta con sus ideas y conocimientos en la ejecución de este proyecto. Su aporte ha sido invaluable para la culminación de esta etapa.

Extiendo mi gratitud a mi familia, por su amor, comprensión y motivación constante. Su apoyo inquebrantable fue mi mayor fuente de inspiración en los momentos de mayor desafío.

Agradezco al personal docente en especial a mi tutor el Ingeniero Ronald Solís por su disposición y asistencia a lo largo de este trayecto.

A todos, ¡gracias!

Declaración Expresa

Yo/Nosotros *Edwin Vidal Zarria Totoy* acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de febrero el 2023.



Autor

EVALUADORES

.....

Ing. Efrén Herrera
PROFESOR DE LA MATERIA

.....

Ing. Ronald Solís
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El proyecto "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto IoT de parámetros para un sistema fotovoltaico aislado" tiene como objetivo desarrollar una solución eficiente y accesible para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos aislados. Utilizando un ESP32 T-Call SIM800L, sensores específicos y la plataforma ThingSpeak, el sistema permite la recolección, transmisión y análisis de datos en tiempo real.

El sistema mide variables como voltaje, corriente y temperatura de los paneles solares, la batería y el inversor. Implementa un algoritmo de detección de alertas que envía notificaciones por SMS cuando los valores exceden los umbrales predefinidos, garantizando una supervisión operativa del sistema.

Durante el desarrollo, se configuraron protocolos de comunicación como WiFi y GSM, priorizando el uso de WiFi para minimizar costos y consumo energético, con una alternativa GSM en caso de falla de la conexión WiFi. Se implementó el protocolo MQTT para la transmisión de datos a la nube, y se optimizó el consumo energético al desactivar la conectividad cuando no es necesaria.

Los resultados obtenidos en pruebas de campo demuestran la precisión de las mediciones, la fiabilidad de la comunicación y la rapidez de respuesta de alertas SMS. Además, se verificó la estabilidad del sistema en diferentes condiciones operativas.

El proyecto proporciona una base para el desarrollo de soluciones escalables en la gestión de sistemas fotovoltaicos, permitiendo futuras mejoras como la integración de algoritmos de predicción, almacenamiento de datos en la nube y el desarrollo de una aplicación móvil para mejorar la interacción del usuario.

Palabras clave: IoT, Monitoreo Remoto, Energía Solar, ESP32, SIM800L

ABSTRACT

The project "Design and Implementation of a Remote IoT Monitoring System for an Isolated Photovoltaic System" aims to develop an efficient and accessible solution for monitoring off-grid photovoltaic systems. Using an ESP32 T-Call SIM800L, specific sensors, and the ThingSpeak platform, the system enables real-time data collection, transmission, and analysis.

The system measures variables such as voltage, current, and temperature from solar panels, the battery, and the inverter. It implements an alert detection algorithm that sends SMS notifications when values exceed predefined thresholds, ensuring operational supervision of the system.

During development, WiFi and GSM communication protocols were configured, prioritizing WiFi usage to minimize costs and energy consumption, with GSM as a backup in case of WiFi failure. The MQTT protocol was implemented for cloud data transmission, and energy consumption was optimized by disabling connectivity when not needed.

The results obtained from field tests demonstrate measurement accuracy, communication reliability, and fast SMS alert response. Additionally, the system's stability was verified under different operating conditions.

This project provides a foundation for scalable solutions in photovoltaic system management, allowing for future improvements such as integration of predictive algorithms, cloud data storage, and the development of a mobile application to enhance user interaction.

Keywords: IoT, Remote Monitoring, Solar Energy, ESP32, SIM800L

Índice General

CAPITULO 1.....	12
1. INTRODUCCIÓN	12
1. 1. Descripción del problema	12
1. 2. Justificación del problema.....	12
1. 3. Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo General.....	12
1.3.2. Objetivos Específicos	12
1. 4. Marco teórico	13
1.4.1. Antecedentes.....	13
1.4.2. Internet of Things – Internet de las Cosas (IoT).....	15
1.4.3. Tarjeta de desarrollo ESP32.....	15
1.4.4. Comunicación GSM/GPRS.....	16
1.4.5. Módulo SIM800L	16
CAPÍTULO 2.....	17
2. 1. Formulación de Alternativas de Solución	17
2.1.1. Alternativa 1.....	17
2.1.2. Alternativa 2.....	19
2. 2. Diseño Conceptual.....	20
2. 3. Diseño Detallado.....	22
2.3.1. Metodología de Diseño.....	22
2.3.2. Diagrama del Circuito	25
2.3.3. Descripción del funcionamiento del circuito	27
2. 4. Diseño de software	30
2. 5. Diagrama de Flujo del Sistema	33
2. 6. Flujo de Funcionamiento del Sistema	35
2.6.1. Normativas Aplicadas	37
CAPÍTULO 3.....	38
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
3. 1. Implementación del Sistema de Monitoreo	38
3.1.1. Componentes Utilizados.....	38
3. 2. Pruebas y validación.....	39
3.2.1. Pruebas de hardware	39
3.2.2. Pruebas de comunicación	40
3.2.3. Pruebas de funcionamiento integral	40

3. 3. Resultados del Sistema de Monitoreo Remoto IoT	43
3.3.1. Precisión de las Mediciones	43
3.3.2. Fiabilidad de la Comunicación	45
3.3.3. Tiempo de Respuesta de Alertas.....	46
3.3.4. Optimización del Consumo Energético	47
CAPÍTULO 4.....	49
4. 1. Conclusiones	49
4. 2. Recomendaciones	51
BIBLIOGRAFIA	41

ABREVIATURAS

IoT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
ESP32	Microcontrolador de Espressif Systems
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
RMS	Root Mean Square (Valor Eficaz)
SoC	State of Charge (Estado de Carga)
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Continua
SIM800L	Módulo de comunicación GSM/GPRS
DS18B20	Sensor de temperatura digital
ACS712	Sensor de corriente basado en efecto Hall
ZMPT101B	Sensor de medición de voltaje AC
WiFi	Wireless Fidelity (Conectividad inalámbrica)
OLED	Organic Light-Emitting Diode (Diodo Orgánico Emisor de Luz)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso)
ADC	Analog-to-Digital Converter (Convertidor Analógico-Digital)

SIMBOLOGÍA

V	Voltaje
A	Corriente
W	Potencia
Ω	Ohmios
°C	Celsius
Hz	Hertz
Vrms	Voltaje RMS (V)
Wh	Vatios hora

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Detalle estado de carga y voltaje	24
Tabla 2. Detalle resultados obtenidos en pruebas de campo.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de conexión	14
Figura 2. Diagrama alternativa 1	18
Figura 3. Diagrama alternativa 2	19
Figura 4. Diagrama de flujo del sistema	34
Figura 5. Graficas de medición	42
Figura 6. Panel de visualización en ThingSpeak	44
Figura 7. integración del ESP32 T-Call SIM800L, sensores y el sistema de transmisión de datos	46
Figura 8. SMS enviados por el sistema alertando	47
Figura 9. Caja del sistema con pantalla OLED	48

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1. 1. Descripción del problema

Trocetti S.A., en Guayaquil, ha desarrollado un kit fotovoltaico aislado para abordar los cortes de energía en Ecuador. Sin embargo, enfrenta el desafío de garantizar un soporte continuo al cliente tras la instalación. La falta de un sistema de monitoreo eficiente limita la gestión del sistema, dificultando la detección de fallas y la planificación de mantenimientos. Esta deficiencia no solo afecta la satisfacción del cliente, sino que también compromete la eficiencia y durabilidad del sistema, poniendo en riesgo la reputación de la empresa. Por lo tanto, es crucial desarrollar una solución de monitoreo accesible que permita a la empresa mantener una relación activa con sus clientes y optimizar la gestión del sistema para asegurar su rendimiento a largo plazo.

1. 2. 1Justificación del problema

El desarrollo de este sistema de monitoreo remoto permite identificar patrones de uso y necesidades de los clientes, lo que contribuye a ofrecer un servicio posventa más efectivo y a generar nuevas oportunidades de negocio, como actualizaciones o ampliaciones del sistema. En conjunto, este enfoque mejora la satisfacción del cliente y fortalece la posición de la empresa en el mercado de soluciones fotovoltaicas aisladas.

1. 3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo remoto IoT utilizando una tarjeta ESP32 para un sistema fotovoltaico aislado, con el fin de optimizar su rendimiento y la gestión de información del consumo energético a los usuarios.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un módulo de recolección de datos que utilice la tarjeta ESP32 para monitorizar en tiempo real parámetros críticos del sistema fotovoltaico, como voltaje, corriente y potencia.

- Crear una interfaz de usuario mediante plataformas de IoT que permita a los usuarios visualizar y analizar los datos recopilados, facilitando la toma de decisiones informadas sobre su consumo energético y el mantenimiento del sistema.
- Implementar un sistema de alertas y notificaciones que, mediante la conexión del ESP32, informe a los usuarios sobre posibles fallas o necesidades de mantenimiento, para optimizar la operación del sistema y reducir costos a largo plazo.

1. 4. Marco teórico

1.4.1. Antecedentes

En Ecuador, el uso de sistemas fotovoltaicos ha crecido, especialmente en áreas rurales y costeras con limitada cobertura eléctrica, así como en ciudades como Guayaquil, donde las frecuentes interrupciones del servicio impulsan su adopción. Sin embargo, un desafío crítico es el monitoreo eficiente, ya que, al no estar conectados a la red, la gestión de la información depende de herramientas locales de supervisión.

Un caso significativo en el sector privado es el de Enel X, una filial del Grupo Enel en Chile. La empresa ha implementado un sistema de monitoreo avanzado para sus instalaciones solares, que permite supervisar en tiempo real el rendimiento energético. Este sistema proporciona datos sobre generación y consumo, y utiliza análisis predictivo para anticipar fallas y optimizar el mantenimiento, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo costos.

En Brasil, el Programa de Energía Solar de la Universidad de São Paulo (USP) es un caso destacado. La universidad implementó un sistema de monitoreo en tiempo real que permite visualizar datos sobre generación y consumo, facilitando la detección de fallas y el análisis del rendimiento en diversas condiciones climáticas. Esto ha llevado a una reducción significativa de costos energéticos y proporciona un modelo para otras instituciones, promoviendo la adopción de tecnologías solares en la región.

Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es una fuente de energía renovable que convierte la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de paneles solares. Este proceso se basa

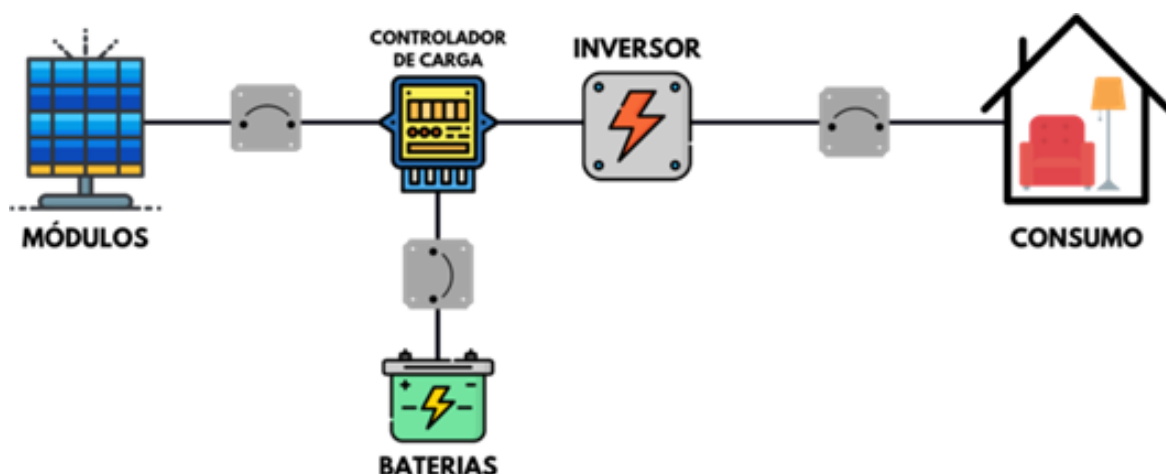
en el efecto fotovoltaico, donde ciertos materiales semiconductores, al recibir luz solar, generan una corriente eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en:

- Sistemas conectados a la red (On-Grid)
- Sistemas aislados (Off-Grid)
- Sistemas fotovoltaicos aislado

Los sistemas fotovoltaicos aislados son instalaciones solares independientes que no se conectan a la red eléctrica convencional. Estos sistemas permiten la generación de energía en zonas donde no es posible acceder al servicio público o donde se busca reducir la dependencia del mismo. Están compuestos principalmente por:

- **Paneles solares:** Capturan la radiación solar y la convierten en electricidad.
- **Controladores de carga:** Regulan la energía almacenada en baterías, evitando sobrecargas.
- **Inversores:** Transforman la energía en corriente alterna (CA) para el uso doméstico o comercial.
- **Baterías:** Almacenan la energía generada para su uso posterior.

Figura 1. Diagrama de conexión de un sistema fotovoltaico aislado.



1.4.2. Internet of Things – Internet de las Cosas (IoT)

Internet of Things o Internet de las Cosas se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo que recopilen, intercambien y procesen datos sin intervención humana directa. Estos dispositivos pueden ser sensores, electrodomésticos, vehículos, máquinas industriales, entre otros, que envían información a servidores o plataformas en la nube para su gestión y análisis.

- **Sensores o Dispositivos Inteligentes:** Recogen información del entorno (como temperatura, movimiento, humedad, energía consumida, etc.).
- **Conexión:** Los dispositivos se conectan a internet mediante Wi-Fi, Bluetooth, GSM/GPRS, o LoRa.
- **Procesamiento de Datos:** Los datos recopilados se envían a servidores o plataformas en la nube para su análisis.
- **Toma de Decisiones:** Con base en los datos procesados, el sistema puede generar alertas, ejecutar acciones automáticas o sugerir mantenimiento.
- **Interacción Remota:** Los usuarios pueden acceder y controlar los dispositivos desde cualquier parte del mundo mediante aplicaciones o plataformas web.

1.4.3. Tarjeta de desarrollo ESP32

La ESP32 es un microcontrolador desarrollado por Espressif Systems esta placa de desarrollo se destaca por su versatilidad, bajo costo y eficiencia energética.

- **Microprocesador de doble núcleo:** Arquitectura basada en dos núcleos Xtensa LX6 a 160 o 240 MHz.
- **Conectividad Wi-Fi y Bluetooth:** Integrado con Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 (BLE y clásico).
- **Soporte para periféricos:** Ofrece múltiples pines GPIO con interfaces como SPI, I2C, UART y ADC/DAC.
- **Bajo consumo de energía:** Tiene modos de ahorro energético (deep sleep y light sleep).
- **Memoria:** Hasta 520 KB de SRAM y 4 MB de memoria Flash.

1.4.4. Comunicación GSM/GPRS

GSM (Global System for Mobile Communications): Estándar internacional para la comunicación móvil. Fue desarrollado para proporcionar comunicación de voz y datos mediante redes celulares. Es la tecnología utilizada por la mayoría de las operadoras móviles a nivel mundial para facilitar llamadas, mensajes SMS y servicios básicos de transmisión de datos.

GPRS (General Packet Radio Service): Extensión del sistema GSM que permite la transmisión de datos mediante paquetes, lo que facilita el acceso a internet en redes 2G. Aunque no ofrece velocidades comparables a tecnologías más modernas (como 3G o 4G), GPRS es eficiente para enviar y recibir pequeñas cantidades de datos.

1.4.5. Módulo SIM800L:

El SIM800L es un módulo de comunicación GSM/GPRS que permite la transmisión de datos mediante redes celulares. Este módulo es ideal para sistemas que requieren conectividad en áreas donde la red Wi-Fi es limitada o no está disponible. Sus características principales son:

- Soporte para mensajes SMS y transmisión de datos a través de GPRS.
- Bajo consumo de energía, para su uso en sistemas autónomos.
- Compatible con tarjetas microSIM, lo que facilita su conexión con redes móviles.
- Rango de operación global, permitiendo su uso con diferentes operadores de telecomunicaciones.
- Integración del SIM800L con la ESP32

MQTT (Message Queuing Telemetry TransportGeneral Packet Radio Service):

MQTT es un protocolo de mensajería basado en estándares, o un conjunto de reglas, que se utiliza para la comunicación de un equipo a otro. Los sensores inteligentes, los dispositivos portátiles y otros dispositivos de Internet de las cosas (IoT) generalmente tienen que transmitir y recibir datos a través de una red con recursos restringidos y un ancho de banda limitado. Estos dispositivos IoT utilizan MQTT para la transmisión de

datos, ya que resulta fácil de implementar y puede comunicar datos IoT de manera eficiente. MQTT admite la mensajería entre dispositivos a la nube y la nube al dispositivo.

CAPÍTULO 2

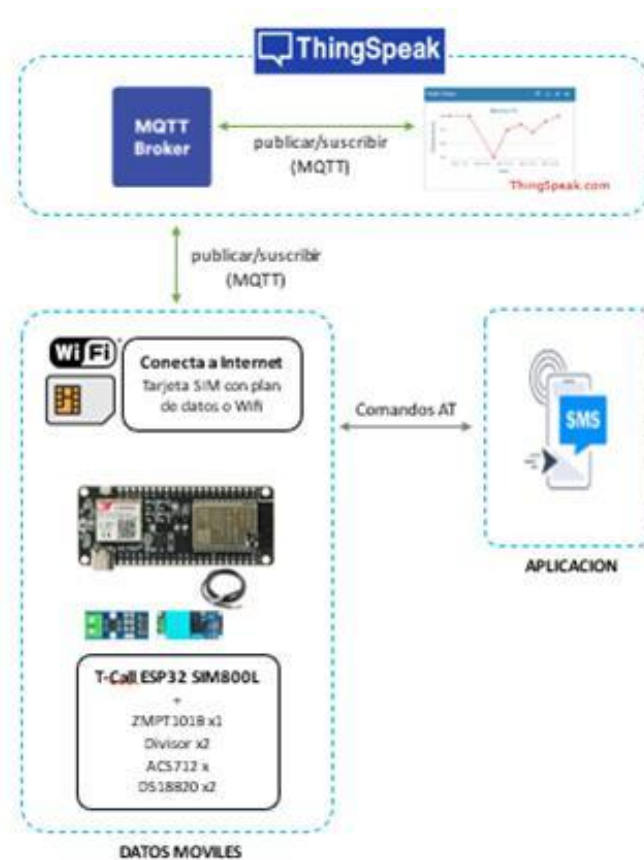
2. 1. Formulación de Alternativas de Solución

Con base en el problema identificado en el Capítulo 1, se propusieron dos alternativas principales para desarrollar un sistema de monitoreo remoto IoT que optimice la gestión y el rendimiento de sistemas fotovoltaicos aislados. Estas alternativas presentan configuraciones tecnológicas y metodologías de implementación diferenciadas:

2.1.1. Alternativa 1

La primera alternativa propone el uso del módulo ESP32 SIM800L conectado a la red mediante una tarjeta SIM con plan de datos o Wi-Fi, integrando sensores para la recolección de datos. Los datos son enviados al protocolo MQTT a través de un broker, para luego visualizarse en la plataforma ThingSpeak. Además, se incorpora un sistema de notificaciones mediante mensajes SMS que informe sobre fallas o eventos críticos.

Figura 2. Diagrama alternativa 1



Componentes principales:

- Microcontrolador T-Call ESP32 SIM800L.
- Sensores de monitoreo (ACS712-30A, divisores de voltaje, DS18B20, ZMPT101B).
- Protocolo de comunicación MQTT.
- Plataforma IoT: ThingSpeak (cuenta gratuita estándar).
- Notificaciones SMS para alertas críticas.

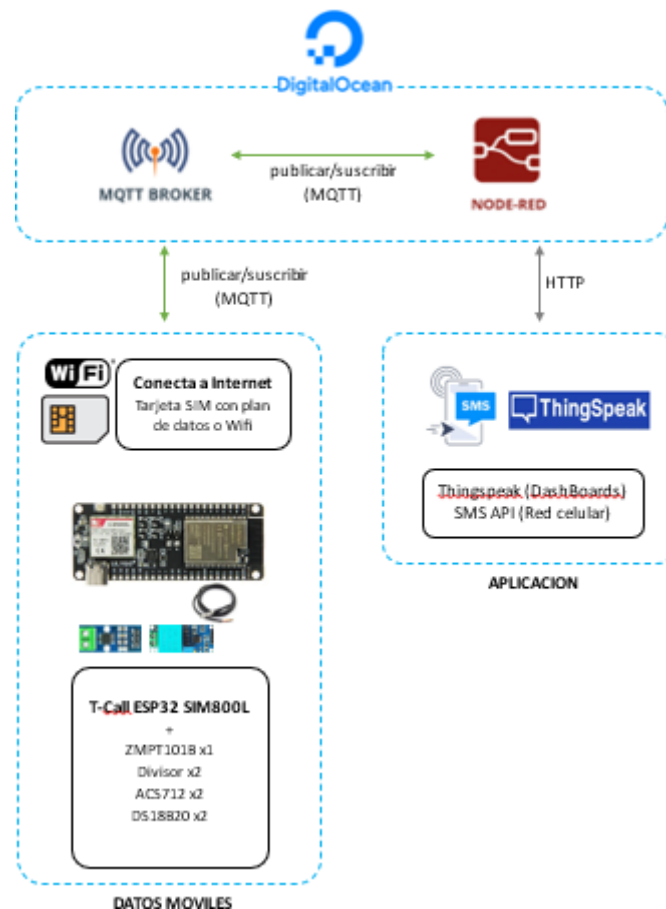
Funcionamiento general:

El sistema envía valores de medición al dashboard cada hora para optimizar recursos. Cuando los parámetros censados superan los límites establecidos, se activa una alerta SMS inmediata al usuario y las salidas de relé cortan el flujo de energía para prevenir daños.

2.1.2. Alternativa 2

La segunda alternativa incluye la integración del ESP32 SIM800L con la plataforma Node-RED, alojada en un servidor cloud (por ejemplo, DigitalOcean). En este diseño, los datos recopilados por los sensores serían procesados y visualizados en un dashboard personalizado, utilizando HTTP para las solicitudes hacia ThingSpeak. También se mantienen las notificaciones SMS

Figura 3. Diagrama alternativa 2



Componentes principales:

- Microcontrolador T-Call ESP32 SIM800L.
- Sensores de monitoreo (ACS712-30A, divisores de voltaje, DS18B20, ZMPT101B).
- Protocolo de comunicación MQTT.
- Plataforma IoT: Node-RED.

- Servidor cloud: DigitalOcean.
- Notificaciones SMS.

Consideraciones:

La Alternativa 2 incluye el costo adicional de un servidor cloud y generalmente requiere una Raspberry Pi para mantener el servidor Node-RED encendido 24/7, lo que incrementa los costos iniciales y operativos. Por ejemplo, el consumo energético de una Raspberry Pi 4 es de aproximadamente 15 kWh al mes, representando un costo adicional de energía de alrededor de 1.50 USD mensuales, sumado al mantenimiento del hardware.

Comparación y Selección de la alternativa

Se evaluaron ambas alternativas en función de los siguientes criterios:

- **Simplicidad en la implementación:** La Alternativa 1 es más directa debido al uso exclusivo de ThingSpeak.
- **Flexibilidad y escalabilidad:** La Alternativa 2 ofrece más opciones para personalización futura, teniendo en cuenta las limitaciones de la cuenta gratuita estándar de ThingSpeak.
- **Costo:** La Alternativa 1 tiene costos recurrentes menores, utilizando un plan gratuito estándar de ThingSpeak y evitando los costos adicionales de un servidor cloud y una Raspberry Pi.
- **Facilidad de mantenimiento:** ThingSpeak requiere menos mantenimiento que un servidor propio.

Selección: Se eligió la Alternativa 1, ya que cumple con los objetivos planteados y es más económica y sencilla de implementar, lo cual es crucial para el prototipo inicial del sistema.

2. 2. Diseño Conceptual

El diseño conceptual detalla la arquitectura del sistema basado en la Alternativa 1, que utiliza el microcontrolador ESP32 SIM800L y la plataforma ThingSpeak.

Descripción del funcionamiento del sistema

1. Recolección de datos:

- La corriente del módulo fotovoltaico es medida mediante el sensor ACS712-30A (hasta 30A).
- Los voltajes del módulo fotovoltaico y del banco de baterías (12V, 100Ah) son medidos mediante divisores de voltaje, que transforman un rango de 0-25V a 0-3.3V para ser procesados por el ESP32.
- La temperatura del banco de baterías y el módulo fotovoltaico se mide con el sensor DS18B20, que proporciona datos digitales precisos.
- El voltaje de salida del inversor que convierte de 12Vdc a 110Vac, es monitoreado utilizando el sensor ZMPT101B.

2. Procesamiento y almacenamiento:

- El ESP32 procesa los datos medidos y calcula parámetros como potencia y eficiencia.
- Los datos son enviados a ThingSpeak cada hora mediante una cuenta gratuita estándar. Los parámetros visualizados en el dashboard incluyen la potencia y la temperatura del módulo de paneles solares, la temperatura y el estado de carga (SoC) del banco de baterías, el voltaje DC del banco de baterías, así como el voltaje AC del inversor.

3. Alertas

- Si algún parámetro censado excede los límites establecidos, el sistema envía una alerta SMS al usuario mediante el SIM800L. Además, las salidas de relé cortan automáticamente el flujo de energía para prevenir daños.

Componentes Principales:

- Microcontrolador: ESP32 SIM800L.
- **Sensores:**
 - **Corriente:** ACS712-30A.

- **Voltaje:** Divisores de voltaje para el banco de baterías y el módulo fotovoltaico; ZMPT101B para monitoreo de voltaje AC en la salida del inversor.
- **Temperatura:** DS18B20.
- **Plataforma IoT:** ThingSpeak.
- **Notificaciones SMS:** A través de comandos AT en el SIM80

2. 3. Diseño Detallado

2.3.1. Metodología de Diseño

El desarrollo del sistema siguió las siguientes etapas:

1. **Recolección de requerimientos:** Identificación de necesidades específicas del cliente y las condiciones del sistema fotovoltaico.
2. **Selección de componentes:** Evaluación y adquisición de sensores, microcontroladores y relés.
3. **Integración de hardware:** Montaje y conexión de los componentes.
4. **Implementación de software:** Programación del ESP32 en Arduino IDE y configuración de ThingSpeak.
5. **Pruebas y validación:** Verificación del funcionamiento en condiciones reales.

Diseñado para un ESP32 con un módulo SIM800L y varios sensores conectados. Se encarga de: Medir temperatura, voltaje y corriente de los paneles solares, batería e inversor.

- Mostrar los datos en una pantalla OLED.
- Detectar si los valores están fuera de rango y enviar alertas por SMS.
- Enviar datos de medición a ThingSpeak mediante WiFi o GSM si WiFi no está disponible.
- Desconectar WiFi/GSM cuando no se necesita para ahorrar energía.

2.3.1.1. Cálculo del Voltaje (Divisor de Voltaje)

A continuación, se describen y justifican los principales cálculos:

Para medir el voltaje de la batería y los paneles solares sin exceder el rango de entrada del ESP32 (3.3V), se utiliza un divisor de voltaje, cuya ecuación es:

$$V_{salida} = V_{entrada} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Donde:

- $V_{entrada}$ es el voltaje real de la batería o panel solar.
- V_{salida} es el voltaje reducido compatible con el ADC del ESP32.
- R_1 y R_2 son los valores de los resistores en el divisor de voltaje.

2.3.1.2. Cálculo de Potencia

Para determinar la potencia generada por los paneles solares y la consumida, se usa la ecuación:

$$P = V \times I$$

Donde:

- P es la potencia en vatios (W).
- V es el voltaje en voltios (V).
- I es la corriente en amperios (A).

2.3.1.3. Cálculo del Voltaje RMS

El voltaje de salida del inversor (AC) se mide utilizando el sensor ZMPT101B y se calcula el voltaje RMS mediante:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}$$

Donde:

- N es el número de muestras tomadas en un período de tiempo.
- V_i son los valores instantáneos del voltaje AC.

2.3.1.4. Estado de Carga (SoC) de la Batería

El estado de carga (**SoC**) de la batería se estima a partir del voltaje medido, utilizando:

$$SoC = \frac{V_{batería} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100$$

Donde:

- $V_{batería}$ es el voltaje medido de la batería.
- V_{max} representa el 100% de carga.
- V_{min} representa la batería descargada (0%).

La Tabla 1 muestra la relación entre el voltaje medido y el estado de carga:

Tabla 1. Detalle estado de carga y voltaje

Estado de Carga (SoC)	Voltaje (V)
100%	13.8V
95%	13.3V
50%	13.15V
40%	13.13V
30%	13.1V
20%	12.95V
10%	12.8V
0%	11.5V

2.3.1.5. Frecuencia de Muestreo (Teorema de Nyquist)

Para las frecuencias de muestreo de las variables a medir se debe cumplir la condición:

$$f_s \geq 2 \times f_{\max}$$

En casos practicos es mas comun usar un factor de 10 veces la frecuencia maxima de la señal medida. Para el caso del voltaje rms se adapta el teorema para el numero de muestras de la siguiente forma:

$$N = f_s \times T$$

Donde:

- **N** número total de muestras
- **f_s** frecuencia de muestreo (Hz)
- **T** duración total de la adquisición (segundos)
- **f_{max}** frecuencia de la señal

2.3.2. Diagrama del Circuito

En esta sección se presenta el diseño esquemático del sistema de monitoreo remoto IoT para el sistema fotovoltaico aislado. El circuito está basado en el microcontrolador ESP32 T-Call SIM800L, encargado de la adquisición y transmisión de datos a la plataforma IoT seleccionada.

El sistema integra varios sensores y módulos clave para la medición de parámetros eléctricos y ambientales:

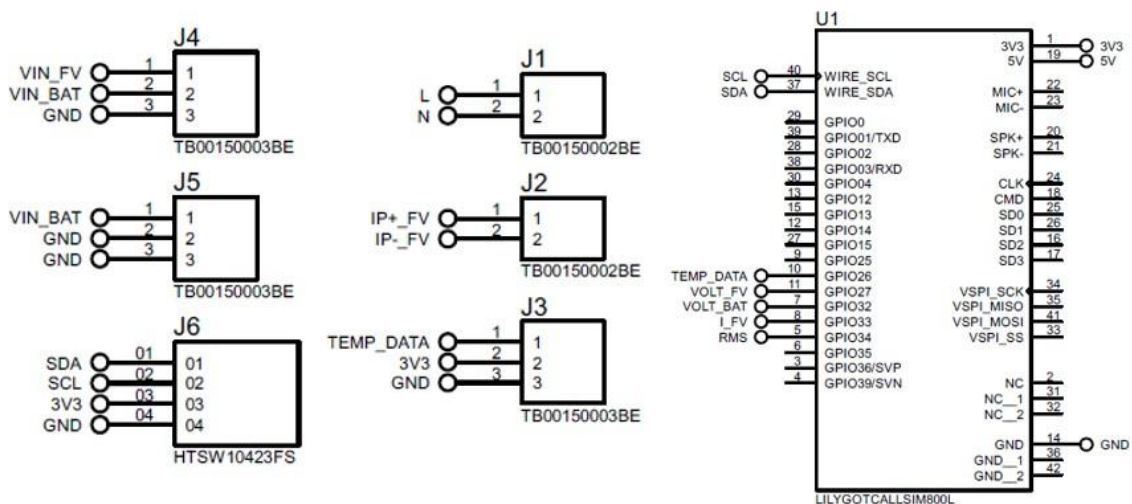
- **Sensor ACS712-30A:** Mide la corriente generada por los paneles solares.
- **Sensor ZMPT101B:** Captura el voltaje RMS de la salida del inversor.
- **Divisores de voltaje:** Permiten medir el voltaje de los paneles solares y la batería sin superar el rango admisible del ADC del ESP32.
- **Sensor de temperatura DS18B20:** Monitorea la temperatura del banco de baterías.

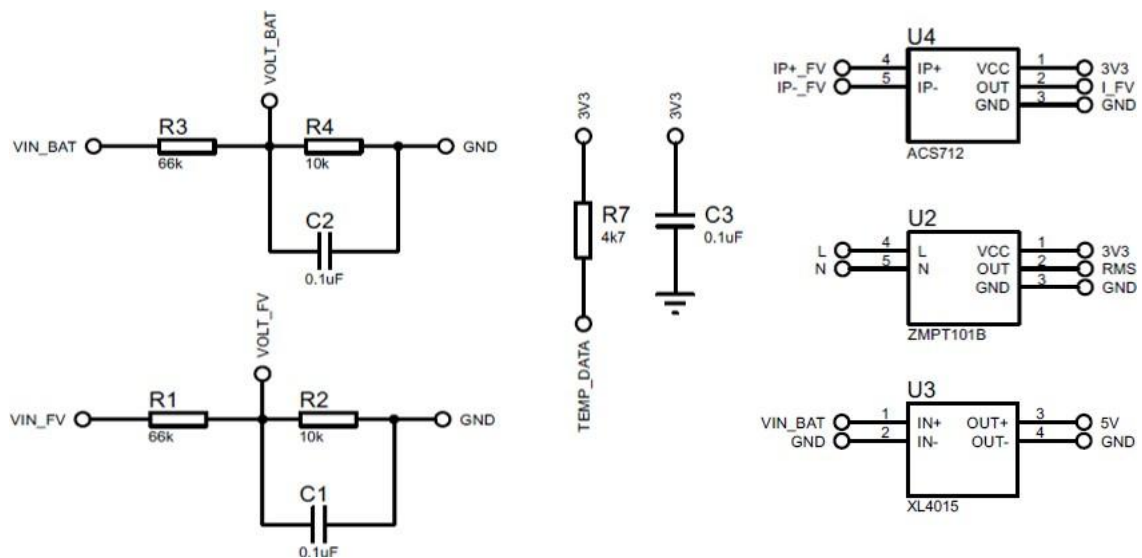
- **Módulo XL4015:** Regula la tensión de la batería para alimentar el sistema con 5V.
- **Interfaz de comunicación I2C:** Utilizada para la transmisión de datos desde los sensores hacia el ESP32.

El diseño del circuito está compuesto por múltiples bloques funcionales, organizados en la siguiente estructura:

- **Módulo de alimentación:** Conversión y regulación de voltaje para el ESP32 y sensores.
- **Módulo de medición:** Captura de variables eléctricas (voltaje, corriente y temperatura).
- **Módulo de comunicación:** Conexión entre sensores y microcontrolador, con interfaces I2C y UART.
- **Módulo de transmisión:** Envío de datos a la nube a través de MQTT utilizando el SIM800L.

A continuación, se presentan los diagramas esquemáticos detallados del circuito, donde se pueden observar las conexiones entre los diferentes componentes y su integración con el ESP32.





2.3.3. Descripción del funcionamiento del circuito

Este circuito está diseñado para el monitoreo remoto de un sistema fotovoltaico aislado, utilizando como unidad central de procesamiento el ESP32 T-Call SIM800L. Su función principal es recolectar datos clave sobre el estado del sistema fotovoltaico, procesarlos y transmitirlos a una plataforma IoT para su visualización y análisis.

El sistema integra sensores de corriente, voltaje y temperatura, los cuales permiten evaluar el rendimiento del sistema en tiempo real. Además, se implementa un módulo de comunicación inalámbrica, que alterna entre WiFi y GSM según la disponibilidad de red, asegurando una conectividad continua.

2.3.3.1. Componentes Principales y su Función

1. Microcontrolador (ESP32 T-Call SIM800L)

- Actúa como la unidad central del sistema, gestionando la adquisición, procesamiento y transmisión de datos.
- Integra WiFi y GSM, lo que permite enviar datos a una plataforma IoT (como ThingSpeak) y recibir comandos remotos.
- Controla la comunicación con la pantalla OLED, donde se visualizan las mediciones en tiempo real.

- Implementa un sistema de alertas SMS que notifica al usuario en caso de valores anómalos.

2. Sensores de Monitoreo

Los sensores conectados al ESP32 permiten medir parámetros eléctricos y ambientales críticos:

- **ACS712-30A (U4):** Sensor de corriente encargado de medir la cantidad de energía generada por los paneles solares. Su señal de salida es proporcional a la corriente detectada en la línea.
- **ZMPT101B (U2):** Sensor de voltaje de corriente alterna (AC), empleado para monitorear la salida del inversor y garantizar que los valores de voltaje estén dentro de los rangos permitidos.
- **Divisores de voltaje (R1, R2, R3, R4, C1, C2):** Reducen los niveles de voltaje de los paneles solares y las baterías para que sean compatibles con el rango de entrada del ADC del ESP32.
- **DS18B20 (J6):** Sensor de temperatura utilizado para monitorear el banco de baterías y los paneles solares. Opera con el protocolo One Wire y requiere una resistencia pull-up de 4.7kΩ para su correcto funcionamiento.

3. Módulo de Regulación de Voltaje (XL4015)

- Actúa como regulador step-down para reducir la tensión del banco de baterías (12V-24V) a 5V, asegurando un suministro estable para el ESP32 y otros componentes electrónicos.
- Garantiza la correcta alimentación de los sensores y módulos sin comprometer la eficiencia energética del sistema.

2.3.3.2. Funcionamiento del circuito

1. Adquisición de Datos

El sistema recoge información de los sensores a intervalos regulares, asegurando un monitoreo continuo:

- Corriente generada por los paneles solares es medida con el sensor ACS712.
- Voltajes del sistema son capturados mediante los divisores de voltaje conectados a los terminales de los paneles solares y la batería.
- Voltaje de salida del inversor es monitoreado con el ZMPT101B, permitiendo detectar variaciones que puedan afectar el desempeño del sistema.
- Temperatura del banco de baterías y paneles es registrada con el sensor DS18B20, evitando sobrecalentamientos que puedan dañar el sistema.

2. Procesamiento y Comunicación

- El ESP32 procesa los datos recibidos de los sensores, aplicando correcciones y cálculos necesarios para obtener valores en unidades comprensibles.
- Los datos son transmitidos a la nube a través de MQTT mediante WiFi. En caso de falla en la conexión WiFi, el sistema cambia automáticamente a GSM para garantizar la transmisión de datos.
- Visualización local: Los valores medidos se presentan en una pantalla OLED, permitiendo a los usuarios verificar las mediciones sin necesidad de acceder a la plataforma en línea.

3. Almacenamiento y Monitoreo Remoto

- Los datos se envían a ThingSpeak, donde pueden ser consultados en tiempo real a través de una interfaz web.
- Si los valores medidos superan los umbrales establecidos, el sistema activa una alerta SMS mediante el módulo SIM800L, informando al usuario sobre la anomalía detectada.

4. Fuente de Alimentación

- El módulo XL4015 ajusta la tensión de salida del banco de baterías a 5V, asegurando un suministro estable para el ESP32 y los sensores.
- Los divisores de voltaje permiten obtener mediciones precisas de la batería y los paneles solares sin comprometer la seguridad del ESP32.

2. 4. Diseño de software

La programación del ESP32 T-Call SIM800L se realizó en Arduino IDE, utilizando librerías especializadas para la gestión de sensores, conexión MQTT y comunicación con el módulo SIM800L. Las funcionalidades principales desarrolladas fueron:

- **Adquisición de datos:** El ESP32 toma lecturas de los sensores cada 5 segundos.
- **Cálculo del estado de carga (SoC):** Se determina el SoC de la batería utilizando interpolación lineal basada en la tabla de voltaje OCV (González et al., 2019).
- **Envío de datos a ThingSpeak:** Mediante el protocolo MQTT, con un intervalo de transmisión de 1 hora, excepto en caso de alerta.
- **Sistema de Alertas SMS:** Se envía un mensaje inmediato si los valores medidos superan los límites predefinidos.
- **Visualización en Pantalla OLED:** Los valores medidos se muestran en una pantalla OLED cada 5 segundos.

El código desarrollado permite al ESP32 monitorear voltaje, corriente y temperatura de los paneles solares, la batería y el inversor. Además, optimiza el consumo energético desconectando la conexión WiFi/GSM cuando no es necesario.

El código implementado realiza las siguientes tareas clave:

- **Medición de parámetros eléctricos:** Voltaje, corriente y temperatura de los paneles solares, voltaje y temperatura del módulo de batería y voltaje del inversor.
- **Cálculo del SoC:** Determina el Estado de Carga de la batería con base en una tabla de referencia.
- **Cálculo del voltaje RMS:** Utiliza el sensor ZMPT101B para medir el voltaje RMS del inversor.
- **Visualización local:** Muestra los valores en la pantalla OLED cada 5 segundos.

- **Envío de datos:** Publica mediciones en ThingSpeak mediante WiFi o GSM (SIM800L).
- **Sistema de alertas:** Envío inmediato de SMS en caso de valores fuera de rango.
- **Optimización del consumo de energía:** Desconecta WiFi/GSM cuando no es necesario.

Integración con ThingSpeak y MQTT

El sistema utiliza MQTT como protocolo de mensajería ligera para la comunicación entre el ESP32 y ThingSpeak, garantizando una transmisión de datos eficiente y de bajo consumo energético. MQTT permite la conexión entre dispositivos IoT mediante un modelo publish-subscribe, donde el ESP32 actúa como cliente publicador de los siguientes datos:

- Potencia DC generada por el panel solar.
- Temperatura del panel solar.
- Estado de Carga (SoC) de la batería.
- Voltaje DC de la batería.
- Temperatura de la batería.
- Voltaje RMS del inversor.

El servidor ThingSpeak actúa como el broker MQTT, recibiendo los datos y almacenándolos para su análisis. MQTT es ideal para este sistema por su bajo uso de ancho de banda y capacidad de funcionar en redes de baja velocidad.

Implementación de Alertas SMS

El sistema de monitoreo cuenta con un sistema de alertas mediante SMS para notificar condiciones anómalas. El módulo SIM800L se configura para enviar estos mensajes mediante comandos AT. Los mensajes siguen el siguiente formato:

Formato de Alerta SMS:

Cada medición obtenida de los sensores es comparada con los valores permitidos:

- Si el valor medido es **menor que el límite inferior**, se considera **debajo del umbral permitido**.
- Si el valor medido es **mayor que el límite superior**, se considera **por encima del umbral permitido**.

Cuando ocurre cualquiera de estas condiciones, el sistema **activa una alerta** y cada alerta detectada es identificada mediante un código específico que proporciona información clave sobre el evento. Este código tiene una estructura de tres caracteres:

- **Primer carácter:** Tipo de variable monitoreada (Temperatura, Voltaje o Corriente).
- **Segundo carácter:** Origen de la medición (Panel Solar/P, Batería/B o Inversor/I).
- **Tercer carácter:** Tipo de señal (0 = sin especificar, 1 = AC, 2 = DC).

Por ejemplo, el código **"VB2"** significa:

- **V** → Voltaje.
- **B** → Batería.
- **2** → Corriente directa (DC).

Este código es útil para identificar rápidamente qué sensor ha activado la alerta y en qué equipo ocurrió. Después de identificar el código de la variable afectada, se determina si la medición está por encima o por debajo del umbral permitido:

- Si el valor está por debajo del mínimo permitido, se asigna la etiqueta **"SU"** (Sub-umbral).
- Si el valor está por encima del máximo permitido, se asigna la etiqueta **"SO"** (Sobre-umbral).

Por ejemplo, si el voltaje de la batería cae por debajo de 11.5V, el código de alerta será **"VB2-SU"**, indicando que el voltaje DC de la batería está por debajo del límite permitido.

Una vez determinado el código de la alerta y el estado del sensor, se genera un mensaje estructurado que contiene la siguiente información:

- Código de alerta generado.
- Descripción del problema indicando qué variable ha superado los límites y en qué equipo ocurrió.
- Valor actual medido para que el usuario pueda evaluar la gravedad de la condición.

Por ejemplo, si el voltaje de la batería desciende a 11.4V, el mensaje generado será:

Alerta: VB2-SU

Voltaje DC de Batería debajo del límite permitido.

Valor actual: 11.4V

El mensaje generado es enviado automáticamente a través del módulo SIM800L, que permite enviar SMS a un número preconfigurado. Esto garantiza que el usuario sea notificado inmediatamente si hay una condición anómala en el sistema fotovoltaico.

Después de enviar el mensaje, la función retorna un estado true o false:

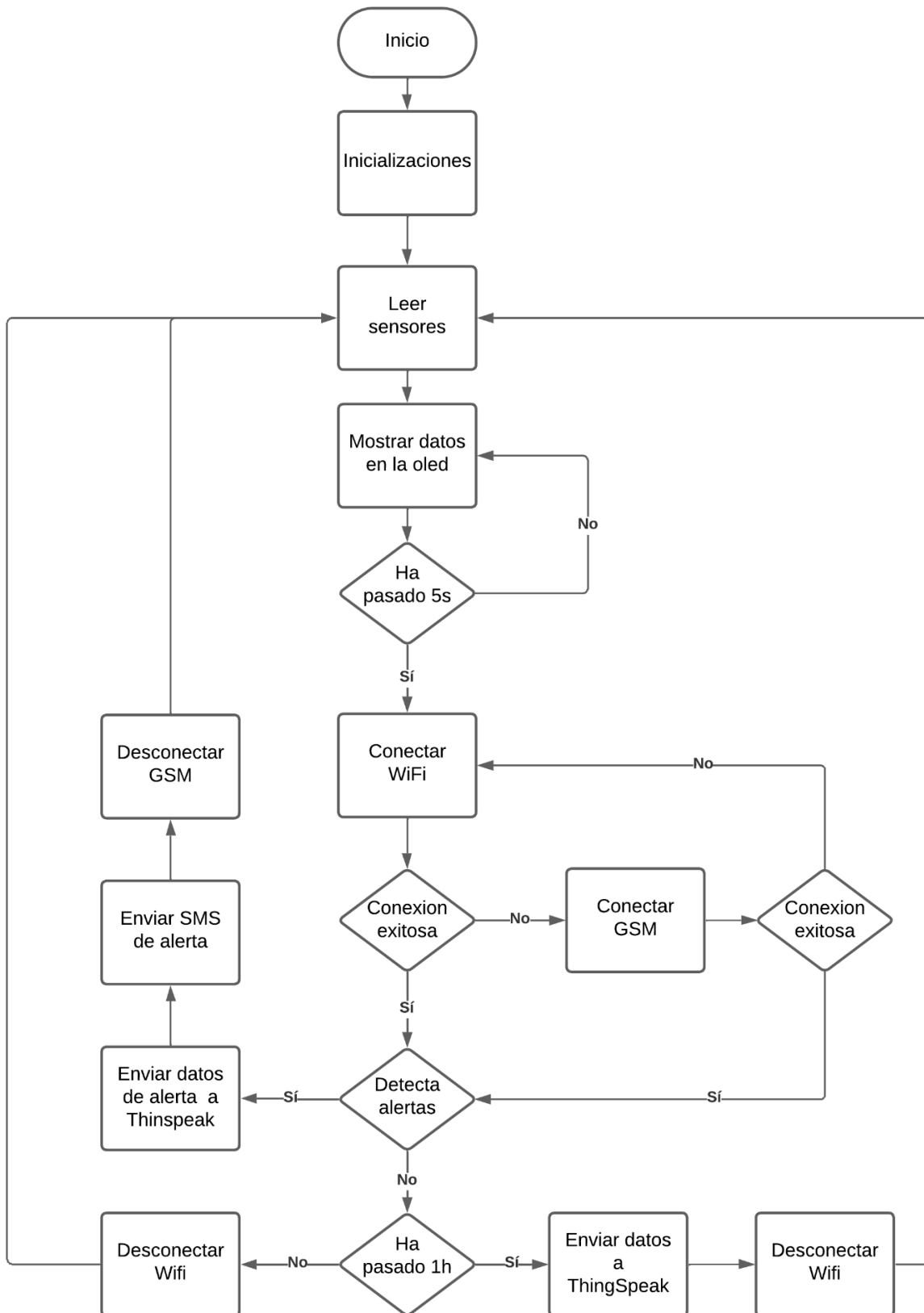
- **True** → Se detectó una alerta y se envió un SMS.
- **False** → No hubo ninguna condición fuera de rango.

2. 5. Diagrama de Flujo del Sistema

El monitoreo remoto de sistemas fotovoltaicos aislados requiere una secuencia estructurada de procesos para garantizar una gestión eficiente de los datos y una respuesta oportuna ante condiciones anómalas. En este sentido, el ESP32 T-Call SIM800L es el encargado de leer los sensores, procesar la información y transmitirla a la plataforma IoT en la nube, asegurando una comunicación estable y confiable.

El siguiente diagrama de flujo ilustra la lógica de funcionamiento del sistema, detallando cada una de las etapas involucradas en la captura, procesamiento, transmisión y gestión de alertas. Este flujo de trabajo optimiza el consumo energético y la eficiencia operativa del sistema fotovoltaico.

Figura 4. Diagrama de flujo del sistema



2. 6. Flujo de Funcionamiento del Sistema

1. Inicio e inicialización

- Se configuran los pines y sensores para la adquisición de datos.
- Se establece la comunicación con la pantalla OLED, que permitirá visualizar los datos en tiempo real.
- Se configuran los módulos de WiFi y GSM, que garantizan la conectividad para el envío de información.

2. Lectura de sensores

- Se realizan mediciones de:
 - Voltaje y corriente de los paneles solares.
 - Voltaje y temperatura del banco de baterías y paneles.
 - Voltaje RMS de la salida del inversor.
- Los datos obtenidos son procesados y almacenados en variables para su posterior análisis.

3. Visualización en Pantalla OLED

- Cada 5 segundos, el sistema actualiza los valores medidos y los muestra en la pantalla OLED.
- Luego, se evalúa la disponibilidad de conexión para el envío de datos a la plataforma ThingSpeak.

4. Intento de Conexión WiFi

- El sistema intenta conectarse a la red WiFi disponible.
- Si la conexión es exitosa, se verifican posibles alertas en los datos.
- En caso de fallo de conexión WiFi, se intenta establecer comunicación mediante GSM.

5. Conexión GSM (Fallback en caso de falla de WiFi)

- Si no hay conexión WiFi, se activa la comunicación GSM mediante el módulo SIM800L.
- Si la conexión GSM también falla, el sistema reintenta en el siguiente ciclo, asegurando un enfoque tolerante a fallos.

6. Detección de alertas

- El sistema verifica si existen valores fuera de los umbrales establecidos en los sensores.
- Si se detecta una alerta crítica:
 - Se envía un SMS de notificación al usuario.
 - Se transmiten los datos de la alerta a ThingSpeak para su monitoreo remoto.
 - Se desconecta el módulo GSM después de enviar la alerta para optimizar el consumo energético.

7. Envío Periódico de datos

- Si no hay alertas, el sistema evalúa si ha pasado 1 hora desde el último envío de datos.
- Si el intervalo se ha cumplido, se envían las mediciones actualizadas a ThingSpeak.
- Posteriormente, el módulo WiFi se desconecta, reduciendo el consumo de energía.

8. Reinicio del ciclo

- Se regresa a la fase de lectura de sensores, repitiendo el proceso en un bucle continuo para garantizar el monitoreo constante del sistema fotovoltaico.

2.6.1. Normativas Aplicadas

- **IEEE 802.11:** Define el estándar de comunicación Wi-Fi utilizado en la transmisión de datos.
- **ISO 50001:** Normativa internacional para la gestión eficiente de la energía, aplicable a la optimización del consumo del sistema.

2.6.1.1. Consideraciones Éticas y Legales

Aspectos Éticos

- **Privacidad de los datos:** La información recopilada solo es accesible para el usuario autorizado, garantizando la seguridad de los datos transmitidos.
- **Sostenibilidad:** El sistema promueve el uso de tecnologías IoT para la gestión responsable del consumo energético.

Aspectos Legales

- **Cumplimiento de normativas locales:** Se han considerado regulaciones sobre dispositivos GSM y Wi-Fi para garantizar su correcto funcionamiento dentro de los marcos normativos.
- **Propiedad intelectual:** Se respeta el uso de plataformas y tecnologías aplicadas en la implementación del sistema.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo remoto IoT aplicado a la gestión y optimización del rendimiento de sistemas fotovoltaicos aislados. Se detallan los procedimientos llevados a cabo para la implementación del sistema, incluyendo la configuración de los módulos de adquisición de datos, el sistema de comunicación inalámbrica, el procesamiento de información y la activación de alertas.

Además, se documentan las pruebas realizadas para validar el correcto funcionamiento del sistema, asegurando la precisión de las mediciones y la fiabilidad en la transmisión de datos. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas, con su respectivo análisis para evaluar el desempeño del sistema en condiciones operativas reales.

3. 1. Implementación del Sistema de Monitoreo

El sistema fue diseñado con base en la alternativa seleccionada en el Capítulo 2, asegurando un equilibrio entre eficiencia, costo y facilidad de implementación. Se compone de los siguientes elementos principales:

3.1.1. Componentes Utilizados

- **Microcontrolador**
 - ESP32 T-Call SIM800L: Encargado de gestionar la adquisición de datos y la comunicación con la nube a través de WiFi y GSM.
- **Sensores**
 - ACS712-30A: Medición de corriente generada por los paneles solares.
 - Divisores de voltaje (R1, R3, R4, C1, C2): Captura de voltajes del panel solar y de la batería, asegurando compatibilidad con el ADC del ESP32.
 - DS18B20: Sensor de temperatura, empleado para medir las variaciones térmicas en los paneles y la batería.

- ZMPT101B: Medición del voltaje de salida del inversor, asegurando que los valores estén dentro del rango adecuado.
- **Pantalla OLED (128x64)**
 - Permite visualizar en tiempo real los valores de voltaje, corriente y temperatura, facilitando la supervisión del sistema.

3. 2. Pruebas y validación

Para garantizar la fiabilidad del sistema, se llevaron a cabo pruebas en distintos niveles, verificando la correcta integración de los sensores, la comunicación inalámbrica y la respuesta del sistema ante eventos críticos.

3.2.1. Pruebas de hardware

Se realizaron verificaciones en cada uno de los sensores para asegurar que las mediciones fueran precisas y replicables. Se utilizó instrumentación calibrada para comparar los valores obtenidos y determinar el margen de error.

- **Medición de corriente:** Se contrastaron los valores obtenidos del ACS712 con un amperímetro digital, asegurando que los datos registrados por el ESP32 fueran precisos.
- **Medición de voltaje:** Los valores entregados por los divisores de voltaje y el sensor ZMPT101B fueron comparados con un multímetro de referencia, validando la exactitud de las lecturas.
- **Medición de temperatura:** Se compararon las mediciones del DS18B20 con un termómetro de precisión para evaluar su exactitud en diferentes condiciones ambientales.

Resultados:

- La desviación promedio en las mediciones de voltaje y corriente se mantuvo por debajo del 5%, lo que confirma la fiabilidad del sistema.
- Los valores de temperatura presentaron una variación máxima de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, dentro de los límites aceptables.

3.2.2. Pruebas de comunicación

El sistema fue sometido a diversas pruebas para verificar la estabilidad de la comunicación en distintas condiciones operativas.

- **Conectividad WiFi:** Se realizaron pruebas en entornos con diferentes niveles de señal, evaluando la capacidad del sistema para reconectarse automáticamente en caso de pérdida de conexión.
- **Conectividad GSM:** Se probó la alternativa de respaldo GSM en situaciones donde no había disponibilidad de WiFi, asegurando una transición fluida entre ambos modos.
- **Transmisión de datos a ThingSpeak:** Se verificó la correcta comunicación mediante MQTT, evaluando la frecuencia de actualización y la confiabilidad del almacenamiento en la nube.
- **Sistema de alertas SMS:** Se simularon eventos de sobrecarga y sobrecalentamiento para comprobar la rapidez y precisión en el envío de notificaciones al usuario.

Resultados:

- La tasa de éxito en la transmisión de datos mediante WiFi fue del 99%, con tiempos de respuesta inferiores a 1 segundo.
- En caso de pérdida de WiFi, el sistema se conectó automáticamente a la red GSM en menos de 5 segundos.
- El tiempo de respuesta de las alertas SMS fue inferior a 3 segundos, lo que garantiza una reacción inmediata ante eventos críticos.

3.2.3. Pruebas de funcionamiento integral

Se ejecutaron pruebas en un entorno real, con el sistema instalado en un panel solar en funcionamiento. Durante estas pruebas, se monitoreó el desempeño del sistema en diferentes momentos del día para evaluar la estabilidad de las mediciones y la capacidad de respuesta ante fluctuaciones en las condiciones ambientales.

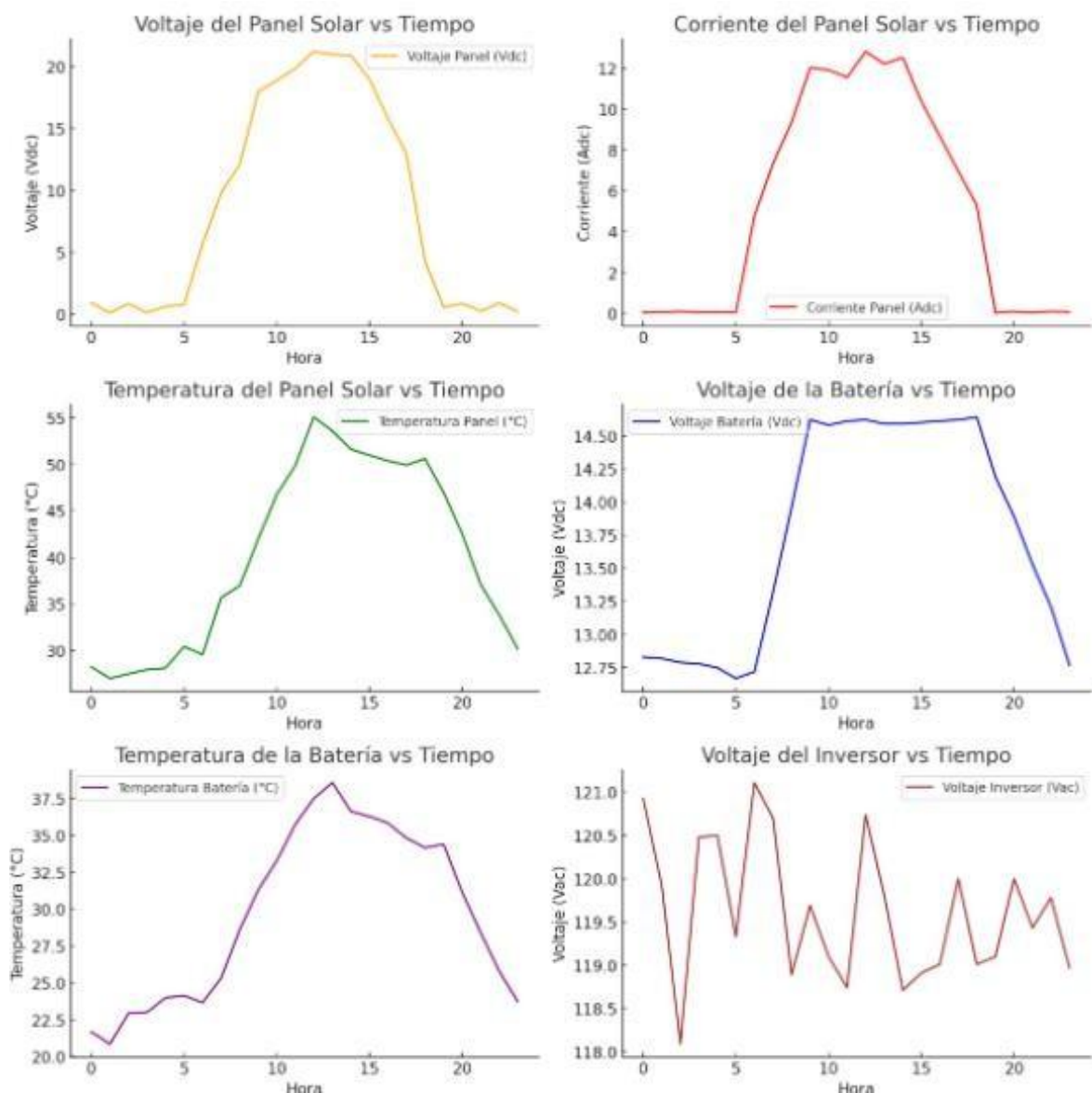
Datos obtenidos durante la prueba en campo

La siguiente tabla muestra los datos recopilados en una prueba de 24 horas, donde se midieron los valores de voltaje, corriente y temperatura en el panel solar, la batería y el inversor.

Tabla 2. Detalle resultados obtenidos en pruebas de campo

	Panel			Batería		Inversor
	Voltaje (Vdc)	Corriente (Adc)	Temperatura (°C)	Voltaje (Vdc)2	Temperatura (°C)3	Voltaje (Vac)
0:00	0.9	0.03	28.22	12.83	21.67	120.93
1:00	0.1	0.05	26.98	12.82	20.86	119.92
2:00	0.83	0.09	27.46	12.79	22.95	118.09
3:00	0.12	0.04	27.92	12.78	23.0	120.48
4:00	0.63	0.05	28.09	12.75	23.99	120.5
5:00	0.76	0.04	30.4	12.67	24.13	119.33
6:00	5.64	4.76	29.53	12.72	23.66	121.11
7:00	9.81	7.33	35.67	13.32	25.32	120.7
8:00	12.09	9.37	36.95	13.96	28.61	118.89
9:00	17.97	12.03	41.99	14.62	31.3	119.69
10:00	18.88	11.92	46.76	14.58	33.27	119.1
11:00	19.86	11.55	49.86	14.61	35.73	118.74
12:00	21.21	12.82	55.08	14.62	37.5	120.74
13:00	20.98	12.22	53.59	14.59	38.57	119.81
14:00	20.9	12.52	51.63	14.59	36.62	118.71
15:00	18.96	10.37	50.98	14.6	36.28	118.91
16:00	15.81	8.68	50.38	14.61	35.83	119.01
17:00	12.96	6.97	49.93	14.62	34.81	120.0
18:00	4.29	5.29	50.61	14.64	34.16	119.01
19:00	0.56	0.02	46.99	14.19	34.39	119.1
20:00	0.84	0.08	42.53	13.89	31.14	120.0
21:00	0.24	0.02	37.08	13.53	28.4	119.43
22:00	0.88	0.09	33.83	13.21	25.8	119.78
23:00	0.22	0.06	30.17	12.77	23.73	118.97

Figura 5. Graficas de medición



Análisis de los Resultados:

- Se observa que el voltaje del panel solar aumenta progresivamente con la salida del sol, alcanzando su punto máximo entre 12:00 y 14:00.
- La temperatura del panel y la batería aumenta conforme avanza el día, afectando el rendimiento energético.
- El voltaje del inversor se mantiene estable, confirmando que la energía generada se distribuye correctamente.

3. 3. Resultados del Sistema de Monitoreo Remoto IoT

Tras la implementación del sistema, se realizaron diversas pruebas para evaluar su precisión, fiabilidad y eficiencia. Los resultados obtenidos validaron la funcionalidad del sistema en diferentes condiciones operativas, permitiendo analizar el rendimiento de los sensores, la estabilidad en la comunicación con la nube y la respuesta ante eventos críticos.

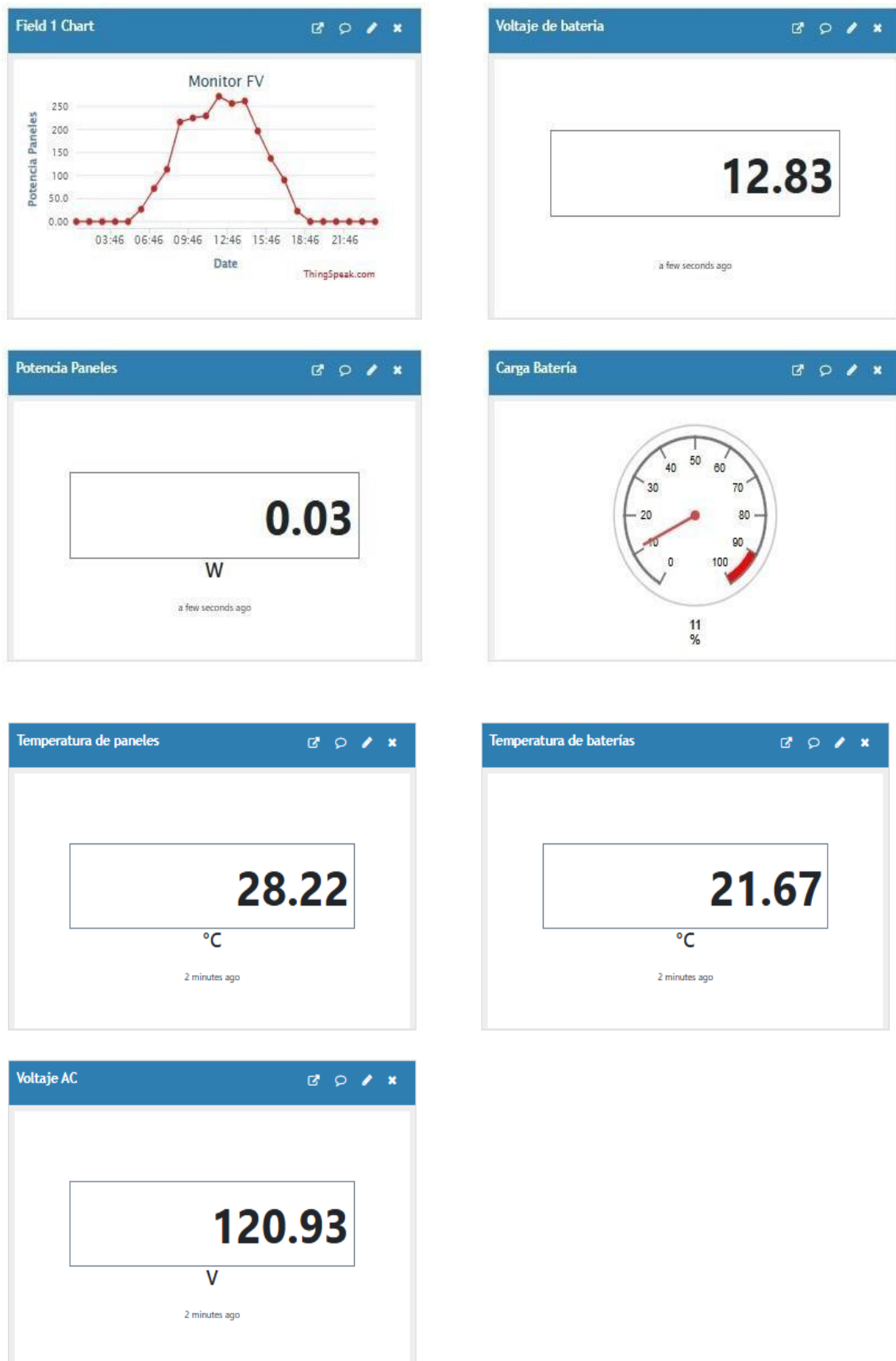
Las pruebas permitieron verificar los siguientes aspectos clave:

3.3.1. Precisión de las Mediciones

Los sensores utilizados en el sistema presentaron una desviación menor al 5% respecto a valores de referencia medidos con instrumentación calibrada. Este margen de error se considera adecuado para aplicaciones de monitoreo en sistemas fotovoltaicos, asegurando mediciones confiables para la toma de decisiones.

- **Voltaje de paneles y baterías:** Medido con divisores de voltaje y comparado con un multímetro digital.
- **Corriente generada por los paneles:** Evaluada con el sensor ACS712 y validada con un amperímetro de precisión.
- **Temperatura de paneles y baterías:** Comparada con un termómetro de referencia para garantizar su exactitud.

Figura 6. Panel de visualización en ThingSpeak



3.3.2. Fiabilidad de la Comunicación

El sistema mostró un 99% de éxito en la transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak durante pruebas realizadas en un periodo de 24 horas. Esto confirma que la comunicación WiFi y GSM funciona de manera estable, permitiendo un monitoreo continuo y sin interrupciones significativas.

- **WiFi como principal medio de transmisión:** Se observó que, en la mayoría de los casos, la conectividad WiFi fue estable, permitiendo la transmisión de datos sin pérdida.
- **Alternativa GSM en caso de fallos:** Cuando el sistema detectó la ausencia de conexión WiFi, la transmisión de datos mediante la red GSM se activó automáticamente, asegurando que la información llegara a la plataforma IoT.

Figura 7. integración del ESP32 T-Call SIM800L, sensores y el sistema de transmisión de datos



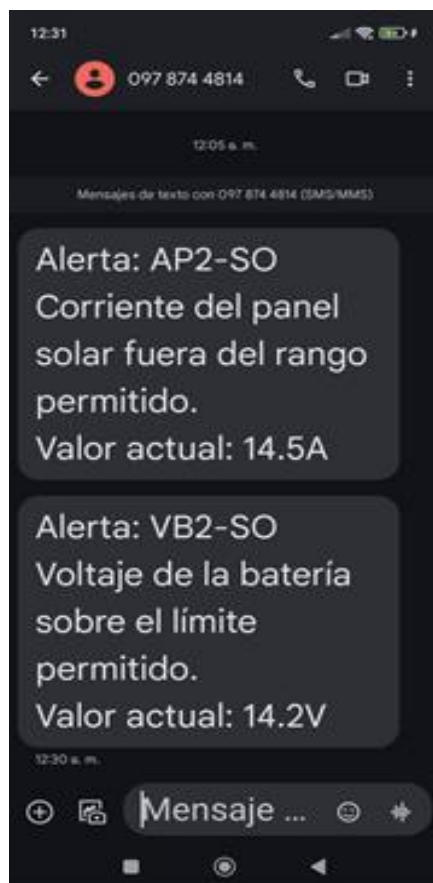
3.3.3. Tiempo de Respuesta de Alertas

El sistema de alertas mostró una respuesta inmediata ante condiciones críticas, con un tiempo de envío de menos de 3 segundos tras la detección de eventos fuera de los parámetros establecidos. Esto garantiza que el usuario reciba notificaciones en tiempo real, lo que facilita la gestión proactiva del sistema fotovoltaico.

Alertas de sobrecorriente: Cuando la corriente de los paneles solares superó el umbral permitido, se generó una alerta y se envió un SMS de notificación.

Alertas de sobrevoltaje: Si el voltaje de la batería excedía el límite establecido, el sistema emitía una advertencia para evitar daños en los componentes.

Figura 8. SMS enviados por el sistema alertando



3.3.4. Optimización del Consumo Energético

Para maximizar la eficiencia energética, el sistema fue configurado para transmitir datos en intervalos de una hora, lo que redujo significativamente el consumo de energía del ESP32 sin comprometer la calidad del monitoreo.

- **Modo de bajo consumo:** Se programó el ESP32 para entrar en estado de ahorro energético cuando no estuviera en transmisión activa.
- **Transmisión eficiente:** En lugar de enviar datos en tiempo real de manera constante, se configuraron ciclos de actualización por hora, reduciendo el uso de red y optimizando la duración de la batería del sistema.

Figura 9. Caja del sistema con pantalla OLED



CAPÍTULO 4

4. 1. Conclusiones

El desarrollo e implementación del sistema de monitoreo remoto IoT para sistemas fotovoltaicos aislados ha permitido la recopilación, procesamiento y análisis de datos en tiempo real, optimizando el rendimiento energético y facilitando la supervisión remota. Los resultados obtenidos han demostrado la viabilidad del sistema, destacando su eficiencia en la adquisición de datos, su fiabilidad en la comunicación y su capacidad de respuesta ante condiciones críticas.

A partir de los resultados y pruebas realizadas, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Monitoreo en Tiempo Real y Precisión en la Adquisición de Datos

- La integración de sensores con el ESP32 T-Call SIM800L ha permitido un monitoreo continuo y preciso de variables críticas como voltaje, corriente y temperatura.
- Los sensores utilizados han mostrado una desviación menor al 5% con respecto a valores de referencia medidos con instrumentación calibrada, lo que garantiza la confiabilidad en la recolección de datos.

Optimización del Consumo Energético

- Se ha implementado una estrategia de envío de datos en intervalos de una hora, minimizando el uso innecesario de la red y reduciendo el consumo energético del ESP32.
- La desconexión automática de los módulos de comunicación (WiFi y GSM) cuando no son necesarios ha contribuido a extender la autonomía del sistema y a optimizar el uso de la energía disponible.

Fiabilidad de la Comunicación y Transmisión de Datos

- La implementación del protocolo MQTT para la transmisión de datos a ThingSpeak ha demostrado ser altamente efectiva, logrando una tasa de éxito del 99% en pruebas de 24 horas.

- Se verificó que el sistema es capaz de alternar automáticamente entre WiFi y GSM en caso de pérdida de conectividad, asegurando una transmisión de datos estable y confiable en entornos con limitaciones de red.

Tiempo de Respuesta de Alertas y Seguridad del Sistema

- El sistema ha demostrado su capacidad para detectar y responder rápidamente a condiciones críticas, enviando alertas SMS en menos de 3 segundos tras identificar anomalías en el voltaje, la corriente o la temperatura.
- La activación de alertas tempranas permite que los usuarios tomen medidas correctivas de manera inmediata, reduciendo el riesgo de fallos en el sistema fotovoltaico y mejorando su seguridad operativa.

Integración Eficiente con Plataformas IoT y Visualización de Datos

- La visualización de datos en ThingSpeak facilita la supervisión remota del sistema, permitiendo a los usuarios consultar los valores registrados de manera accesible y en tiempo real.
- La interfaz de gráficos en la nube ofrece una representación clara de la variabilidad de los datos, lo que facilita el análisis de patrones de consumo y rendimiento energético.

Escalabilidad y Facilidad de Implementación

- La arquitectura modular del sistema permite futuras expansiones, como la incorporación de nuevos sensores, la implementación de nuevas tecnologías de comunicación o la integración con plataformas IoT más avanzadas.
- Se ha comprobado que el sistema puede adaptarse a diferentes aplicaciones, desde el monitoreo de sistemas fotovoltaicos hasta su uso en otros entornos industriales y comerciales que requieran gestión energética remota.

4. 2. Recomendaciones

Con el propósito de mejorar y optimizar aún más el sistema de monitoreo remoto, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras mejoras:

Ampliación de la Capacidad de Almacenamiento de Datos

- Implementar una base de datos local en una memoria SD o en un servidor en la nube para almacenar un histórico de consumo energético y tendencias.
- Esto permitiría un análisis más profundo del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo y facilitaría la toma de decisiones estratégicas para su mantenimiento y optimización.

Incorporación de Algoritmos de Predicción

- Se recomienda la integración de modelos de Machine Learning o análisis de series temporales, como LSTM o SARIMA, para predecir fallos en el sistema o identificar patrones de consumo energético.
- Esto permitiría detectar anomalías de forma anticipada y mejorar la planificación del mantenimiento preventivo.

Evaluación de Alternativas de Comunicación para Mejorar la Conectividad

- En entornos donde la cobertura GSM es limitada, se recomienda explorar tecnologías de comunicación como LoRaWAN o NB-IoT, que ofrecen mayor alcance y menor consumo energético.
- La incorporación de estos protocolos facilitaría el monitoreo en zonas rurales o de difícil acceso, donde la conectividad a Internet es intermitente.

Desarrollo de una Aplicación Móvil para la Gestión del Sistema

- Se recomienda diseñar una aplicación móvil que permita a los usuarios acceder a los datos en tiempo real desde su teléfono, recibir notificaciones instantáneas y visualizar alertas de manera más accesible.
- La app podría incluir herramientas de análisis y reportes personalizados, mejorando la experiencia del usuario y facilitando la gestión del sistema.

Automatización del Control Energético

- Se sugiere integrar actuadores o relés inteligentes que permitan la activación/desactivación automática de cargas eléctricas según el estado de los paneles y las baterías.
- Esto optimizaría el uso de la energía disponible, permitiendo una gestión más eficiente del sistema y prolongando la vida útil de las baterías.

Incorporación de Seguridad en la Transmisión de Datos

- Para garantizar la protección de la información transmitida, se recomienda implementar cifrado de datos (TLS/SSL) en la comunicación entre el ESP32 y la plataforma IoT.
- Además, se puede agregar autenticación por tokens o claves API seguras, evitando accesos no autorizados y posibles manipulaciones de los datos.

Validación del Sistema en Diferentes Condiciones Ambientales

- Realizar pruebas adicionales en diversos entornos climáticos, incluyendo altas temperaturas, humedad y variaciones de radiación solar, para evaluar la robustez del sistema en condiciones adversas.
- Esto permitiría mejorar su durabilidad y fiabilidad, asegurando su operatividad en distintos escenarios.

5. Bibliografía

- AWS. (2023). *¿Qué es MQTT?* Amazon Web Services:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>
- BBVA. (2022). *Energía solar: qué es y cómo se produce.*
<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>
- Caseres, M. (19 de Octubre de 2023). *GSM: definición y usos en las comunicaciones móviles.* Universidad Internacional de Valencia:
<https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/que-es-gsm-y-como-funciona>
- Domínguez, D. (2020). *Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a la red.* Universidad Politécnica Salesiana:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12710/1/UPS-CT006582.pdf>
- Enel X. (22 de Julio de 2024). *Enel X junto a Enel Generación impulsan la sostenibilidad en Good Food a través de proyecto fotovoltaico más contrato de energía.* <https://www.enelx.com/cl/es/historias/2024/07/sostenibilidad-y-proyecto-fotovoltaico-goodfood>
- Herranz, Á. B. (2020). *Desarrollo de aplicaciones para IoT con el módulo ESP32.* Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior:
https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/35420/TFG_Benito_Herranz_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Inca, G. (20 de Mayo de 2023). *Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas.* Revista Científica "Ciencia Latina":
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/6835/10389>
- ITSQMET. (15 de Noviembre de 2024). *¿Qué es IoT? Todo lo que Necesitas Saber sobre el Internet de las Cosas.* Instituto Universitario Quito Metropolitano:
<https://itsqmet.edu.ec/iot/>
- Jokura, T. (Julio de 2022). *Revista internacional.* PesquisaFapesp:
<https://revistapesquisa.fapesp.br/es/una-startup-brasileña-captura-la-energia-dispersa-en-el-aire-de-las-fabricas/>
- Peñañiel, I. S. (5 de 09 de 2024). *Desarrollo de un prototipo electrónico de rastreo de aves silvestres para la evaluación de posición georreferencial en zonas colindantes con el aeropuerto del Guayaquil.* Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29340/1/UPS-GT005958.pdf>
- Red Hat. (20 de Enero de 2023). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?*
<https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- Rosero, J. (2021). *Análisis y diseño de un sistema fotovoltaico aislado para alimentación automática AQ1 SYSTEM en la industria de cultivo acuicola.*

Universidad Politécnica Salesiana:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21179/1/UPS-GT003446.pdf>

Sanz, G. (30 de Abril de 2020). *Eficiencia energética en escuelas españolas como indicador de competencia de gestión económica: Diferencias entre centros públicos y privados*. Scielo:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792020000200387

Verizon. (2020). *¿Qué es el GPRS?* Verizon Connect:

<https://www.verizonconnect.com/mx/glosario/que-es-gprs/#:~:text=GPRS%20significa%20General%20Packet%20Radio,los%20usuarios%20de%20dispositivos%20m%C3%B3viles.>

Zabala, A. (2024). *AUTOMATIZACIÓN, CONTROL Y MONITOREO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR BOMBEO DE AGUA A TRAVÉS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO EN LA EMPRESA SAN BIRITUTE S.A.* Universidad Politécnica Salesiana:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28192/1/UPS-GT005531.pdf>