Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica




# Diseño de un sistema de monitoreo electrónico en la salida de inversores de un sistema de paneles fotovoltaicos con conectividad remota para el CELEQ

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de

Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Jorge Cerdas Solórzano

Cartago, 6 de febrero de 2026

Diseño de un sistema de monitoreo electrónico en la salida de inversores de un sistema de paneles fotovoltaicos con conectividad remota para el CELEQ.© 2026 por Jorge Cerdas Solórzano se publica bajo la licencia CC BY 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jorge Cerdas Solórzano

Proyecto: Diseño de un sistema de monitoreo electrónico en la salida de inversores de un sistema de paneles fotovoltaicos con conectividad remota para el CELEQ.

Miembros del jurado evaluador

Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado

Ing. Viviana Acebey Arana

Jurado

Ing. Diego Humberto Elizondo Ramírez

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Viernes 06 de febrero (Sede Central de Cartago F3-07)

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Jorge Cerdas Solórzano

Proyecto: Diseño de un sistema de monitoreo electrónico en la salida de inversores de un sistema de paneles fotovoltaicos con conectividad remota para el CELEQ.

Iván Araya Menéses

MSc. -Ing. Iván Araya Menéses

Asesor

Viernes 06 de febrero (Cartago)

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Jorge Cerdas Solórzano

Cartago, 06 de febrero de 2026 Céd: 1-1801-0188

# Resumen

En este proyecto se desarrolla un sistema de monitoreo energético para instalaciones fotovoltaicas con almacenamiento en baterías, ante la pérdida de la licencia corporativa del sistema de monitoreo actualmente utilizado, con el objetivo de diseñar e implementar una solución de menor costo, escalable y capaz de proporcionar información en tiempo real. Se abordan los principios de funcionamiento de los sistemas de monitoreo, el comportamiento de las baterías y los parámetros eléctricos relevantes para su monitoreo. La metodología de diseño se fundamenta en el análisis de las necesidades de usuarios y técnicos, la definición de métricas y especificaciones técnicas, y la selección de componentes que cumplen con criterios de precisión, robustez y facilidad de uso. El diseño a detalle contempla la arquitectura del sistema, incluyendo el hardware, el procesamiento de datos y los mecanismos de registro y visualización de la información. Como resultado se obtuvo un sistema funcional que permitió validar el desempeño del sistema, demostrando la medición y el registro confiable de parámetros eléctricos en tiempo real. Se concluye que el sistema desarrollado cumple con los requisitos establecidos y constituye una alternativa viable, escalable y de menor costo para el monitoreo energético de baterías en sistemas fotovoltaicos.

**Palabras clave:** Batería, Monitoreo, Fotovoltaico

# Abstract

This project develops an energy monitoring system for photovoltaic installations with battery storage, following the loss of the corporate license for the currently used monitoring system. The objective is to design and implement a lower-cost, scalable solution capable of providing real-time information. The operating principles of monitoring systems, battery behavior, and the relevant electrical parameters for monitoring are addressed. The design methodology is based on analyzing the needs of users and technicians, defining metrics and technical specifications, and selecting components that meet criteria for accuracy, robustness, and ease of use. The detailed design includes the system architecture, encompassing hardware, data processing, and mechanisms for recording and visualizing information. A functional system was obtained, validating the system's performance and demonstrating the reliable measurement and recording of electrical parameters in real time. It is concluded that the developed system meets the established requirements and constitutes a viable, scalable, and lower-cost alternative for energy monitoring of batteries in photovoltaic systems.

**Keywords:** Battery, Monitoring, Photovoltaic

*A mi familia*

# Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de mi padre Jorge Cerdas Pérez, mi madre Giselle Solórzano Guillen y mi hermano Fabián Cerdas Solórzano.

Jorge Cerdas Solórzano

Cartago, 9 de febrero de 2026

# Índice general

**Lista de figuras** iii

**Lista de tablas** v

**Abreviaciones** vii

**1 Introducción** 1
- 1.1 Sistemas Fotovoltaico en el CELEQ . . . 1
- 1.2 Objetivos y estructura del documento . . . 2
- 1.3 Aporte a la ingeniería . . . 3
- 1.4 Estructura del documento . . . 4

**2 Marco Teórico** 5
- 2.1 Descripción . . . 5
- 2.2 Fuentes de alimentación . . . 5
- 2.3 Moduladores de ancho de pulso (PWM) . . . 6
- 2.4 Convertidores CD-CD . . . 6
- 2.5 Transformadores . . . 8
- 2.6 Rectificadores . . . 9
- 2.7 Efecto Hall . . . 10
- 2.8 Estado de Carga . . . 11
- 2.9 Modelo OSI . . . 12
- 2.10 Ethernet . . . 13
- 2.11 I2C . . . 13
- 2.12 Single Board Computer . . . 14

**3 Metodología del Diseño del Monitoreo** 15
- 3.1 Fase 1: Identificación y determinación de necesidades . . . 15
- 3.2 Fase 2: Establecimiento de especificaciones objetivo . . . 19
- 3.3 Fase 3: Generación de conceptos de producto (solución) . . . 23
  - 3.3.1 División del problema en subproblemas . . . 23
  - 3.3.2 Búsqueda interna y externa de conceptos . . . 23
  - 3.3.3 Exploración de conceptos . . . 30
- 3.4 Fase 4: Selección de conceptos de producto (solución) . . . 32
- 3.5 Fase 5: Validación de conceptos . . . 34

**4 Diseño a detalle del sistema de monitoreo** **39**
4.1 Lista de Materiales . . . 39
4.2 Conexión eléctrica para líneas de cargas . . . 39
4.3 Conexión eléctrica para baterías . . . 45
4.4 Almacenamiento de datos . . . 46
4.5 Conexión Remota . . . 49

**5 Resultados y Análisis** **51**
5.1 Sistema de Medición . . . 52
5.1.1 Medición de las baterías . . . 52
5.1.2 Medición de las líneas . . . 58
5.2 Facilidad de Comprensión . . . 68
5.3 Visualización de datos . . . 69
5.4 Conexión Remota . . . 69
5.5 Alertas . . . 75
5.5.1 Análisis de los datos de alerta . . . 78
5.6 Análisis Económico . . . 79

**6 Conclusiones y Recomendaciones** **83**
6.1 Conclusiones . . . 83
6.2 Recomendaciones . . . 85

**7 Anexos** **89**
7.1 Hojas de datos . . . 89

**8 Apéndices** **95**
8.1 Documentación de método actual . . . 95
8.2 Programación de Arduino . . . 101
8.3 Uso de InfluxDB 2, Grafana y la configuración web de RPICT . . . 102
8.3.1 Uso básico de InfluxDB 2 y Grafana con la aplicación web . . . 102
8.3.2 Configuración Web de RPICT . . . 103
8.3.3 Funciones disponibles en la herramienta web . . . 103
8.3.4 Preguntas de evaluación . . . 103

# Índice de figuras


1.1 Diagrama de bloques general del proyecto. . . . . 3

2.1 Diagrama de convertidor reductor [1]. . . . . 7
2.2 Diagrama de convertidor elevador [1]. . . . . 7
2.3 Diagrama de convertidor reductor-elevador [1]. . . . . 8
2.4 Diagrama de convertidor Cúk [1]. . . . . 8
2.5 Diagrama de transformador ideal [2]. . . . . 9
2.6 Diagrama de rectificador de onda completa con un transformador de con derivación central [1]. . . . . 10
2.7 Diagrama de rectificador de puente [1]. . . . . 10
2.8 Jerarquía del modelo OSI [3]. . . . . 13

3.1 "Caja Negra" de entradas y salidas. . . . . 23
3.2 Descomposición del problema. . . . . 24
3.3 Zumbador activo[4] . . . . . 25
3.4 Pantalla táctil[4] . . . . . 28
3.5 Ejemplo de BMS[5] . . . . . 30
3.6 Boceto de la solución. . . . . 34

4.1 Raspberry Pi 5.[6] . . . . . 41
4.2 Sensor SCT-013.[7] . . . . . 41
4.3 Sensor ZMPT.[7] . . . . . 42
4.4 Módulo RPICT4V3.[7] . . . . . 42
4.5 Pines GPIO de conexion a RPICT de Raspberry Pi 5.[7] . . . . . 43
4.6 Pines GPIO de Raspberry Pi.[6] . . . . . 44
4.7 Diagrama de conexión del circuito de medición de las líneas elaborado en LTSpice. . . . . 44
4.8 Diagrama de conexión del circuito de medición de baterías elaborado en LTSpice. 45
4.9 Configuración del Raspberry Pi Imager. . . . . 47
4.10 Ejemplo de Interfaz Grafana. [8] . . . . . 48
4.11 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de almacenamiento, acceso remoto y de alertas. . . . . 50

5.1 Sistema de medición de las baterías y líneas. . . . . 52
5.2 Conexión del sistema de medición de las líneas. . . . . 53
5.3 Distribución normal de medición de baterías . . . . . 55

5.4 Distribución normal de medición de voltaje de la línea. . . . . 62
5.5 Distribución normal de medición de corriente de la línea. . . . . 65
5.6 Interfaz de visualización de datos . . . . . 69
5.7 Prueba de conexión remota con una interfaz de visualización de escritorio remoto por medio de un teléfono celular usando datos móviles y el sistema original . . . . . 70
5.8 Distribución normal de medición de tiempo de conexión. . . . . 74
5.9 Zumbador y cinta métrica. . . . . 75

7.1 Resolución de Multímetro utilizado. . . . . 89
7.2 Datos RPICT4V3. . . . . 90
7.3 Datos LM358. . . . . 91
7.4 Datos SCT. . . . . 92
7.5 Datos ZMPT. . . . . 92
7.6 Datos ADC. . . . . 93

8.1 Estado de baterías de Ácido de Plomo. . . . . 96
8.2 Estado del Vanadio de las baterías. . . . . 97
8.3 Estado de baterías de litio. . . . . 98
8.4 Estado de uno de los monitores. . . . . 99
8.5 Estado de uno de los inversores. . . . . 100
8.6 Interfaz funcional del método actual. . . . . 100

# Índice de tablas


3.1 Categorización de funciones del sistema de monitoreo . . . . . 16
3.2 Jerarquización de necesidades (Parte 1/2) . . . . . 17
3.3 Jerarquización de necesidades (Parte 2/2) . . . . . 19
3.4 Necesidades y sus Métricas Asociadas . . . . . 20
3.5 Métricas y valores de referencia para necesidades del sistema . . . . . 22
3.6 Conceptos del sistema de monitoreo . . . . . 24
3.7 Conceptos de almacenamiento y medición de datos . . . . . 24
3.8 Combinaciones de conceptos (Parte 1/2) . . . . . 31
3.9 Combinaciones de conceptos (Parte 2/2) . . . . . 32
3.10 Filtrado de conceptos según criterios de selección . . . . . 33
3.11 Matriz de Evaluación Conceptos . . . . . 33
3.12 Tabla de Necesidades, Objetivos y Variables . . . . . 35
3.13 Tabla de Conceptos, Criterios y Factores de Influencia . . . . . 36
3.14 Prueba de Usabilidad y Mantenimiento del Sistema (RPI5 + Display + InfluxDB + Grafana) . . . . . 37
3.15 Prueba de Transmisión de Datos (Raspberry Pi Connect) . . . . . 37
3.16 Prueba de Perceptibilidad y Volumen del Buzzer . . . . . 38
3.17 Prueba de Precisión y Calibración de Medición (SCT-013 + RPICT Hat) . . 38

4.1 Lista de Materiales . . . . . 40

5.1 Medición de las Baterías . . . . . 54
5.2 Datos de voltaje de baterías y función de densidad de probabilidad. . . . . 56
5.3 Validación de la distribución de voltajes mediante la regla empírica. . . . . 56
5.4 Estimación del intervalo de confianza para el voltaje promedio (Baterías de Litio). . . . . 57
5.5 Resultados de 30 ensayos de corriente y voltaje usando SCT-013 + ZMPT + RPICT Hat (RPICT4V3). . . . . 59
5.6 Resultados de medición de voltaje y corriente de la línea con Multímetro (Steren MUL-110). . . . . 61
5.7 Datos de voltaje de las líneas y función de densidad de probabilidad. . . . . 63
5.8 Validación de la distribución del Voltaje de Línea mediante la regla empírica. 63
5.9 Intervalo de confianza para el voltaje de línea. . . . . 64
5.10 Valores de corriente de línea medidos y su correspondiente Función de Densidad de Probabilidad. . . . . 66

5.11 Validación de la distribución de la Corriente de Línea mediante la regla empírica. 67
5.12 Intervalo de confianza para la corriente de línea. . . . . 67
5.13 Resultados de comprensión por usuario . . . . . 68
5.14 Raspberry Pi Connect: Prueba de conexión con Ookla (American Data Networks) . . . . . 71
5.15 Datos y función de densidad de probabilidad . . . . . 73
5.16 Validación de la distribución del tiempo de conexión mediante la regla empírica. 73
5.17 Intervalo de confianza para el tiempo promedio de establecimiento de conexión. 74
5.18 Mediciones de nivel de sonido a 0 metros (Buzzer activo) . . . . . 76
5.19 Mediciones de nivel de sonido a 1 metro (Buzzer activo) . . . . . 77
5.20 Lista de costos. . . . . 80
5.21 Desglose de salario bruto para un periodo de 4 meses y 1 día . . . . . 81
5.22 Lista de productos de monitoreo y costos[5]. . . . . 81

# Abreviaciones

AC Corriente Alterna

ADC Convertidor Analógico-Digital

API Interfaz de Programación de Aplicaciones

BMS Sistema de Gestión de Baterías

CPU Unidad Central de Procesamiento

CLI Interfaz de Línea de Comandos

CSV Valores Separados por Comas

DC Corriente Continua

GPIO Entradas/Salidas de Propósito General

GUI Interfaz Gráfica de Usuario

$I^2C$ Circuito Inter-Integrado

IOT Internet de las Cosas

OSI Open Systems Interconnection

PID Control Proporcional-Integral-Derivativo

PWM Modulación por Ancho de Pulso

SBC Computadora de una Placa

SOC State of Charge

SOH State of Health

SPI Interfaz Periférica Serial

USB Bus Serial Universal

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1 Sistemas Fotovoltaico en el CELEQ

### Problemática

El presente proyecto se desarrolla en el Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), un laboratorio de la Universidad de Costa Rica dedicado a labores de docencia, investigación, acción social y prestación de servicios especializados. Como parte de su infraestructura, el CELEQ cuenta con un sistema fotovoltaico diseñado para la generación y almacenamiento de energía mediante distintos bancos de baterías, con el objetivo de apoyar el consumo energético del edificio y servir como plataforma de estudio y análisis.

Actualmente, el sistema fotovoltaico opera de forma parcial, ya que, de los tres bancos de baterías instalados, litio, vanadio y ácido de plomo, únicamente el banco de baterías de litio se encuentra en funcionamiento. En condiciones normales, la generación directa de los paneles solares es suficiente para cubrir la demanda energética del edificio, por lo que las baterías se utilizan principalmente como respaldo. Adicionalmente, uno de los subsistemas de monitoreo asociados a las baterías fue retirado y otro presenta fallas que afectan su desempeño.

El sistema de monitoreo originalmente implementado en la instalación dependía de una licencia propietaria, la cual expiró y no fue renovada por la institución, limitando de forma significativa las capacidades de supervisión del sistema. A esto se suma la ausencia de documentación técnica detallada y la imposibilidad de acceder a los parámetros de diseño del sistema anterior, debido a que los ingenieros responsables del proyecto previo ya no forman parte de la institución ni son localizables. Esta situación impide la continuidad del monitoreo energético y restringe la posibilidad de realizar mejoras o adaptaciones sobre la solución existente.

Como restricción adicional, el sistema fotovoltaico actual debe mantenerse intacto, sin ser desarmado ni reemplazado, lo que obliga a diseñar una solución complementaria que pueda integrarse a la infraestructura existente sin interferir con su operación normal. Esta condición

incrementa la complejidad del diseño y refuerza la necesidad de una arquitectura flexible y no invasiva.

### Síntesis del problema

Ante este escenario, surge la necesidad de desarrollar un sistema de monitoreo energético propio para el CELEQ, que sea de fácil mantenimiento, escalable y adaptable a las necesidades actuales y futuras del laboratorio. El sistema propuesto debe permitir la medición y visualización en tiempo real de parámetros eléctricos relevantes, así como el almacenamiento histórico de datos asociados al funcionamiento del inversor y al estado operativo de las baterías.

Asimismo, se requiere que el sistema contemple mecanismos de alarma ante fallos, la posibilidad de integración futura con estaciones de carga para vehículos eléctricos y una arquitectura modular que permita su expansión para el monitoreo de diferentes tipos y cantidades de baterías. El almacenamiento histórico de la información permitirá realizar análisis comparativos y sentar las bases para estudios futuros relacionados con el estado de salud de las baterías, contribuyendo a una mejor gestión energética y a la toma de decisiones técnicas dentro del laboratorio. En la Fig. 1.1 se ilustran los bloques principales del proceso de diseño del sistema propuesto a desarrollar durante la ejecución del proyecto.

## 1.2 Objetivos y estructura del documento

### Objetivo General

Diseñar una prueba de concepto de sistema de monitoreo eléctrico de fácil mantenimiento y escalable para el sistema fotovoltaico del CELEQ, que permita la recopilación, almacenamiento y análisis continuo de datos eléctricos, con acceso remoto para facilitar la supervisión.

### Objetivos Específicos

- Diagnosticar el método de medición de variables eléctricas en el proceso de generación fotovoltaica del Centro de Electroquímica y Energía Química.
- Diseñar el sistema electrónico de adquisición de datos, integrando sensores eléctricos adecuados y una interfaz para mostrar la información en un monitor local.
- Diseñar un sistema de recopilación y almacenamiento de datos eléctricos con la capacidad de acceder remotamente.
- Validar el sistema mediante pruebas de concepto.

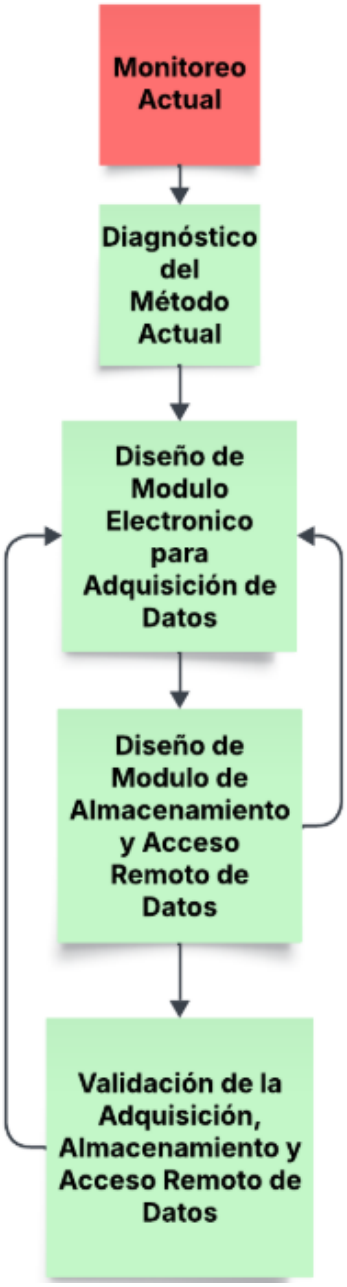



**Figura 1.1:** Diagrama de bloques general del proyecto.

## 1.3 Aporte a la ingeniería

El principal aporte de ingeniería de este proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo energético propio que integra electrónica de medición y software de adquisición, almacenamiento y análisis de datos, eliminando la dependencia de soluciones propietarias y permitiendo una arquitectura modular, escalable y de fácil mantenimiento. Esta solución se adapta a la infraestructura existente sin interferir con su operación, y sienta las bases para el análisis histórico del comportamiento de las baterías y la futura estimación de su estado de salud, contribuyendo al fortalecimiento de capacidades técnicas en el ámbito de la ingeniería energética y electroquímica aplicada.

## 1.4 Estructura del documento

El presente documento se organiza en varios capítulos. En el primer capítulo se presenta la introducción, donde se describe el contexto del proyecto, la problemática abordada y los objetivos planteados. El segundo capítulo corresponde al marco teórico, en el cual se desarrollan los fundamentos conceptuales relacionados con sistemas fotovoltaicos, baterías y monitoreo energético. En el tercer capítulo se expone la metodología de diseño utilizada para el desarrollo del sistema propuesto. El cuarto capítulo detalla el diseño a nivel de hardware y software del sistema de monitoreo. En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Finalmente, en el último capítulo se establecen las conclusiones del proyecto y se proponen posibles líneas de trabajo futuro.

# Capítulo 2

# Marco Teórico

## 2.1 Descripción

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos necesarios para entender el desarrollo de este proyecto. Algunos de estos conceptos son la teoría de fuentes, los convertidores eléctricos, sensores de corriente, estado de carga de baterías y protocolos de comunicación.

## 2.2 Fuentes de alimentación

Los circuitos de fuentes de alimentación son construidos con filtros, rectificadores y reguladores de voltaje. Estos circuitos tienen el propósito de transformar una señal eléctrica de entrada incompatible con una carga a una señal de salida aplicable a alguna carga. Hay dos categorías principales: lineales y conmutadas [9].

#### Fuentes de alimentación lineales

Las fuentes de alimentación lineales reducen el voltaje de entrada mediante un transformador y lo regulan con dispositivos como diodos y transistores en la zona lineal de operación. Su principio se basa en disipar la energía sobrante en forma de calor para mantener una salida estable. Esto las hace sencillas, confiables y con bajo nivel de ruido eléctrico, pero poco eficientes debido a las pérdidas energéticas y a su mayor tamaño y peso por los transformadores grandes que requieren [10].

#### Fuentes de alimentación conmutadas

Las fuentes conmutadas convierten la señal mediante el encendido y apagado de transistores de potencia a alta frecuencia. Luego, un transformador o inductores procesan esa señal pulsada y, con etapas de rectificación y filtrado, se obtiene un voltaje de salida regulado. Esta

conmutación posee una alta eficiencia, aunque introduce ruido electromagnético y requiere un diseño más complejo con sistemas de control y filtrado [10].

## 2.3 Moduladores de ancho de pulso (PWM)

En aplicaciones industriales, es necesario controlar el voltaje de salida de los inversores para compensar variaciones en la entrada de corriente continua, regular el voltaje y cumplir con requisitos de voltaje y frecuencia constantes. La técnica más eficiente para lograrlo es la modulación por ancho de pulso (PWM), que puede implementarse de distintas formas: pulso único, pulsos múltiples, senoidal, senoidal modificada y desplazamiento de fase. De todas, la modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) es la más usada, aunque tiene la desventaja de producir un bajo voltaje fundamental de salida. Una forma de regular el voltaje de salida consiste en mantener una conmutación con frecuencia constante (es decir, un período fijo de conmutación) y modificar el tiempo en que el interruptor permanece encendido. De esta manera se controla el valor promedio del voltaje de salida. Este procedimiento, conocido como modulación por ancho de pulso (PWM), ajusta la relación del ciclo de trabajo D del interruptor, definida como la fracción del tiempo de encendido respecto al período total de conmutación [1].

## 2.4 Convertidores CD-CD

Con el fin de convertir un voltaje CD no regulado a un voltaje de salida regulado, se pueden usar los convertidores CD. Existen diferentes tipos de convertidores CD-CD. A continuación se explicarán algunos de ellos [10].

### Regulador reductor

En este tipo de reguladores, el voltaje de salida es menor que el voltaje de entrada. Este tipo de reguladores cuenta con capacitores, inductores, transistores y diodos. El transistor se comporta como un interruptor. Esto provoca que el circuito funcione de distinta manera dependiendo del estado del transistor. Por lo que, dependiendo del estado del transistor, el voltaje de salida suba o baje. Si el transistor permite el flujo de corriente, el voltaje sube. De lo contrario, el circuito se descarga por medio del diodo. Dado que el circuito está en una constante carga y descarga, el ciclo de trabajo del transistor define la proporción del voltaje entre la salida y la entrada. El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la figura 2.1 [1].

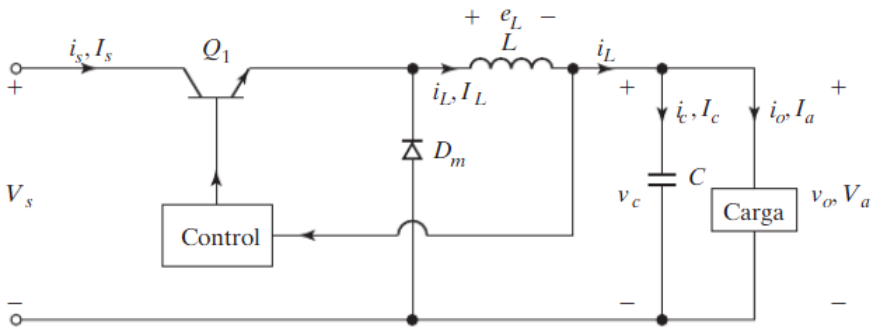



**Figura 2.1:** Diagrama de convertidor reductor [1].

### Regulador elevador

Este tipo de reguladores tiene la característica de que el voltaje de salida es mayor que el voltaje de entrada. Concomitantemente al convertidor reductor, este tipo de reguladores cuenta con capacitores, inductores, transistores y diodos. El transistor se comporta como un interruptor. Esto provoca que el circuito funcione de distinta manera dependiendo del estado del transistor. Por lo que, dependiendo del estado del transistor, el voltaje de salida varía. Si el transistor permite el flujo de corriente, el voltaje baja. De lo contrario, el circuito se carga por medio del diodo. Dado que el circuito está en una constante carga y descarga, el ciclo de trabajo del transistor define la proporción del voltaje entre la salida y la entrada. El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la Figura 2.2 [1].

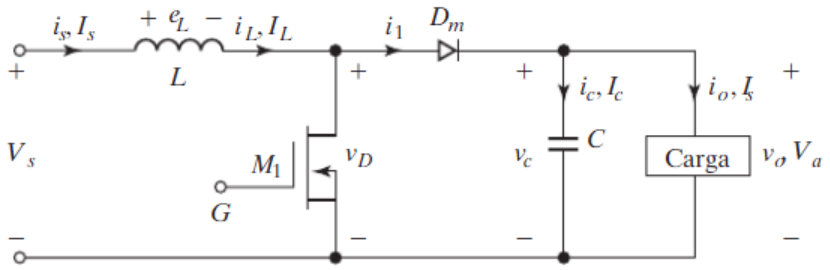



**Figura 2.2:** Diagrama de convertidor elevador [1].

### Regulador reductor-elevador

Este tipo de reguladores tiene la propiedad de que el voltaje de salida es mayor o menor que el voltaje de entrada. Este tipo de reguladores cuenta con capacitores, inductores, transistores y diodos. El transistor se comporta como un interruptor. Esto provoca que el circuito funcione de distinta manera dependiendo del estado del transistor. Por lo que, dependiendo del estado del transistor, el voltaje de salida varía. Si el ciclo de trabajo del transistor es menor a 0.5, el circuito actúa como un reductor. De lo contrario, el circuito se comporta como elevador [1].

El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la Figura 2.3. Es importante notar

que si el convertidor incorpora un transformador, con el fin de dar aislamiento eléctrico, se obtiene un convertidor *Flyback*[1].

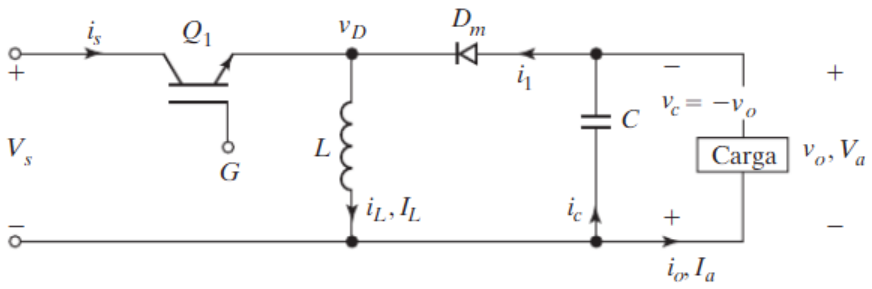



**Figura 2.3:** Diagrama de convertidor reductor-elevador [1].

### Regulador Cúk

En este tipo de reguladores, el voltaje de salida puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada, pero siempre con polaridad inversa respecto a la entrada. El circuito utiliza capacitores, inductores, transistores y diodos para su funcionamiento. El capacitor tiene un papel fundamental, ya que transfiere la energía de la entrada a la salida. El transistor se comporta como un interruptor, lo que provoca que el circuito trabaje de distinta manera dependiendo de su estado. Cuando el transistor conduce, se almacena energía en los inductores y el capacitor se carga de forma determinada; cuando el transistor está en corte, el capacitor transfiere su energía a la carga. Gracias a este proceso, el voltaje de salida se ajusta de acuerdo con el ciclo de trabajo, pudiendo ser mayor o menor al voltaje de entrada, pero siempre invertido en polaridad. El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la Figura 2.4 [1].

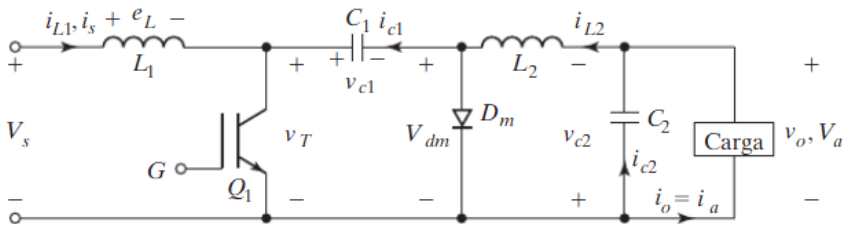



**Figura 2.4:** Diagrama de convertidor Cúk [1].

## 2.5 Transformadores

Un transformador es un dispositivo que, a través de la acción de un campo magnético, convierte energía eléctrica alterna de un nivel de voltaje a otro nivel de voltaje. Un transformador está compuesto por dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas sobre un mismo núcleo ferromagnético. Estas bobinas, por lo general, no tienen conexión eléctrica

directa entre sí, ya que la interacción ocurre únicamente a través del flujo magnético compartido dentro del núcleo. Una de ellas se conecta a la fuente de energía eléctrica alterna y recibe el nombre de devanado primario o de entrada, mientras que la bobina que alimenta a la carga se denomina devanado secundario o de salida. En caso de existir una tercera bobina, esta se conoce como devanado terciario. La relación entre la cantidad de vueltas de alambre en el primario y la cantidad de vueltas de alambre en el secundario define la relación de transformación. Esta relación afecta la conversión de voltaje y corriente. Por ejemplo, si el primario tiene diez vueltas de alambre y el secundario cinco, el voltaje se duplica a la salida y la corriente de salida correspondería a un medio de la entrada. El diagrama de un transformador ideal se puede observar en la Figura 2.5 [2].

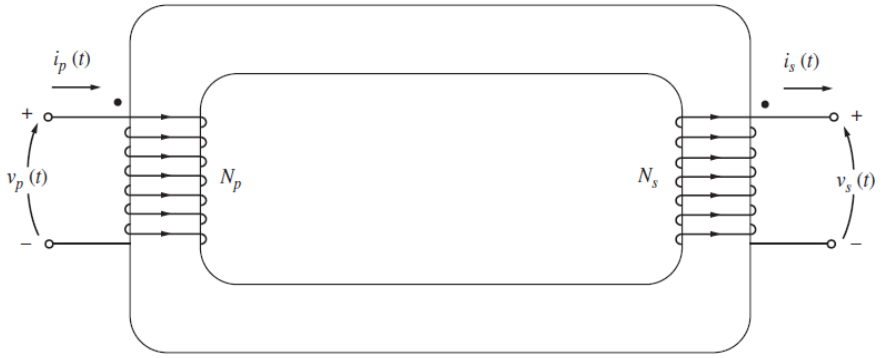



**Figura 2.5:** Diagrama de transformador ideal [2].

## 2.6 Rectificadores

Los rectificadores son circuitos que transforman una señal de corriente alterna a una señal de corriente directa. Estos circuitos están conformados por diodos que permiten bloquear el flujo de corriente en una dirección. Los tipos de rectificadores se describen adelante [1].

### Rectificador de media onda

Este tipo de circuitos utiliza un diodo antes de la carga de forma que el ciclo negativo de la fuente se bloquea. En consecuencia, la carga recibe solo los ciclos positivos de la fuente.

### Rectificador de onda completa con transformador de con derivación central

Este tipo de circuito transforma el ciclo negativo de una señal de corriente alterna en uno positivo. Esto lo logra colocando un transformador conectado a dos diodos en paralelo a la carga, de forma tal que a pesar de que cambie el ciclo uno de los diodos siempre alimenta la carga. Sin embargo, la forma de la onda se mantiene. El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la Figura 2.6 [1].

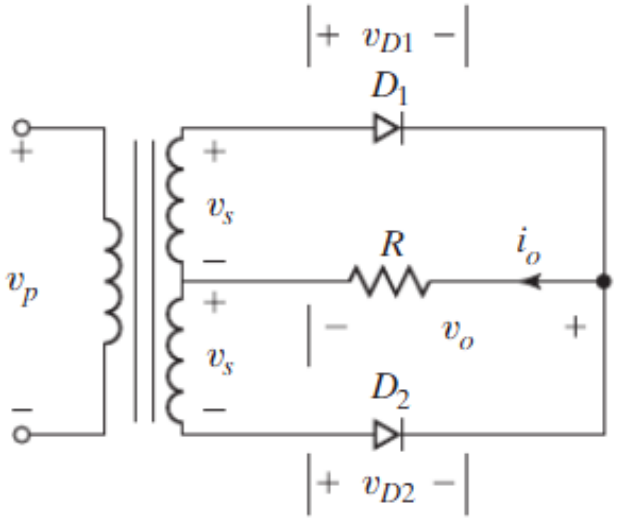



**Figura 2.6:** Diagrama de rectificador de onda completa con un transformador de con derivación central [1].

### Rectificador de onda completa con puente

Este tipo de circuito transforma el ciclo negativo de una señal de corriente alterna en uno positivo. Esto lo logra colocando cuatro diodos que rodean la carga. Dos de ellos se encargan de suministrar a la carga el ciclo positivo mientras que bloquean el negativo. Los otros dos suministran el negativo y bloquean el positivo. Es importante notar que esta conexión mantiene la forma de la onda. Esto se puede mitigar al conectar un capacitor paralelo a la carga. Este se opone al cambio de voltaje por lo que al ocurrir el cambio de ciclo la onda no tiene oportunidad de variar. El diagrama general del circuito se ve ejemplificado en la Figura 2.7 [1].

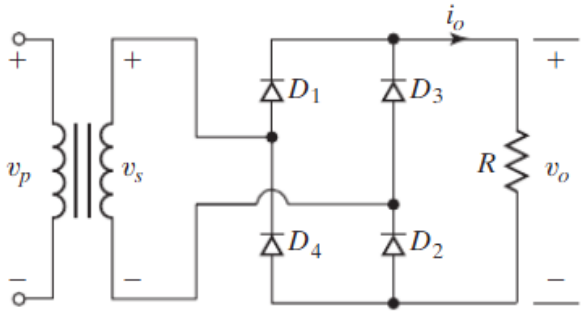



**Figura 2.7:** Diagrama de rectificador de puente [1].

## 2.7 Efecto Hall

El efecto Hall es un fenómeno físico que ocurre cuando un conductor o semiconductor por el que circula una corriente eléctrica I se coloca dentro de un campo magnético perpendicular

B. Bajo estas condiciones, los portadores de carga (electrones) experimentan una fuerza de Lorentz que los desvía, generando un voltaje transversal perpendicular tanto a la dirección de la corriente como al campo magnético. Los sensores de corriente basados en efecto Hall utilizan un conductor a través del cual circula la corriente a medir. El sensor de efecto Hall se coloca cerca de este conductor (en contacto magnético, pero sin contacto eléctrico), y el campo magnético generado por la corriente induce un voltaje Hall proporcional a la magnitud de la corriente. Por este medio se puede medir tanto la corriente alterna como la directa y además está aislado eléctricamente [11].

## 2.8 Estado de Carga

El estado de carga (SOC) es una medida que indica cuánta energía disponible queda en una batería en un momento dado. Se expresa como un valor normalizado entre 0 (descargada) y 1 (completamente cargada). En sistemas como los vehículos eléctricos, el SOC cumple el papel equivalente al medidor de combustible en un automóvil convencional, pues informa sobre la autonomía disponible y facilita la planificación de cargas. La estimación precisa del SOC es fundamental en los Sistemas de Gestión de Baterías (BMS) [12].

La precisión del SOC posee varias dificultades:

- Curvas de descarga no lineales, que impiden depender únicamente del voltaje para estimarlo.
- Errores en la medición de corriente, que pueden acumularse en métodos como el conteo de Coulomb.
- Degradación de la batería, ya que su capacidad disminuye con el tiempo.
- Autodescarga natural, incluso cuando no se utiliza.
- Perfiles de carga dinámicos, que complican el seguimiento en aplicaciones de alta variabilidad.
- Modelos complejos, que requieren parametrización precisa para métodos avanzados como los basados en filtros Kalman.

El SOC de una batería se puede calcular de esta manera:

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{total}} \int_{t_0}^{t_1} \frac{\eta i(t)}{3600} dt \tag{2.1}$$

Donde i(t) es la corriente en amperios (negativa si se está descargando), n es el factor de eficiencia coulómbica sin unidad, C es la capacidad total de la batería en Ah, y SOC(t) es el estado de carga en el instante t [12].

Sin embargo, existen distintos métodos para aproximar.

#### Conteo de Coulombs (Coulomb Counting)

El método de conteo de Coulombs consiste en medir la corriente que entra y sale de la batería y luego integrar este valor en el tiempo para estimar el estado de carga en relación con la capacidad total de la batería [12].

#### Tensión en Circuito Abierto (Open Circuit Voltage, OCV)

Este método mide el voltaje de la batería cuando está en reposo y lo relaciona con curvas características previamente determinadas que indican el nivel de carga de la batería [12].

#### Modelos Eléctricos

Consiste en representar la batería mediante un modelo equivalente eléctrico, como circuitos RC, y estimar el SOC ajustando los parámetros del modelo de acuerdo con las mediciones de corriente y voltaje de la batería [12].

#### Filtros de Kalman (EKF, UKF)

Este enfoque combina un modelo matemático de la batería con mediciones reales para predecir y actualizar de manera dinámica el SOC mediante algoritmos de filtrado como el Filtro de Kalman Extendido (EKF) o el Filtro de Kalman Unscented (UKF) [12].

#### Inteligencia Artificial

Utiliza redes neuronales u otros algoritmos de aprendizaje automático entrenados con datos de corriente, voltaje y temperatura de la batería para estimar el SOC de manera precisa sin depender únicamente de modelos físicos) [12].

## 2.9 Modelo OSI

El concepto de interconexión de sistemas abiertos (OSI) es el conjunto de normas para comunicaciones entre computadoras. El modelo OSI explica un lineamiento estructurado para el intercambio de datos en redes. El modelo consiste en capas de protocolos específicos para la comunicación. Cada capa refiere a un nivel de abstracción para una fácil comprensión donde la capa más baja es la física y la más alta la de aplicaciones. El orden de la jerarquía se ve ejemplificado en la Figura 2.8 [3].

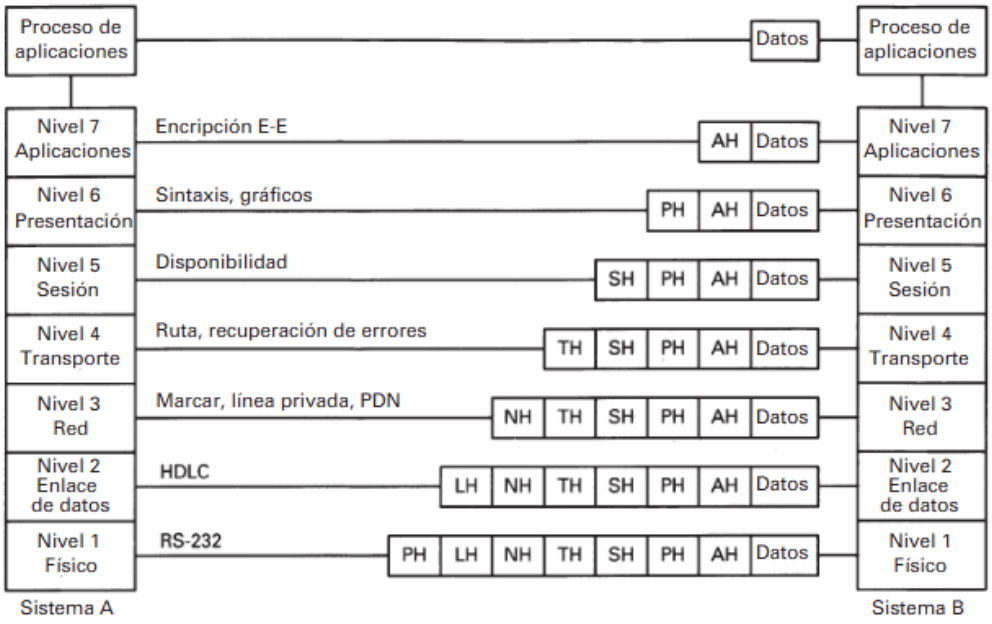



**Figura 2.8:** Jerarquía del modelo OSI [3].

## 2.10 Ethernet

Ethernet es un protocolo de comunicación para redes que transmite datos en banda base. El protocolo opera principalmente en la capa física y de enlace de datos del modelo OSI. La velocidad estándar puede variar, siendo común 10, 100, 1000 o más Mbps dependiendo de la implementación [3].

Ethernet utiliza topologías físicas de bus o estrella y emplea el método de acceso CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) para regular el acceso al medio compartido. Los datos se transmiten en tramas que incluyen información de dirección MAC, control de errores y carga útil, lo que permite una comunicación confiable entre nodos en la red [3].

## 2.11 I2C

El protocolo de comunicación serial I2C o *Inter-Integrated Circuit* es un protocolo de dos cables que soporta múltiples dispositivos conectados en un bus de datos. En este sentido, el protocolo también puede admitir múltiples controladores que envían y reciben comandos y datos. La comunicación se envía en paquetes de bytes con una dirección única para cada dispositivo de destino. I2C soporta varios modos de operación con distintas velocidades de transmisión y opera en la capa física del modelo OSI [13].

## 2.12 Single Board Computer

Una Single Board Computer (SBC), u Ordenador de Placa Única, es una computadora completa y funcional construida enteramente sobre una única placa de circuito impreso. Fundamentalmente, una SBC integra todos los componentes esenciales que se encuentran en una computadora, como el microprocesador, la memoria de acceso aleatorio (RAM), el almacenamiento (a menudo a través de una tarjeta microSD), y diversas interfaces de entrada/salida como puertos USB y HDMI, además de opciones de conectividad de red. Una de sus principales características es su tamaño compacto. Originalmente, estas fueron diseñadas para fines educativos y para facilitar el aprendizaje de la programación. Estas placas se han transformado en el núcleo de innumerables aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), robótica, sistemas embebidos y centros multimedia debido a su bajo costo, pequeño tamaño y eficiencia energética. Una característica fundamental de muchas SBC modernas es la inclusión de pines GPIO (General-Purpose Input/Output), que permiten a los usuarios interactuar directamente con circuitos electrónicos externos, sensores y actuadores, facilitando el desarrollo de proyectos de electrónica y control de sistemas físicos [6].

# Capítulo 3

# Metodología del Diseño del Monitoreo

La metodología utilizada para el desarrollo de la solución fue la metodología de Ulrich-Eppinger para el desarrollo de productos. Debido a esto, se realizó el proceso paso a paso, como lo dicta la metodología.

## 3.1 Fase 1: Identificación y determinación de necesidades

Con el fin de entender los detalles del problema, se realizó el proceso de entrevista con el cliente. Este proceso se documentó por medio de una grabación y permitió entender mejor la situación. Después de una serie de visitas al laboratorio para documentar el proceso actual, se obtuvo una mejor comprensión de la diferencia entre las necesidades del proyecto actual y las del proyecto original [14].
De seguido, se realizó la identificación de necesidades. Las necesidades se redactaron a partir de los datos obtenidos en el proceso de entrevista. Una vez que se completó esta lista, las necesidades fueron compartidas con el laboratorio para establecer la importancia relativa de cada una. Con este fin, se realizó una encuesta. Dicha encuesta se compartió con el cliente. La encuesta emplea una escala del 1 al 5 para clasificar la importancia de las necesidades. El valor 1 indica que la función es indeseable y que no se consideraría un proyecto que contemple esta función. El valor 2 señala que la función no es importante, pero que no importaría que estuviera presente dentro del proyecto. El valor 3 expresa que sería bueno tener esa función, aunque no es necesaria para el desarrollo del proyecto. El valor 4 corresponde a una función altamente deseable, pero aun así se consideraría un proyecto sin ella. Finalmente, el valor 5 indica que la función es de importancia crítica y que no se consideraría un proyecto que no la incluya. A partir de este proceso se categorizaron y jerarquizaron las necesidades como se puede ver en la Tabla 3.1, la Tabla 3.2 y la Tabla la Tabla 3.3 [14].

**Tabla 3.1:** Categorización de funciones del sistema de monitoreo

| # | **Función de importancia crítica** | **Es altamente deseable pero consideraría un producto sin ella** |
|---|---|---|
| 1 | La solución permite medir el consumo de corriente de los dispositivos conectados. | La solución mide la cantidad de energía extraída de cada batería. |
| 2 | La solución permite medir el voltaje de salida del inversor. | La solución facilita la comparación de desempeño entre distintos tipos de batería. |
| 3 | La solución muestra el voltaje de operación de las baterías monitoreadas. | La solución permite ampliar el monitoreo a múltiples baterías en paralelo. |
| 4 | La solución mide el porcentaje actual de carga de cada batería. | La solución indica la dirección del flujo de corriente (carga o descarga). |
| 5 | La solución registra datos históricos de operación para análisis posterior. | La solución activa notificaciones de alerta tanto en sitio como en la interfaz remota. |
| 6 | La solución permite el monitoreo de los tres sistemas de baterías litio, plomo y vanadio. | La solución permite integrar una futura estación de carga de baterías. |
| 7 | La solución ofrece visualización de datos en una interfaz accesible desde computadora. | La solución presenta dimensiones compatibles con el espacio disponible en el cuarto de máquinas. |
| 8 | La solución cuenta con una interfaz local para visualización directa de la información. | La solución requiere un mantenimiento compatible con el mantenimiento periódico de las baterías. |
| 9 | La solución mantiene un registro continuo y permanente de los datos recolectados. | |
| 10 | La solución ofrece una frecuencia de muestreo configurable por el usuario. | |
| 11 | La solución presenta acceso remoto a los datos en tiempo real. | |
| 12 | La solución se integra con redes existentes para transmitir información. | |
| 13 | La solución incluye una alarma audible en caso de fallo o desconexión. | |
| 14 | La solución incluye una alarma visible en caso de fallo o desconexión. | |
| 15 | La solución es fácil acceso físicamente sin restricciones para instalación y mantenimiento. | |

**Tabla 3.2:** Jerarquización de necesidades (Parte 1/2)

| # | **Estado operativo de las baterías** | **Medición variables eléctricas** | **Registro de datos** | **Monitoreo remoto** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | La solución indica la dirección del flujo de corriente (carga o descarga). | La solución permite medir el consumo de corriente de los dispositivos conectados. | La solución registra datos históricos de operación para análisis posterior. | La solución presenta acceso remoto a los datos en tiempo real. |
| 2 | La solución mide la cantidad de energía extraída de cada batería. | La solución proporciona lectura del voltaje de entrada del inversor. | La solución cuenta con una interfaz local para visualización directa de la información. | La solución se integra con la red de comunicación existente para transmitir información. |
| 3 | La solución muestra el voltaje de operación de las baterías monitoreadas. | | La solución ofrece una frecuencia de muestreo configurable por el usuario. | |
| 4 | La solución mide el porcentaje actual de carga de cada batería. | | La solución permite el monitoreo de baterías de litio, plomo y vanadio. | |

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.2 – continuación de la página anterior

| # | **Estado operativo de las baterías** | **Medición variables eléctricas** | **Registro de datos** | **Monitoreo remoto** |
|---|---|---|---|---|
| 5 | | | La solución ofrece visualización de datos en una interfaz accesible desde computadora. | |
| 6 | | | La solución facilita la comparación de desempeño entre distintos tipos de batería. | |
| 7 | | | La solución ofrece una frecuencia de muestreo configurable por el usuario. | |

**Tabla 3.3:** Jerarquización de necesidades (Parte 2/2)

| # | **Mecanismo de alerta** | **Adaptación entorno físico** | **Escalable** |
|---|---|---|---|
| 1 | La solución incluye una alarma audible en caso de fallo o desconexión. | La solución es accesible físicamente sin restricciones para instalación y mantenimiento. | La solución permite integrar una futura estación de carga de baterías. |
| 2 | La solución incluye una alarma visible en caso de fallo o desconexión. | La solución presenta dimensiones compatibles con el espacio disponible en el cuarto de máquinas. | La solución permite ampliar el monitoreo a múltiples baterías en paralelo. |
| 3 | La solución activa notificaciones de alerta tanto en sitio como en la interfaz remota. | La solución requiere un mantenimiento compatible con el mantenimiento periódico de las baterías. | |

## 3.2 Fase 2: Establecimiento de especificaciones objetivo

Al tener las necesidades jerarquizadas y categorizadas, se necesita determinar cómo se puede validar el indice de cumplimiento. Con este fin, se elaboró un asocie de necesidades y sus métricas vista en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4:** Necesidades y sus Métricas Asociadas

| # | **Necesidad** | **Métrica Asociada** |
|---|---|---|
| 1 | La solución permite medir el consumo de corriente de los dispositivos conectados. | Rango de corriente medible |
| 2 | La solución permite medir el voltaje de salida del inversor. | Rango de voltaje medible (AC) |
| 3 | La solución muestra el voltaje de operación de las baterías monitoreadas. | Rango de voltaje medible (DC) |
| 4 | La solución mide el porcentaje actual de carga de cada batería. | Porcentaje de carga (SoC) por batería |
| 5 | La solución registra datos históricos de operación para análisis posterior. | Capacidad de Almacenaje |
| 6 | La solución permite el monitoreo de los tres sistemas de baterías litio, plomo y vanadio. | Presencia Ausencia |
| 7 | La solución ofrece visualización de datos en una interfaz accesible desde computadora. | Tiempo de Comprensión |
| 8 | La solución cuenta con una interfaz local para visualización directa de la información. | Tiempo de Comprensión |
| 9 | La solución mantiene un registro continuo y permanente de los datos recolectados. | Capacidad de Almacenaje |
| 10 | La solución ofrece una frecuencia de muestreo configurable por el usuario. | Disponibilidad del servicio |
| 11 | La solución presenta acceso remoto a los datos en tiempo real. | Nivel sonoro de alarma |
| 12 | La solución se integra con redes existentes para transmitir información. | Presencia Ausencia |
| 13 | La solución incluye una alarma audible en caso de fallo o desconexión. | Nivel sonoro de alarma |

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.4 – continuación de la página anterior

| # | **Necesidad** | **Métrica Asociada** |
|---|---|---|
| 14 | La solución incluye una alarma visible en caso de fallo o desconexión. | Intensidad luminosa |
| 15 | La solución es fácil acceso físicamente sin restricciones para instalación y mantenimiento. | Tiempo de intervención rutinaria |
| 16 | La solución mide la cantidad de energía extraída de cada batería. | Rango de Medición de Consumo Eléctrico |
| 17 | La solución facilita la comparación de desempeño entre distintos tipos de batería. | Tiempo de Comprensión |
| 18 | La solución permite ampliar el monitoreo a múltiples baterías en paralelo. | Rango de corriente medible y Porcentaje de carga (SoC) por batería |
| 19 | La solución indica la dirección del flujo de corriente (carga o descarga). | Tiempo de Comprensión |
| 20 | La solución activa notificaciones de alerta tanto en sitio como en la interfaz remota. | Tiempo de Comprensión |
| 21 | La solución permite integrar una futura estación de carga de baterías. | Rango de corriente medible |
| 22 | La solución presenta dimensiones compatibles con el espacio disponible en el cuarto de máquinas. | Tiempo de intervención rutinaria |
| 23 | La solución requiere un mantenimiento compatible con el mantenimiento periódico de las baterías. | Tiempo de intervención rutinaria |

De seguido, las métricas se asocian con valores objetivos como se ve en la Figura 3.5. Los valores marginales se obtuvieron consultando al cliente teniendo en cuenta el sistema actual. Los valores ideales se obtuvieron consultando al cliente sus expectativas de crecimiento.

**Tabla 3.5:** Métricas y valores de referencia para necesidades del sistema

| **Número de Métrica** | **Número de necesidad** | **Métrica** | **Unidades** | **Valor Marginal** | **Valor Ideal** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1, 17, 21 | Rango de corriente medible | Amperios (A) | 0-60 | 0-80 |
| 2 | 2 | Rango de voltaje medible (AC) | Voltios (V) | 0-120 | 0-240 |
| 3 | 3 | Rango de voltaje medible (DC) | Voltios (V) | 0-48 | 0-60 |
| 4 | 4, 18 | Porcentaje de carga (SoC) por batería | Porcentaje (%) | 0-100 | 0-100 |
| 5 | 5, 9 | Capacidad de Almacenaje | GigaBytes (GB) | 1 | 16 |
| 6 | 6, 12 | Presencia / Ausencia | Binario | Cumple | Cumple |
| 7 | 7, 8, 17, 19, 20 | Tiempo de Comprensión | Minutos | 15 | 10 |
| 8 | 10 | Rango de muestreo | Medición por hora | 30-60 | 30-120 |
| 9 | 11 | Disponibilidad del servicio | Porcentaje (%) | 95 | 100 |
| 10 | 13 | Nivel sonoro de alarma | Decibeles (dB) | 50 | 85 |
| 11 | 14 | Intensidad luminosa | Candela (cd) | 15 | 50 |
| 12 | 15, 22, 23 | Tiempo de intervención rutinaria | Minutos | 15 | 30 |
| 13 | 16 | Rango de Medición de Consumo Eléctrico | kWh | 0-240 | 0-300 |

## 3.3 Fase 3: Generación de conceptos de producto (solución)

Una vez que se tiene las métricas asociadas con los valores objetivo, el siguiente paso es conceptualizar el producto. Este proceso cuenta con distintas etapas.

### 3.3.1 División del problema en subproblemas

En esta etapa el problema se descompone en distintos subproblemas. El objetivo de este proceso es tener estrategias para resolver cada subproblema y así el problema entero. En este proyecto se realizó una descomposición funcional en la que los subproblemas se definen como funciones. Con este propósito, se definen entradas y salidas del sistema que debería ser la solución. La propuesta consiste en iniciar con un esquema de "caja negra", en el cual se establecen de forma tentativa las entradas y salidas de energía, materiales e información. Esta "caja negra" se puede observar en la Figura 3.1. Además, la descomposición de subproblemas se puede ver en la Figura 3.2 [14].

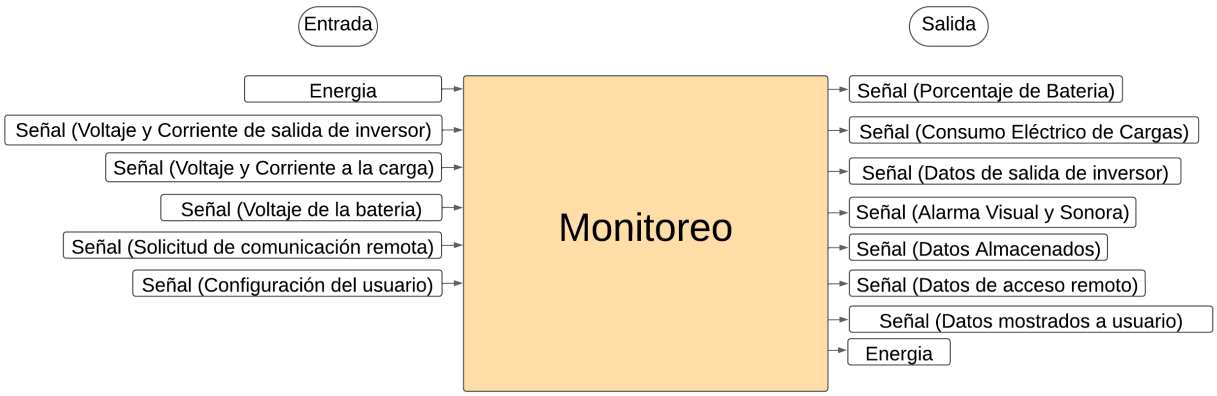



**Figura 3.1:** "Caja Negra" de entradas y salidas.

### 3.3.2 Búsqueda interna y externa de conceptos

A partir de la generación de los subproblemas, el siguiente paso es encontrar una solución para cada uno de ellos. Consecuentemente, se hizo una búsqueda de conceptos por cada subproblema para así analizar cual es el mejor de ellos. Esta búsqueda es interna (basada en conocimiento propios del diseñador) y externa (basada en la investigación). Con base a los subproblemas descritos en la Figura 3.2, se investigaron conceptos para cada uno. Dicha búsqueda culmino en las Tablas 3.6 y 3.7 [14].

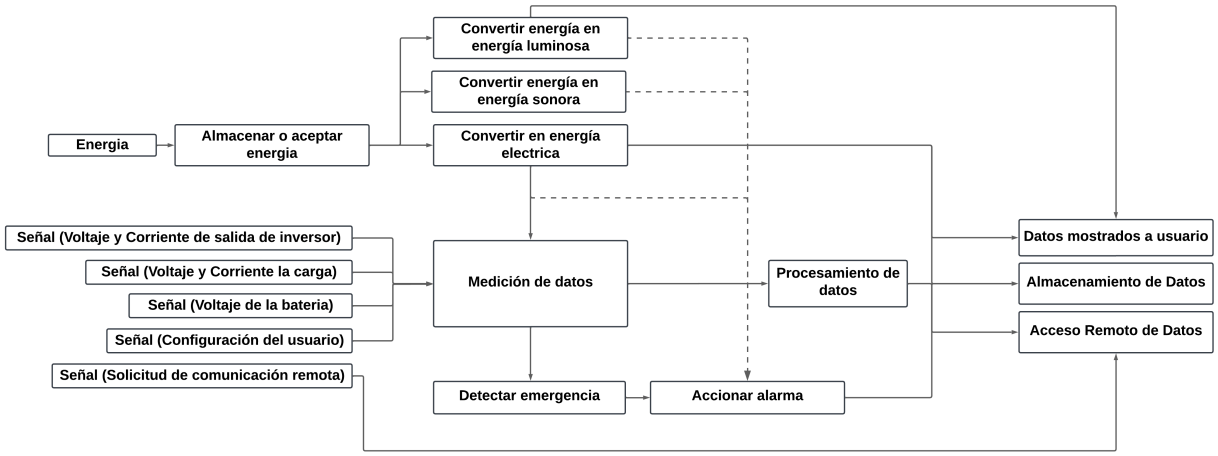



**Figura 3.2:** Descomposición del problema.

**Tabla 3.6:** Conceptos del sistema de monitoreo

| # | Almacenar o aceptar energía | Alarma Sónica | Alarma Visual | Procesamiento de datos | Datos mostrados al Usuario |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Sistema Eléctrico del lugar | Sirena | Luz LED | Raspberry Pi 5 | Pantalla OLED + botones |
| 2 | Baterías Disponibles | Buzzer Activo | Bombilla | ESP32 | Pantalla LCD + Botones |
| 3 | | Buzzer Pasivo | Pantalla | Arduino UNO | Raspberry Pi Touch Display |
| 4 | | Parlante | Sirena | Arduino MEGA | |

**Tabla 3.7:** Conceptos de almacenamiento y medición de datos

| # | Almacenamiento de Datos | Medición de datos (Consumo e inversor) | Medición de datos (Batería) |
|---|---|---|---|
| 1 | Influxdb OSS + Grafana | Sensor de efecto hall + buck converter + ADC (ADS1115) | LTC2941 + LT6375 Coulomb Counter |
| 2 | Influxdb nube + Grafana | Medición Shunt resistor + buck converter | Sensor de efecto hall + divisor de voltaje + ADC (ADS1115) |
| 3 | Prometheus + Grafana | SCT-013 + RPICT Hat (RPICT3T1) | Módulo INA3221 + buck converter + ADC (ADS1115) |
| 4 | Programa Propio (Python) | | Medición Shunt resistor + buck converter |
| 5 | TDengine OSS + Grafana | | Gas Gauge Chip Texas Instruments |
| 6 | | | BMS Power Monitor |

### Almacenar o aceptar energía

Debido a la naturaleza del sistema eléctrico del lugar, se consideró usar el mismo sistema fotovoltaico para alimentar el sistema. No obstante, al inspeccionar el lugar, se determinó que el sistema fotovoltaico no ha recibido el mantenimiento adecuado. En este sentido, como la licencia del sistema de monitoreo venció, no se ha podido realizar un estudio de las condiciones actuales de las baterias. En este sentido, dado que hay maquinaria sensible en el mismo cuarto, otras formas de energía (química, nuclear, térmica, etc.) no fueron consideradas.

### Alarma Sónica

Con el fin de alertar en caso de algún percance, se consideraron distintas opciones. Debido a que el cuarto de máquinas se ubica en una parte aislada del edificio, muchas alarmas sonoras no son lo suficientemente potentes para alertar en caso de una emergencia. En este sentido, ya que hay máquinas funcionando, cualquier alarma lo suficientemente potente podría producir contaminación sónica o incluso afectar la salud de alguien en la cercanía. Dicho esto, se consideraron opciones que pudieran alertar a alguien que este en el cuarto.

El buzzer activo incorpora un oscilador interno que genera el tono de alarma sin necesidad de una señal externa modulada, lo que simplifica considerablemente el circuito de control y su mantenimiento. Esto permite activarlo directamente mediante una salida digital, como la de un microcontrolador o una tarjeta como la Raspberry Pi, reduciendo el consumo de recursos y el riesgo de fallos en la generación de la señal. En comparación, un buzzer pasivo requiere una señal de frecuencia específica, lo que implica programar un PWM o un temporizador adicional. En la Figura 3.3 se puede visualizar un zumbador activo.



**Figura 3.3:** Zumbador activo[4]

A diferencia de un parlante, el buzzer activo está diseñado para emitir tonos constantes y penetrantes, que optimiza la percepción humana del sonido de alerta. Además, el parlante necesita un amplificador de potencia y un circuito más complejo para producir una señal similar, lo que incrementa el consumo, el espacio y el costo del sistema.

Por otro lado, una sirena ofrece una potencia sonora mucho mayor, pero esto suele ser innecesario y contraproducente en aplicaciones de emergencia a pequeña escala, como sistemas electrónicos o equipos portátiles. Las sirenas también consumen más corriente, son físicamente más grandes y generan un ruido excesivo en espacios cerrados.

En síntesis, el buzzer activo es la opción más adecuada por su simplicidad de conexión, bajo consumo, confiabilidad, tamaño reducido y facilidad de integración, manteniendo un nivel de sonido suficiente para alertar eficazmente en una emergencia.

### Alarma Visual

Para el sistema de alarma visual se consideraron distintas opciones, como el uso de luces LED, bombillas, sirenas o una pantalla. La pantalla permite no solo indicar la presencia de una emergencia, sino también mostrar información detallada sobre el tipo de evento, su ubicación y las acciones recomendadas. Esto resulta especialmente útil en un sistema donde la respuesta debe ser específica y rápida, ya que el usuario puede comprender la naturaleza del problema sin necesidad de interpretar códigos luminosos o señales sonoras.

En comparación, una luz LED o una bombilla ofrecen únicamente una señal binaria o limitada (encendido/apagado, colores fijos o parpadeo), lo que restringía la cantidad de información transmitida. Además, en entornos con múltiples indicadores, las señales luminosas podían confundirse o pasar inadvertidas.

Por otro lado, el uso de una sirena como medio de alarma resulta inadecuado en lugares donde el ruido excesivo generaba distracción, estrés o interferencias en la comunicación. En cambio, la pantalla representa una alternativa silenciosa y más informativa, capaz de combinar alertas visuales con mensajes de texto o gráficos que orientaban al usuario sobre cómo proceder.

En conclusión, la elección de la pantalla como medio de alarma visual se justificó por su capacidad de mostrar información clara, contextual y adaptable.

### Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se consideraron diferentes opciones, entre ellas la Raspberry Pi, el Arduino UNO, el Arduino MEGA y el ESP32. Cada una de estas plataformas ofrece ventajas particulares en cuanto a capacidad de cómputo, número de entradas y salidas, y posibilidades de comunicación.

La elección de estas versiones de marca se justifica por la necesidad de garantizar un mantenimiento sencillo y un uso confiable del sistema. Al utilizar versiones oficiales, se dispone de

documentación técnica precisa, guías de referencia actualizadas y una amplia comunidad en línea que facilita la resolución de problemas y la implementación de mejoras. Esto permite asegurar la continuidad del proyecto y reduce los riesgos asociados a fallas por incompatibilidades o falta de soporte.

En contraste, las versiones genéricas o de menor costo suelen presentar variaciones en los componentes, errores en el diseño del hardware o diferencias en la asignación de pines, lo que complica el proceso de depuración y el acceso a información confiable.

En términos de cantidad de pines disponibles para conexión y control de periféricos, las plataformas consideradas presentan diferencias importantes que influyen en su capacidad de expansión y nivel de control directo sobre sensores o actuadores.

El Arduino UNO cuenta con un total de 20 pines de entrada y salida (E/S), de los cuales 14 son digitales (de los cuales 6 pueden usarse como salidas PWM) y 6 son analógicos. Esta cantidad resulta suficiente para proyectos pequeños o de propósito específico, pero limitada cuando se requiere manejar varios sensores o módulos simultáneamente.

El Arduino MEGA amplía considerablemente estas capacidades, ofreciendo 54 pines digitales (15 con función PWM) y 16 entradas analógicas, lo que da un total de 70 pines de E/S. Gracias a esto, el MEGA es una opción adecuada para sistemas con múltiples conexiones o donde se requiere control directo de varios dispositivos.

El ESP32 dispone de aproximadamente 36 pines GPIO, dependiendo del modelo, de los cuales la mayoría pueden configurarse como entradas o salidas digitales, y varios admiten funciones analógicas, PWM, UART, SPI o I2C. Aunque tiene menos pines físicos que el Arduino MEGA, su versatilidad y funciones integradas (como Wi-Fi y Bluetooth) compensan esta diferencia en muchas aplicaciones.

Por su parte, la Raspberry Pi 5 incluye un conector GPIO de 40 pines, compatible con versiones anteriores. Estos pines permiten comunicación digital, PWM, UART, SPI e I2C, además de algunas funciones específicas de hardware. Si bien la cantidad es menor que la del Arduino MEGA, la Raspberry Pi compensa esta limitación con su capacidad de procesamiento, conectividad y posibilidad de comunicación por protocolos avanzados (WIFI, Bluetooth, etc.) [6].

En conclusión, entre las opciones analizadas, el Arduino MEGA es la placa con mayor número de pines disponibles, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren muchas conexiones físicas directas. Sin embargo, la Raspberry Pi sigue siendo la opción más completa para procesamiento de datos, interfaz de usuario y conectividad, incluso con un número menor de pines.

Por tanto, la decisión de emplear versiones originales de Raspberry Pi, Arduino UNO, Arduino MEGA y ESP32 responde a la necesidad de contar con un sistema bien documentado y de fácil mantenimiento, garantizando al mismo tiempo una integración adecuada con los demás componentes del proyecto.

El ESP32 incorpora conectividad Wi-Fi y Bluetooth de forma nativa, compatible con el estándar IEEE 802.11 b/g/n en la banda de 2.4 GHz. Esto le permite conectarse a redes

inalámbricas o crear su propia red sin necesidad de módulos externos, lo que lo hace ideal para aplicaciones IoT y de monitoreo remoto. Además, su bajo consumo energético favorece el uso en sistemas alimentados por batería.

De forma similar, la Raspberry Pi también cuenta con conectividad Wi-Fi integrada, lo que le permite acceder a redes inalámbricas sin requerir componentes adicionales y facilita la transmisión o respaldo de datos a través de internet [6].

Una de las principales razones por las que la Raspberry Pi destaca es su compatibilidad con pantallas táctiles, lo que permite implementar una interfaz de usuario (UI) interactiva. Esto facilita la visualización de información en tiempo real y la configuración de parámetros directamente desde el dispositivo, sin necesidad de una computadora externa [6].

Además, la Raspberry Pi cuenta con la capacidad de almacenar y gestionar datos localmente gracias a su sistema de memoria, lo que permite registrar información de manera continua y acceder a historiales o registros sin depender de una conexión a internet [6].

Otro aspecto relevante es que la Raspberry Pi incorpora conectividad tanto por Ethernet como por Wi-Fi de forma nativa, sin requerir módulos o componentes adicionales. Esto permite integrar el sistema fácilmente a redes locales o remotas para transmisión, respaldo o actualización de datos, garantizando una comunicación estable y flexible [6].

### Visualización de datos

Para la visualización de datos se consideraron pantallas económicas OLED, LCD y una pantalla táctil para la Raspberry Pi. Las pantallas OLED ofrecen buena resolución y contraste, pero su tamaño reducido limita la cantidad de información visible. Las pantallas LCD, aunque económicas y de bajo consumo, presentan menor claridad y capacidad gráfica.

En cambio, la pantalla táctil de la Raspberry Pi permite mostrar información en mayor detalle y con una interfaz gráfica interactiva. Su compatibilidad directa con el sistema operativo facilita el uso de menús, gráficos y controles táctiles sin hardware adicional. El tipo de pantalla mencionada se ejemplifica en la Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Pantalla táctil[4]

### Almacenamiento de datos

Se compararon cinco alternativas: InfluxDB OSS con Grafana, InfluxDB en la nube con Grafana, Prometheus con Grafana, un programa propio en Python y TDengine OSS con Grafana [8].

InfluxDB OSS con Grafana está optimizada para manejar series temporales de alta frecuencia, permite instalación local sin depender de internet y posee amplia documentación y soporte comunitario. Su integración con Grafana permite crear paneles de visualización avanzados sin configuraciones complejas [8].

InfluxDB en la nube con Grafana ofrece las mismas capacidades que la instalación local, pero su funcionamiento depende de la conexión a internet y genera costos recurrentes, lo que reduce su conveniencia para sistemas autónomos [8].

Prometheus con Grafana es una herramienta ampliamente usada en monitoreo de servidores y sistemas informáticos; sin embargo, su diseño está orientado a métricas de baja frecuencia y sus mecanismos de almacenamiento no son ideales para datos eléctricos continuos o de alta resolución, por lo que resulta menos adecuado para mediciones energéticas[8].

El programa propio en Python brinda total flexibilidad, pero requiere que el usuario implemente manualmente la estructura de almacenamiento, la optimización del rendimiento y los métodos de consulta. Esto incrementa la complejidad del desarrollo y aumenta el riesgo de errores o pérdidas de datos. En este sentido, el mantenimiento o escalabilidad del proyecto se ven comprometidos ya que dependerian de personal calificado que pueda desarrollar el sistema.

Por su parte, TDengine OSS con Grafana ofrece buen rendimiento en aplicaciones de series temporales, pero su ecosistema es más limitado y la documentación es menos extensa que la de InfluxDB, lo que dificulta su mantenimiento [8].

### Medición de datos consumo de cargas

Las alternativas consideradas fueron: sensor de efecto Hall con convertidor reductor y ADC ADS1115, medición mediante resistencia shunt con convertidor reductor, y la combinación SCT 013 con el módulo RPICT Hat RPICT.

El sistema con SCT 013 y RPICT resultó la opción más conveniente debido a su medición aislada, su facilidad de instalación y su compatibilidad directa con la Raspberry Pi. Al no requerir circuitos adicionales complejos ni calibraciones extensas, ofrece mediciones estables y seguras para corriente alterna.

La solución basada en sensor de efecto Hall con convertidor reductor y ADC permite medir tanto corriente alterna como continua y proporciona aislamiento galvánico, pero presenta menor precisión y requiere mayor trabajo de calibración, además de que su fidelidad depende del diseño del circuito.

La medición por resistencia shunt con convertidor reductor ofrece buena precisión en corriente

directa; sin embargo, no proporciona aislamiento galvánico y requiere un diseño cuidadoso para evitar caídas de potencia, sobrecalentamiento y riesgos eléctricos.

#### Medición de datos consumo de baterías

Se evaluaron las siguientes opciones: módulo LTC2941 con LT6375 tipo contador de carga, sensor de efecto Hall con divisor de voltaje y ADC ADS1115, módulo INA3221 con convertidor reductor y ADC, medición por resistencia shunt con convertidor reductor, medidores tipo gas gauge de Texas Instruments y un BMS Power Monitor, como el de la Figura 3.5.

Un BMS Power Monitor, además de medir corriente, voltaje y temperatura, ofrece funciones de protección, balanceo y supervisión del estado de la batería, lo que lo hace ideal para sistemas donde se requiere seguridad y gestión integrada [5].




**Figura 3.5:** Ejemplo de BMS[5]

El sistema basado en sensor de efecto Hall con divisor de voltaje y ADC ADS1115 ofrece flexibilidad, bajo costo y un diseño modular. Sin embargo, presenta menor precisión, requiere calibración y no incluye funciones de protección tan extensas como un BMS.

El módulo LTC2941 con LT6375 tipo contador de carga proporciona alta precisión en corriente y capacidad, pero su implementación es más compleja y su integración requiere un diseño detallado.

El INA3221 con convertidor reductor y ADC combina medición de corriente y voltaje en un solo módulo, aunque su exactitud depende de las resistencias shunt internas y su calibración.

La medición por resistencia shunt con convertidor reductor es simple y económica, pero carece de aislamiento y puede introducir riesgos térmicos o eléctricos.

Finalmente, los gas gauge de Texas Instruments son precisos y confiables, pero suelen estar diseñados para aplicaciones específicas y requieren integración detallada.

### 3.3.3 Exploración de conceptos

Luego de una búsqueda exhaustiva de conceptos, el siguiente paso es unirlos para analizar como el problema se puede solucionar. Estas combinaciones serviran para hacer la selección final. Dado que las combinaciones posibles son más de treinta mil, se analizaron solo ciertas combinaciones a criterio del diseñador. Dichas combinaciones fueron elegidas para

presentar los conceptos más prominentes de cada subproblema. De esta forma, las soluciones candidatas son variadas. Esta exploración se puede detallar en las Tablas 3.8 y 3.8 [14].

**Tabla 3.8:** Combinaciones de conceptos (Parte 1/2)

| # | **Fuente de Energía** | **Alarma Sónica** | **Alarma Visual** | **Medición de datos (Consumo e inversor)** | **Medición de datos (Batería)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Sistema Eléctrico del lugar | Buzzer Activo | Pantalla | SCT-013+ RPICT Hat (RPICT3T1) | Victron Power Monitor |
| 2 | Sistema Eléctrico del lugar | Buzzer Activo | Pantalla | SCT-013+ RPICT Hat (RPICT3T1) | LTC2941+ LT6375 Coulomb Counter |
| 3 | Sistema Eléctrico del lugar | Sirena | Bombilla | Sensor de efecto hall + ADC (ADS1115) | Modulo INA3221 + buck converter + ADC (ADS1115) |
| 4 | Sistema Eléctrico del lugar | Sirena | Sirena | Medición Shunt resistor | Medición Shunt resistor |
| 5 | Sistema Eléctrico del lugar | Parlante | Luz LED | Sensor de efecto hall + ADC (ADS1115) | Gas Gauge Chip Texas Instruments |
| 6 | Sistema Eléctrico del lugar | Buzzer Pasivo | Sirena | Medición Shunt resistor | Medición Shunt resistor |

**Tabla 3.9:** Combinaciones de conceptos (Parte 2/2)

| # | **Procesamiento de Datos** | **Datos mostrados al Usuario** | **Almacenamiento de Datos** |
|---|---|---|---|
| 1 | Raspberry Pi 5 | Raspberry pi touch display | Influxdb OSS + Grafana |
| 2 | Raspberry Pi 5 | Raspberry pi touch display | Programa Propio (Python) |
| 3 | Esp32 | Pantalla OLED + botones | Prometheus + Grafana |
| 4 | Arduino UNO | Pantalla OLED + botones | TDengine OSS + Grafana |
| 5 | Arduino MEGA | Pantalla LCD + Botones | Influxdb nube + Grafana |
| 6 | Arduino MEGA | Pantalla LCD + Botones | Programa Propio (Python) |

## 3.4 Fase 4: Selección de conceptos de producto (solución)

El proceso de selección de conceptos consiste en la evaluación de las propuestas respecto a las necesidades del cliente y otros criterios. El proceso compara las fortalezas y debilidades relativas de los conceptos para luego seleccionar uno o más con el fin de continuar su desarrollo. Con este fin se hace un proceso de filtrado y evaluación. En el proceso de filtrado el objetivo es eliminar conceptos desfavorables y combinar o mejorar conceptos. Este proceso es general por lo que su resultado es unicamente si ciertos conceptos pasan o si se combinan. Consecuentemente, este proceso no es numérico por lo que solo se considera si el concepto es superior, neutro o inferior a los demás para cada criterio. Este proceso se desarrolló como se representa en la Tabla 3.10 [14].

**Tabla 3.10:** Filtrado de conceptos según criterios de selección

| **Criterios de Selección / Conceptos** | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** | **C5** | **C6** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Funcionalidad | + | + | 0 | - | - | - |
| Costo | - | - | + | + | 0 | 0 |
| Mantenimiento | + | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| Aplicabilidad | + | 0 | - | - | 0 | 0 |
| Facilidad de Uso | + | 0 | - | - | - | - |
| Escalabilidad | + | 0 | - | - | + | + |
| **Suma +** | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **Suma 0** | 0 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| **Suma -** | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| **Evaluación Neta** | 4 | 0 | -2 | -3 | -2 | -1 |
| **¿Continuar?** | Sí | Sí | No | No | No | Sí |

De seguido, el proceso de evaluación consiste en seleccionar un concepto ganador para desarrollar. Es crucial que la evaluación asigne un peso de importancia a cada criterio y que todo el proceso quede documentado para facilitar futuras revisiones o recibir comentarios. Con este fin, se le asigna un peso numérico a cada criterio de selección. Luego, se califica cada concepto para cada criterio. Luego se multiplica la calificación con el peso para cada criterio. Finalmente, se suma cada evaluación para darle una evaluación neta a cada concepto. El concepto con la mejor evaluación neta se desarrolla. Este proceso se ejemplifica como se ve en la tabla 3.11.[14]

**Tabla 3.11:** Matriz de Evaluación Conceptos

| | | **Concepto 1** | **Concepto 2** | **Concepto 6** |
|---|---|---|---|---|
| **Criterios de Selección** | **PESO** | **Calificación / Evaluación ponderada** | **Calificación / Evaluación ponderada** | **Calificación / Evaluación ponderada** |
| Funcionalidad | 0.2 | 4 / 0.8 | 4 / 0.8 | 2 / 0.4 |
| Costo | 0.2 | 1 / 0.2 | 1 / 0.2 | 3 / 0.6 |
| Mantenimiento | 0.2 | 5 / 1.0 | 4 / 0.8 | 3 / 0.6 |
| Aplicabilidad | 0.1 | 4 / 0.4 | 3 / 0.3 | 2 / 0.2 |
| Facilidad de Uso | 0.1 | 5 / 0.5 | 3 / 0.3 | 2 / 0.2 |
| Escalabilidad | 0.1 | 5 / 0.5 | 3 / 0.3 | 4 / 0.4 |
| **Evaluación Neta** | | **3.4** | **2.7** | **2.4** |
| **Lugar** | | **1** | **2** | **3** |
| **¿Continuar?** | | **Desarrollar** | **No** | **No** |

Es por este proceso que el concepto uno de las Tablas 3.6 y 3.7 es el ganador. Con el fin de tener una visualización del proceso realizado en este capítulo, se llevó a cabo un boceto. Dicho boceto se puede visualizar en la Figura 3.6. [14]

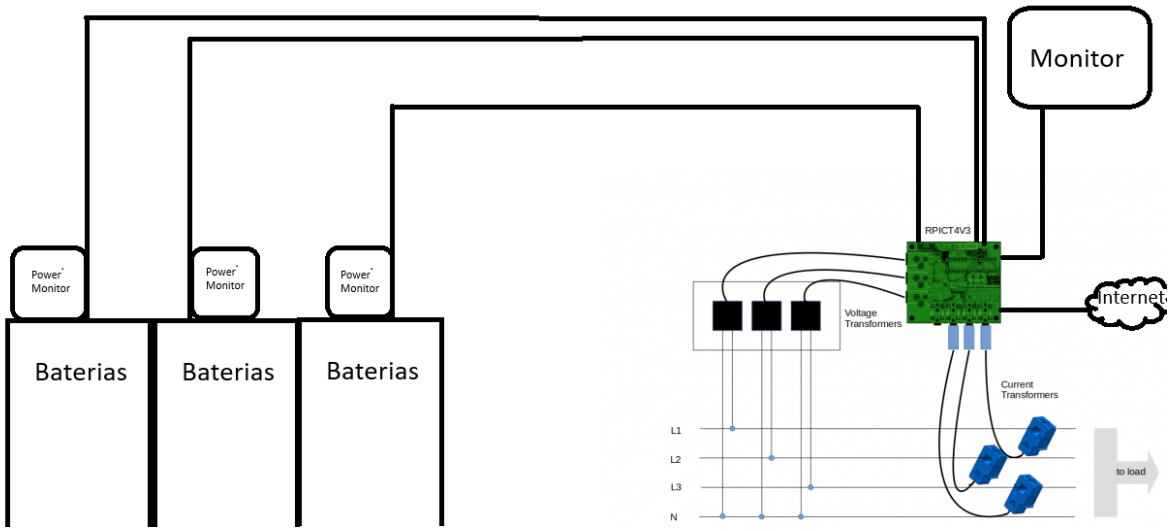



**Figura 3.6:** Boceto de la solución.

## 3.5 Fase 5: Validación de conceptos

Con el fin de determinar si las especificaciones se cumplieron, se idearon diferentes pruebas de concepto. Con este proposito, se enlistaron las necesidades generales y se asociaron con objetivos y variables de muestra como se observa en la Tabla 3.12. Las pruebas de concepto tienen en cuenta los factores de influencia de cada concepto. Los factores de influencia son aquellas variables, condiciones o elementos que pueden afectar el comportamiento, desempeño o resultado del sistema propuesto. Existen dos tipos: Bloque y Controlables. Los factores de influencia Controlables son aquellos factores que pueden ser influenciados en el momento de la validación. Por ejemplo, un factor Controlable es el usuario, el tiempo de medición, la configuración de un sistema, etc. Un ejemplo de un factor Bloque, que es un factor que no se puede alterar, sería el clima. Dichos factores de influencia se relacionan a los criterios de selección, los cuales fueron explicados en partes anteriores de este capítulo. Para poder relacionar los conceptos, los criterios y los factores de influencia se ha realizado la Tabla 3.13 [14].

**Tabla 3.12:** Tabla de Necesidades, Objetivos y Variables

| **Necesidades** | **Objetivos** | **Variables de muestra** |
|---|---|---|
| La solución permite observar el estado operativo de las baterías | El sistema mide el estado de las baterias. | Voltaje |
| La solución permite medir las condiciones eléctricas del sistema | El sistema mide datos de las lineas de las cargas. | Voltaje y Corriente |
| La solución facilita la recolección y análisis de datos | El sistema registra datos y los presenta para su facil comprensión. | Capacidad de Almacenamiento (MB) |
| La solución ofrece monitoreo en tiempo real desde distintas ubicaciones | El sistema puede transmitir datos de medición. | Delay Tiempo de carga |
| La solución proporciona mecanismos de alerta ante fallos | El sistema alerta en caso de que alguna variable a medir salga del rango esperado. | Decibeles |
| La solución es compatible con el entorno físico y operativo | El sistema tiene el menor tamaño posible. | Volumen métrico del sistema |
| La solución es escalable | El sistema puede aceptar una mayor cantidad de sensores | Cantidad de sensores a aceptar |

**Tabla 3.13:** Tabla de Conceptos, Criterios y Factores de Influencia

| **Conceptos** | **Criterios** | **Factores de influencia** |
|---|---|---|
| Sistema Eléctrico del lugar | Funcionalidad<br>Costo | Controlable: Calidad de cableado, protecciones eléctricas, disponibilidad de personal técnico.<br><br>Bloque: condiciones ambientales del lugar (humedad, polvo, lluvias), acceso limitado a repuestos. |
| Buzzer Activo | Funcionalidad<br>Costo<br>Aplicabilidad | Controlable: duración de sonido, modo de activación por software.<br><br>Bloque: ruido ambiental que afecte la percepción sonora. |
| Raspberry Pi 5 | Funcionalidad<br>Costo<br>Mantenimiento<br>Aplicabilidad | Controlable: frecuencia de limpieza, ventilación y mantenimiento del sistema operativo.<br><br>Bloque: degradación de componentes y condiciones ambientales del lugar . |
| Raspberry pi touch display | Funcionalidad<br>Costo<br>Mantenimiento<br>Aplicabilidad<br>Facilidad de Uso | Controlable: mantenimiento (limpieza de pantalla), resolución, brillo.<br><br>Bloque: desgaste por uso prolongado o exposición a polvo/humedad. |
| Influxdb OSS + Grafana | Funcionalidad<br>Costo<br>Mantenimiento<br>Facilidad de uso<br>Escalabilidad | Controlable: configuración de dashboards, frecuencia de actualización, estructura de base de datos.<br><br>Bloque: capacidad del servidor y velocidad de Internet del lugar. |
| SCT-013+ RPICT Hat (RPICT3T1) | Funcionalidad<br>Costo<br>Mantenimiento<br>Aplicabilidad<br>Escalabilidad | Controlable: calibración del sensor, frecuencia de muestreo.<br><br>Bloque: ruido electromagnético, saturación del núcleo de ferrita, resolución del ADC. |

Teniendo en cuenta los factores, se ha elaborado una lista de pruebas para poder confirmar el cumplimiento de las necesidades y de los objetivos. Estas pruebas se pueden observar de la Tabla 3.14 a la Tabla 3.17.

**Tabla 3.14:** Prueba de Usabilidad y Mantenimiento del Sistema (RPI5 + Display + InfluxDB + Grafana)

| **Sistema de Prueba: Raspberry Pi 5 + Touch Display + InfluxDB + Grafana** | | | |
|---|---|---|---|
| **Definición de la prueba:** Se realizarán 30 ensayos donde se medirá el tiempo de revisión física del sistema y el tiempo de comprensión de uso de diferentes usuarios. Para el tiempo de comprensión de uso se realizará una breve explicación (10 minutos) de cómo funciona el sistema y cómo se muestran los datos a diferentes usuarios. Luego, se pedirá a cada usuario que demuestre en pantalla todos los datos y se medirá el tiempo que tarde en realizarlo. También se anotará si le faltó algún dato. Para la revisión física se pedirá al equipo de mantenimiento que revise las conexiones y los datos medidos y se medirá el tiempo que tarda en terminar. Concomitantemente, se anotará si hubo alguna revisión incompleta. | | | |
| **Sujeto de Prueba** | **Tiempo de Comprensión (min)** | **Tiempo de Revisión (min)** | **Anotaciones** |
| Usuario | (Medir tiempo) | (Medir tiempo) | Completo o faltó X |
| | | | |

**Tabla 3.15:** Prueba de Transmisión de Datos (Raspberry Pi Connect)

| **Sistema de Prueba: InfluxDB + Grafana** | | | |
|---|---|---|---|
| **Definición de la prueba:** Se realizarán 30 ensayos en una ubicación distinta para medir el tiempo de envío de los datos. Por cada medición se medirá el delay, la duración de la transferencia de datos y la tasa de éxito y fracaso. | | | |
| **Ubicación** | **Delay (ms)** | **Éxito o Fracaso** | **Duración (s)** |
| Ubicación X-Y-Z | (Valor medido) | | (Valor medido) |
| | | | |

**Tabla 3.16:** Prueba de Perceptibilidad y Volumen del Buzzer

| **Sistema de Prueba: Buzzer** | | |
|---|---|---|
| **Definición de la prueba:** Se realizarán 30 ensayos del volumen del Buzzer activo a diferentes distancias mientras la contaminación sónica se mantiene como un factor bloque y se anotan con un micrófono sus decibeles en cada prueba. En un espacio controlado, se harán 30 ensayos del buzzer. Al empezar la medición, se calibra el sensor (teléfono celular Honor Magic 5 Lite G con la aplicación phyphox) para que la compensación de calibración esté en 0 con el zumbador desactivado. Esto se realiza con el fin de comparar el sonido con la contaminación sonora del ambiente. Luego, se miden los decibeles cuando se activa el zumbador y cuando se desactiva. | | |
| **Distancia de Prueba (m)** | **Nivel de Sonido Sirena (dB)** | **Nivel de Sonido Sirena con Contaminación (dB)** |
| 0–1 | (Medir dB) | (Medir dB) |
| | | |

**Tabla 3.17:** Prueba de Precisión y Calibración de Medición (SCT-013 + RPICT Hat)

| **Sistema de Prueba: SCT-013 + RPICT Hat (RPICT3T1)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Definición de la prueba:** Se realizarán 30 ensayos en los que se medirá la corriente y voltaje de una línea y el voltaje de las baterías (las que funcionen). Simultáneamente se medirá con otro instrumento para realizar una comparación entre la medición del sistema y la del instrumento calibrado. | | | | |
| **Instrumento Utilizado** | **Tipo de Batería (Línea)** | **Voltaje de Batería (V)** | **Voltaje de Línea (V)** | **Corriente de Línea (A)** |
| SCT | Vanadio, Litio, Ácido de Plomo | (Medición del Sistema) | (Medición del Sistema) | (Medición del Sistema) |
| Multímetro | | (Medición con Multímetro) | (Medición con Multímetro) | (Medición con Multímetro) |

# Capítulo 4

# Diseño a detalle del sistema de monitoreo

## 4.1 Lista de Materiales

Con el fin de desarrollar la solución, se ha enlistado todos los materiales utilizados. Dichos materiales se pueden observar en la Tabla 5.20.

## 4.2 Conexión eléctrica para líneas de cargas

Debido a que muchas de las necesidades conciernen la facilidad de uso y mantenimiento, se han elegido componentes de fácil conexión. Además, se consideró que en la empresa no hay ingenieros especializados en el tema y qué estén disponibles para su mantenimiento. Por lo tanto, los componentes más especializados fueron seleccionados considerando la cantidad de recursos en línea disponibles. También hubo un esfuerzo para hacer que, como no hay personal con experiencia en diseño de circuitos, la mayoría de los componentes fueran fáciles de sustituir. De forma que, si algún componente se daña, sería fácil desconectarlo y comprar otro.

El sistema se ensambla de forma que los sensores de corriente y voltaje se integran con el Raspberry Pi a través del módulo de adquisición RPICT4V3, que es un componente conocido como un Raspberry Pi HAT dada la forma en que se acopla sobre el Raspberry Pi. En primer lugar, los sensores de corriente tipo SCT-013 se conectan a las entradas de corriente del HAT, mientras que el sensor de voltaje ZMPT se conecta a las entradas de voltaje correspondientes del mismo módulo. El Raspberry Pi 5 se puede observar en la Figura 4.1.

Por su parte, los sensores de corriente SCT-013 se conectan a cada línea de la carga, permitiendo registrar la corriente consumida por cada fase o circuito supervisado. El sensor SCT-013 se ilustra en la Figura 4.2.

Dado que las corrientes típicas en las líneas del sistema alcanzan valores de hasta 60 amperios,

**Tabla 4.1:** Lista de Materiales

| # | **Nombre** | **Descripción** | **Cantidad** |
|---|---|---|---|
| 1 | Raspberry Pi | Raspberry Pi 5 4GB | 1 |
| 2 | Raspberry Pi Fuente de Alimentación | Raspberry Pi 27W USB-C PD Power Supply Black | 1 |
| 3 | Pantalla | Capacitive Touch Screen 7” HDMI | 1 |
| 4 | Sensor de Corriente | Non-Invasive AC Current Sensor SCT-013 (100A MAX) | 1 |
| 5 | Cable MicroHDMI-HDMI | High Speed 4K Micro HDMI to HDMI cable (2m) | 1 |
| 6 | Micro SD | MEM Micro SD 256GB ADATA PREMIER PRO V30 U3 100/85MB | 1 |
| 7 | Memoria USB | MEM USB 64GB KINGSTON EXODIA USB3.2 - NEGRA | 1 |
| 8 | Lector de Tarjetas USB-C | Lector de tarjetas USB-C UNNO TEKNNO | 1 |
| 9 | Sensor de Voltaje | ZMPT 3X Voltage Sensor | 1 |
| 10 | ADC | RPICT4V3 Version 6 | 1 |
| 11 | ADC | Módulo convertidor analógico digital DAC 4CH 16BIT ADS1115 | 1 |
| 12 | Amplificador Operacional | Circuito integrado LM358 dual low power operational amplifier DIP-8 | 1 |
| 13 | Resistores | Resistores 1/8W | 5 |
| 14 | Arduino UNO | Arduino UNO | 1 |
| 15 | Placa de Prototipado | Placa de cobre PCB perforada 9x15cm una cara fenólica | 1 |
| 16 | Caja de Proyectos | Caja de Proyectos | 1 |
| 17 | USB 2.0 Cable Type A/B | USB 2.0 Cable Type A/B | 1 |
| 18 | Terminal de Bloque | Terminal bloque 4 contactos PCB 7.62mm de tornillo tipo regleta KF7.62-4P | 2 |
| 19 | Terminal de Bloque | Terminal bloque 2 contactos PCB 2.54mm de tornillo | 1 |
| 20 | Cable Eléctrico | Cable automotriz GPT calibre #12 AWG | 3 |
| 21 | Cable Ethernet | Cable Ethernet | 1 |

y los voltajes de operación se sitúan alrededor de 120 voltios en las cargas y 60 voltios en las baterías, los componentes seleccionados resultan adecuados para las condiciones de trabajo previstas. En particular, los sensores de corriente SCT-013, con una capacidad máxima de 100 amperios, garantizan una medición segura y precisa sin riesgo de saturación, mientras

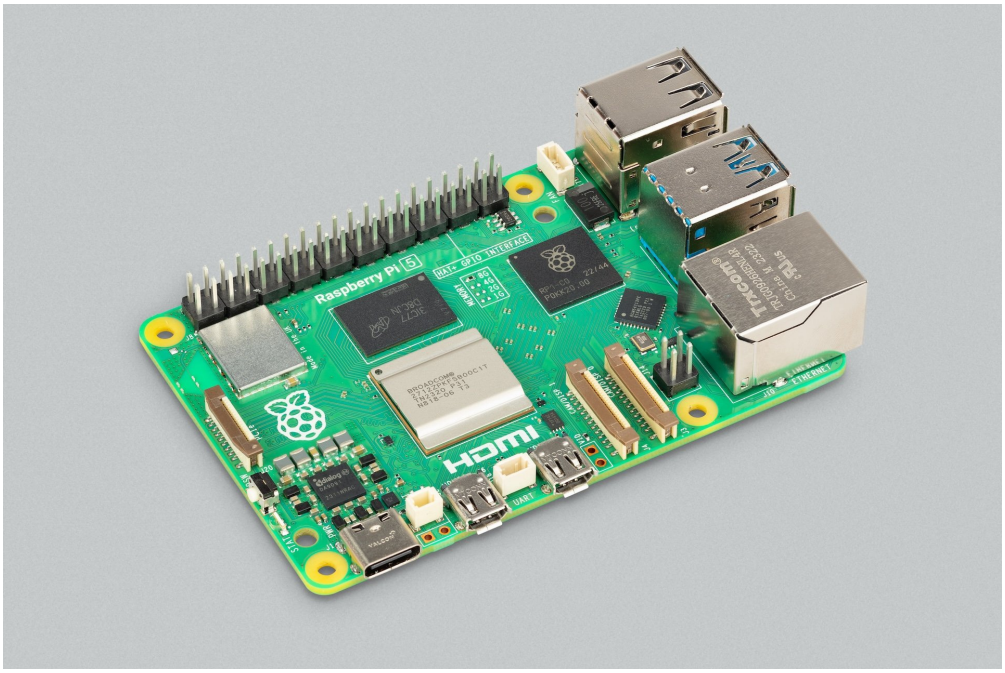



**Figura 4.1:** Raspberry Pi 5.[6]




**Figura 4.2:** Sensor SCT-013.[7]

que los sensores de voltaje ZMPT, diseñados para soportar hasta 270 voltios, ofrecen un margen suficiente para medir tanto los niveles de tensión de las cargas como los de las baterías. Esta selección asegura que el sistema pueda operar de forma confiable y dentro de los límites eléctricos seguros, manteniendo la integridad de los sensores. Un ZMPT se puede visualizar en la Figura 4.3.

Además, en caso de que se requiera medir corrientes de mayor magnitud, el módulo RPICT4V3 dispone de un cuarto puerto de corriente que podría emplearse para conectar otro sensor de corriente compatible. Existen varos sensores de corriente compatibles que miden desde los 100 amperios hasta 600 amperios. Esta posibilidad otorga al sistema una flexibilidad de expansión que permite adaptarlo a aplicaciones con mayores demandas eléctricas sin necesidad de reemplazar el hardware principal, manteniendo la compatibilidad con la infraestructura

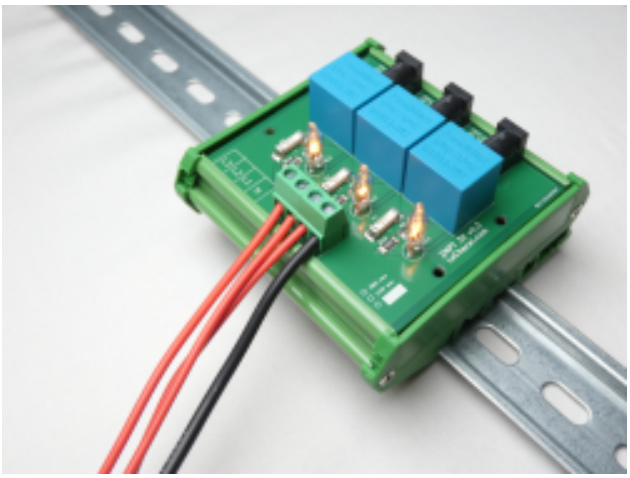


**Figura 4.3:** Sensor ZMPT.[7]

existente.

En este sentido, los RPICT permiten apilar hasta cinco módulos (o hats) de la misma línea sobre la Raspberry Pi, lo que posibilita la conexión de hasta 28 sensores adicionales. Esta característica ofrece una alta capacidad de expansión del sistema, permitiendo incorporar no solo más sensores de corriente y voltaje, sino también hats especializados en medición de temperatura. Gracias a ello, el proyecto podría escalar para incluir el monitoreo térmico de las baterías u otros componentes críticos, ampliando su funcionalidad sin comprometer la integración ni la estabilidad del sistema existente. El RPICT4V3 se ilustra en la Figura 4.4.

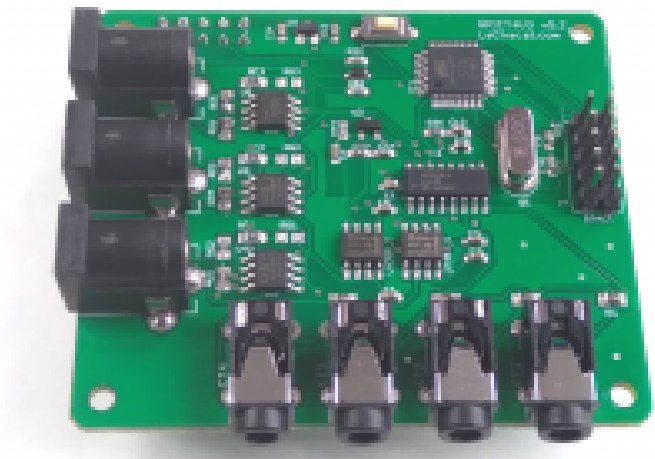


**Figura 4.4:** Módulo RPICT4V3.[7]

El RPICT4V3 se comunica directamente con la Raspberry Pi a través de los pines GPIO. En particular, el RPICT4V3 utiliza los pines 3, 4 y 5, que corresponden a las líneas SDA (datos del bus $I^2C$), 5 V (alimentación) y SCL (reloj del bus $I^2C$), respectivamente. Esta conexión permite que el Raspberry Pi lea las mediciones analógicas convertidas del módulo RPICT y las procese digitalmente. El RPICT se conecta en los pines de la Raspberry Pi como se muestra en la Figura 4.5. Los pines GPIO de la Raspberry Pi se pueden observar en la Figura 4.6.

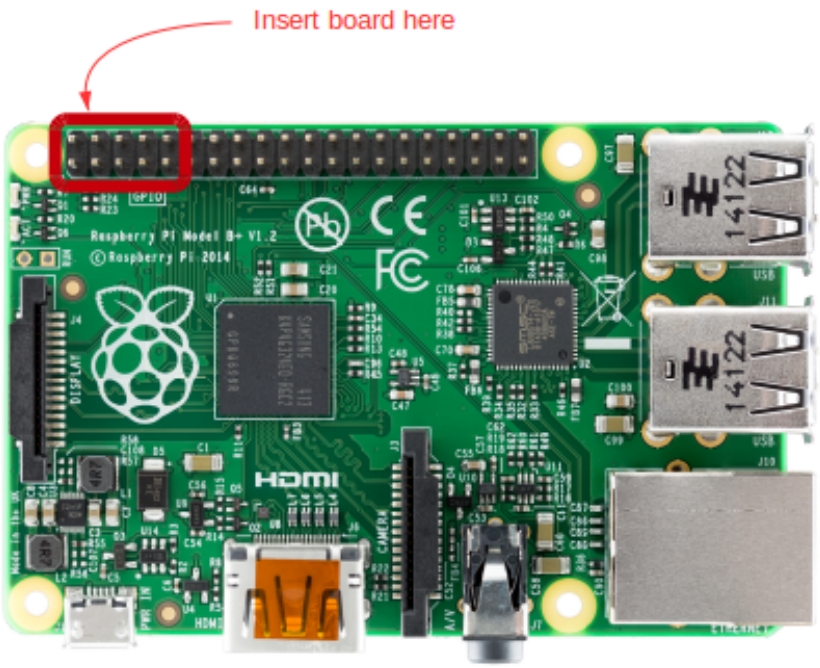



**Figura 4.5:** Pines GPIO de conexion a RPICT de Raspberry Pi 5.[7]

El Raspberry Pi recibe alimentación eléctrica desde un toma corriente convencional de 120 voltios mediante su adaptador de corriente, asegurando su funcionamiento, el del HAT y de los sensores conectados. Además, el dispositivo se conecta a Internet mediante un cable Ethernet, lo que posibilita la transmisión o almacenamiento remoto de los datos adquiridos.

Finalmente, el sistema incorpora una pantalla táctil, la cual se enlaza al Raspberry Pi a través del puerto micro-HDMI (para la señal de video) y de los puertos USB (para la interfaz táctil y comunicación). De esta forma, la pantalla permite visualizar la información de monitoreo en tiempo real y facilita la interacción directa con el sistema sin necesidad de periféricos adicionales. La conexión completa de los componentes se puede visualizar en la Figura 4.7.

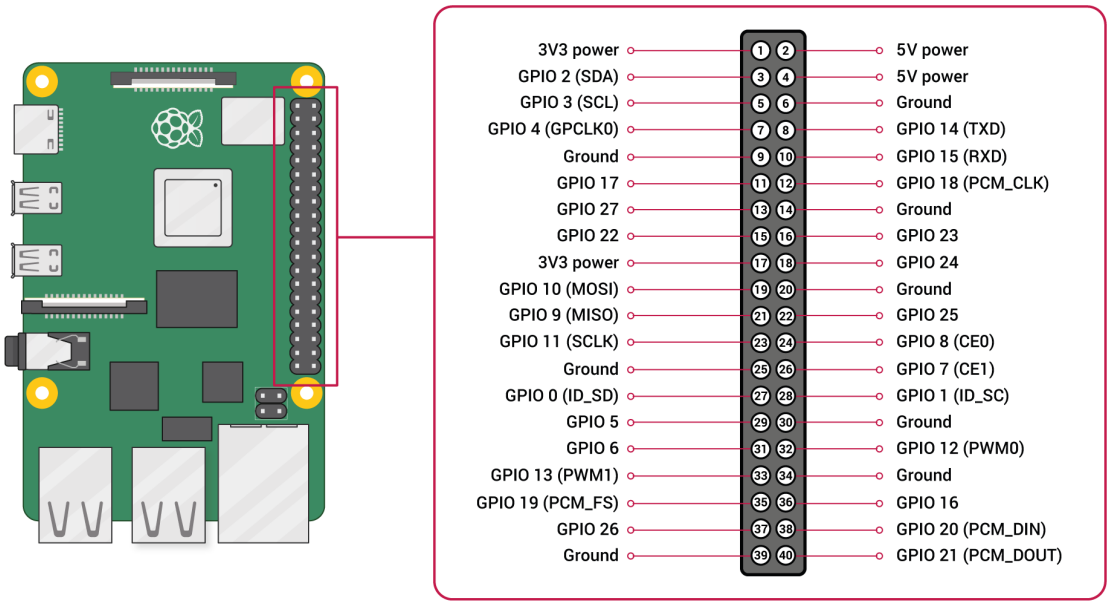



**Figura 4.6:** Pines GPIO de Raspberry Pi.[6]

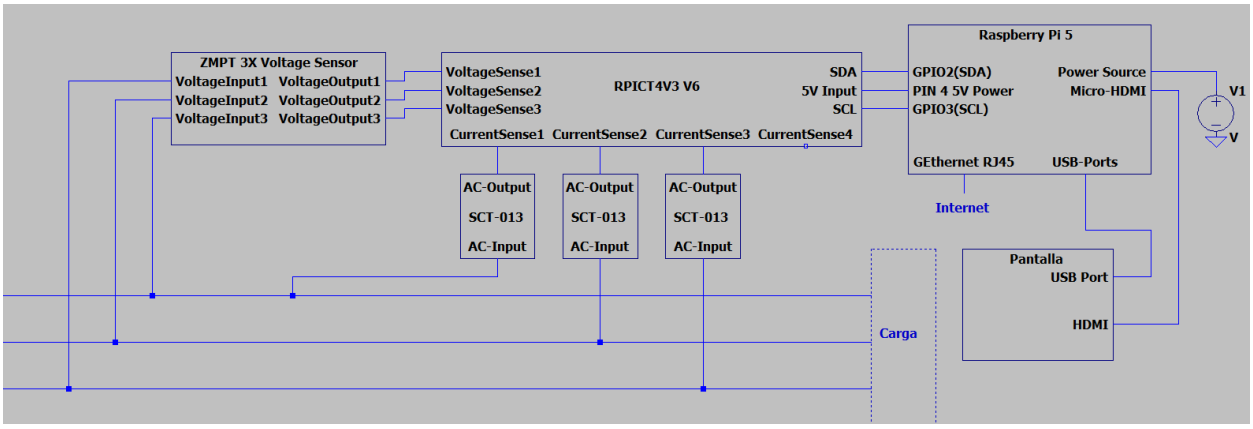



**Figura 4.7:** Diagrama de conexión del circuito de medición de las líneas elaborado en LTSpice.

## 4.3 Conexión eléctrica para baterías

Debido a problemas con la aprobación del presupuesto por políticas internas de la UCR, no se pudo aprobar todo el presupuesto para el proyecto. Dada esta situación se tuvo que cambiar a la segunda opción de concepto. No obstante, se mantiene que la mejor opción sigue siendo un BMS por lo que se recomienda que, al tener más recursos, se adapte el proyecto para poder aceptar un BMS. Con el fin de medir el voltaje de las baterías, se elaboró el circuito de la Figura 4.8.

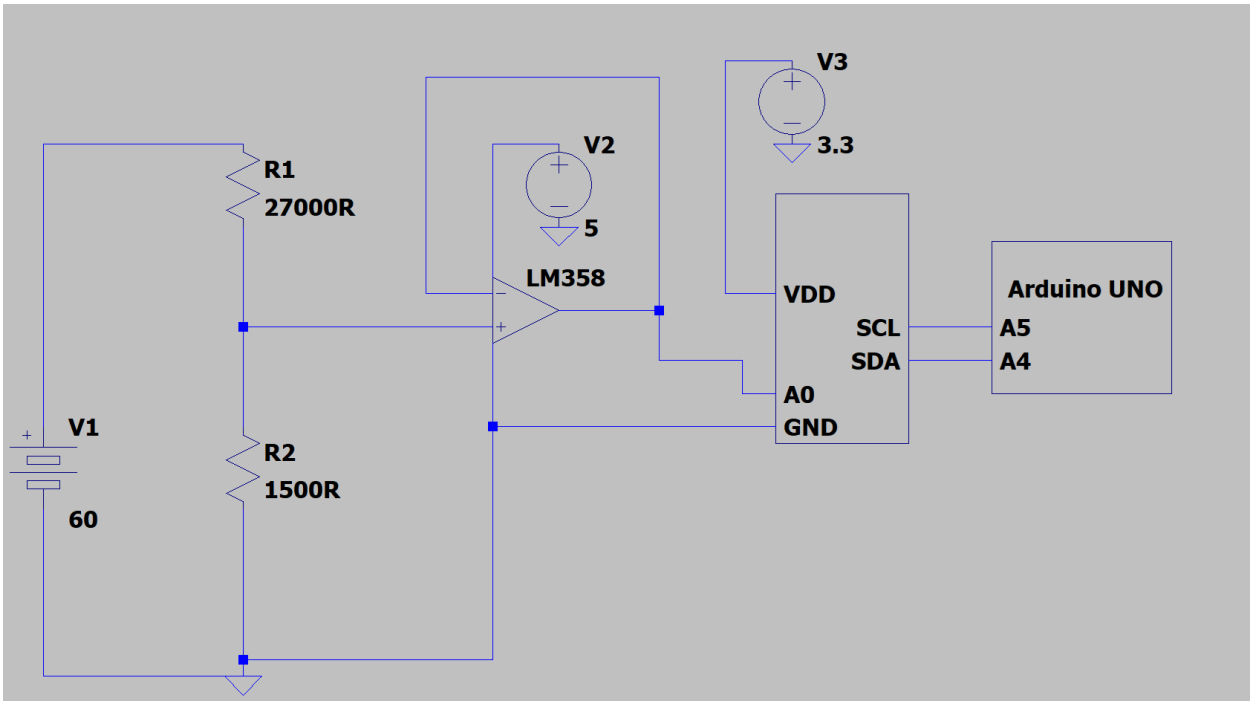



**Figura 4.8:** Diagrama de conexión del circuito de medición de baterías elaborado en LTSpice.

De acuerdo con las indicaciones del cliente, el circuito fue ideado para medir un voltaje máximo de 60 voltios y que consuma menos del 5% de la capacidad de las baterías. En este sentido, el circuito tiene como objetivo consumir menos del 1% de la capacidad de las baterías. Con este fin, como las baterías tienen una capacidad de 9600Wh, el circuito debe consumir menos de 96 watts. No obstante, dado que el cliente únicamente poseía resistencias de 1/8 W, fue necesario implementar un circuito con esa limitante. Con el fin de medir el voltaje se realizó un divisor de voltaje para medir una señal menor a 3.3V. Esto se debe a que los pines GPIO de la Raspberry Pi pueden recibir hasta 3.3V.

Esta señal se conecta a un amplificador operacional con ganancia unitaria para asi mantener estable este voltaje y mejorar la precisión de la medición. Luego, el ADC digitaliza la señal y la manda al microcontrolador por medio del protocolo de comunicación I2C. Originalmente, se propuso usar la Raspberry Pi para recibir los datos por los puertos GPIO. A pesar de que los puertos dedicados a $I^2C$ ya estuvieran siendo utilizados, se planteó usar una técnica denominada "Bit Banging". El "Bit Banging" es una técnica en sistemas embebidos que utiliza pines de entrada/salida de propósito general (GPIO), controlados por software, para emular un protocolo de comunicación específico como $I^2C$. Se utiliza cuando un microcontrolador

no tiene un periférico de hardware dedicado para una interfaz requerida o tiene puertos de hardware insuficientes disponibles. El proceso implica establecer manualmente los pines en un orden y tiempo específicos para generar o recibir las señales de datos.

Sin embargo, el cliente indicó que, dado que las baterías estaban descuidadas y la Raspberry Pi era un equipo valioso, era preferible para ellos utilizar un microcontrolador de sacrifico que manda los datos a la Raspberry Pi. Como el propósito de la medición de las baterías es eventualmente analizar su estado de carga y a pesar de no ser una opción confiable, se concedió usar un Arduino UNO que tenía el laboratorio. No obstante, es importante considerar que, en caso de un percance, el ADC y el amplificador operacional se dañarían primero. Además, la señal que le llega a la Raspberry Pi depende de la entrada de voltaje del puerto VDD del ADC. De seguido, se hace el cálculo de la corriente basándose en la resistencia y la Ley de Ohm como se ve en la ecuación4.1. De esta forma, si el cliente decide realizar la prueba de descarga, se puede alterar el programa para otra resistencia más eficiente para descargar la batería. Finalmente, el Arduino manda los datos por medio de la comunicación serial.

$$V = I \cdot R \tag{4.1}$$

Para la medición de corriente de las baterías, inicialmente se propuso usar un sensor de efecto hall. Sin embargo, el cliente prohibió intervenir el cable de la salida de las baterías. En este sentido, el sensor de efecto hall que tenía el laboratorio estaba defectuoso.

## 4.4 Almacenamiento de datos

Para lograr el funcionamiento de la Raspberry Pi se procedió con la instalación del sistema operativo Raspberry Pi OS Full (anteriormente conocido como Raspbian) en la tarjeta microSD. Para la Raspberry Pi 5, se recomienda una tarjeta microSD de al menos 32 GB, aunque 64 GB a 256 GB ofrecen un rendimiento óptimo. Es de suma importancia que la tarjeta sea de Clase 10 (UHS-I) para garantizar altas velocidades de lectura y escritura, con un soporte para el modo SDR104 para un rendimiento máximo en esta placa. Para ello, se utilizó la herramienta oficial Raspberry Pi Imager, la cual permite seleccionar el sistema operativo, la unidad de almacenamiento y realizar la grabación de manera automática. Este proceso consistió en formatear previamente la tarjeta microSD para garantizar una instalación limpia y libre de archivos residuales, tras lo cual se grabó la imagen del sistema operativo seleccionando la versión de 64 bits, recomendada por el fabricante para aprovechar al máximo las capacidades del procesador y la memoria del dispositivo [6].

La elección de Raspberry Pi OS se basó en su compatibilidad nativa con el hardware de la Raspberry Pi, su estabilidad y la amplia comunidad de soporte disponible. Además, este sistema operativo incluye las bibliotecas necesarias para el manejo de los pines GPIO, la comunicación con periféricos mediante protocolos como $I^2C$ y SPI, y la instalación directa de herramientas como InfluxDB y Grafana, esenciales para el proyecto. Su interfaz ligera y su

facilidad de configuración permiten una integración eficiente con los demás componentes del sistema, garantizando un entorno confiable y optimizado para la adquisición, almacenamiento y visualización de datos. En la Figura 4.9, se ilustra como se configuraron los parametros en el Raspberry Pi Imager.

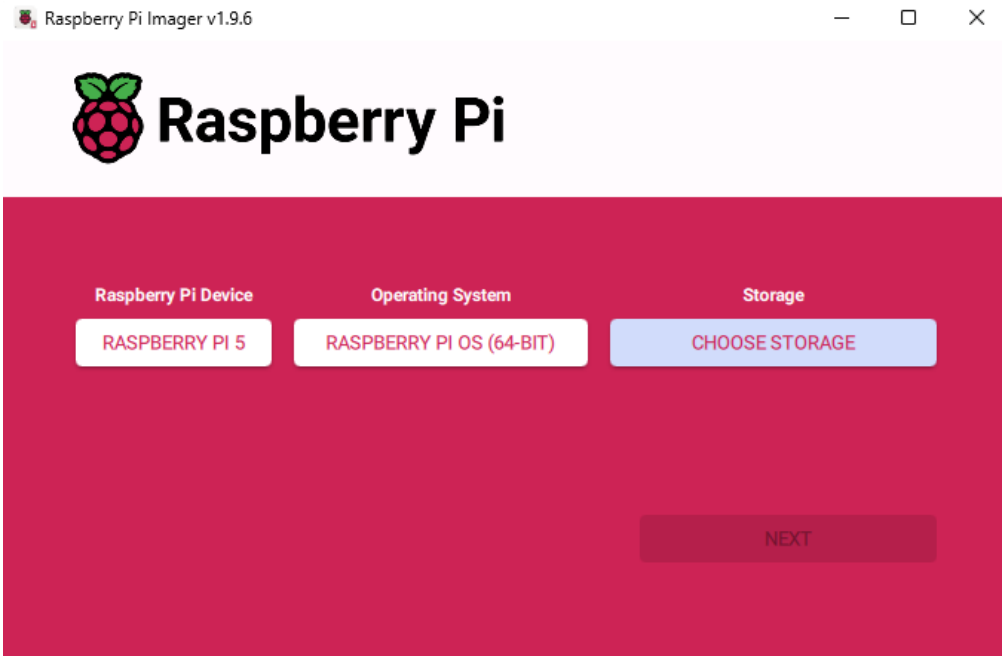



**Figura 4.9:** Configuración del Raspberry Pi Imager.

Con el fin de almacenar los datos y mostrarlos al usuario, se utiliza el software abierto de InfluxDB y Grafana. InfluxDB es software que opera como base de datos orientada a series temporales, diseñada para almacenar y analizar datos que varían con el tiempo, como mediciones, lecturas de sensores o métricas de rendimiento. A diferencia de una base de datos tradicional, su estructura está optimizada para manejar grandes volúmenes de información que se generan de manera continua y que deben registrarse con precisión temporal. Esto permite registrar y consultar datos históricos de forma eficiente, facilitando el análisis de tendencias, la detección de anomalías y la supervisión en tiempo real. En el contexto del sistema propuesto, InfluxDB cumple la función de registrar las mediciones de corriente y voltaje obtenidas a través del RPICT4V3 conectado a la Raspberry Pi. Cada valor queda asociado a una marca de tiempo, lo que permite observar la evolución del comportamiento eléctrico y realizar evaluaciones detalladas sobre el desempeño y estabilidad del sistema [15].

Existen 3 versiones de InluxDB. El RPICT4V3 es compatible con las versiones 1 y 2. La versión seleccionada fue la versión 2. Esto se debe a que dicha versión tiene más funciones que la primera. Además, esta versión tiene una abundante documentación y recursos de consulta en línea. En este sentido, InfluxDB 2 tiene la opción de configurar sus parámetros en una aplicación web en vez de usar comandos en el CLI [15].

Grafana es una plataforma de visualización y análisis de datos que permite representar de forma gráfica la información almacenada en bases de datos como InfluxDB. Su principal función es transformar los datos numéricos y temporales en paneles interactivos que facilitan

la interpretación de las mediciones y el seguimiento del comportamiento del sistema en tiempo real. Gracias a su interfaz intuitiva, los usuarios pueden crear gráficos, indicadores y tableros personalizados sin necesidad de conocimientos avanzados en programación. En el sistema desarrollado, Grafana actúa como la herramienta que muestra de manera visual los valores de corriente, voltaje y demás variables registradas por los sensores conectados a la Raspberry Pi, permitiendo una supervisión continua y clara del estado eléctrico del sistema y de las baterías. Un ejemplo de la intrerfaz de Grafana se puede observar en la Figura 4.10 [8].

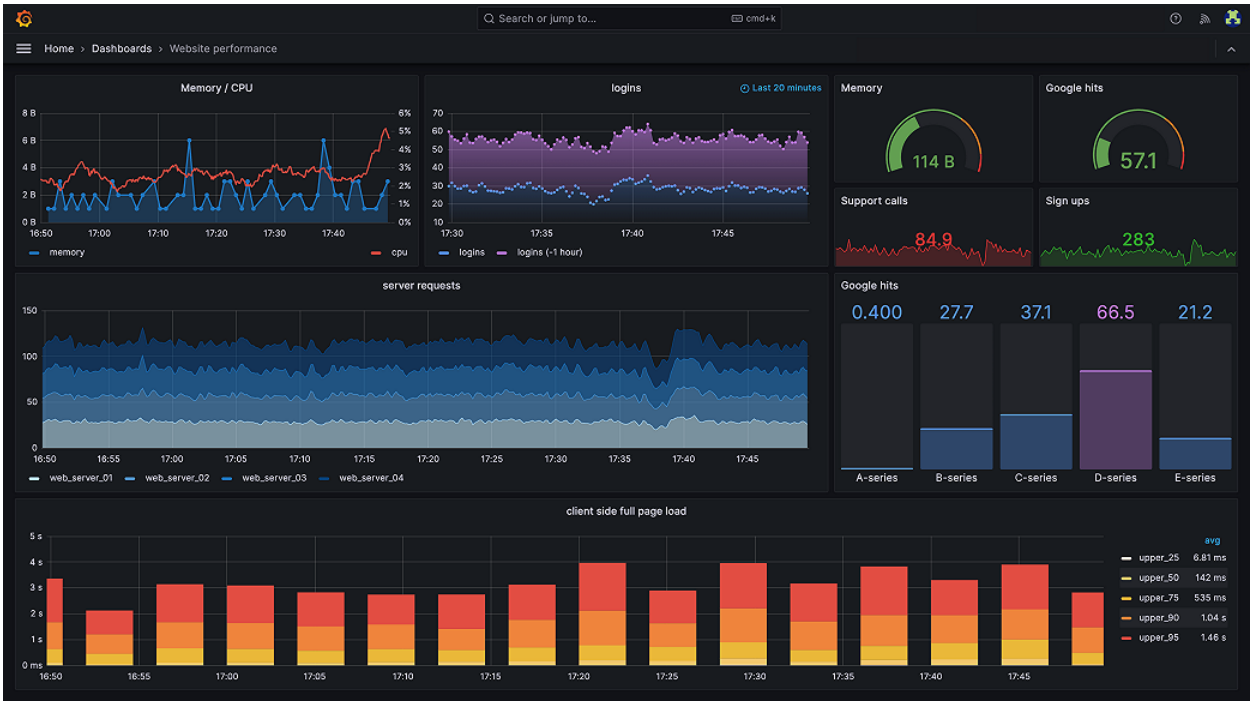



**Figura 4.10:** Ejemplo de Interfaz Grafana. [8]

Se prefirieron estas alternativas por dos razones: escalabilidad y fácil mantenimiento. Dado que no hay personal con experiencia en software, InfluxDB y Grafana, como son de código abierto, ofrecen una gran cantidad de recursos en línea. Esto permite recurrir a estos recursos en vez de contratar a un experto en software. En este sentido, si se requiere expandir la cantidad de datos a medir, se pueden pagar sus opciones de almacenamiento en nube. Esto permitirá hacer una fácil transición a un sistema de almacenamiento más avanzado. Además, Grafana permite configurar alertas en caso de que algún valor se salga del rango esperado [8].

En este sentido, InfluxDB permite que los datos almacenados sean accesibles de forma remota mediante conexiones configuradas a través de su interfaz o herramientas de replicación incluidas en versiones recientes. Esto significa que una instancia de InfluxDB puede establecer enlaces con otros servidores o bases de datos remotas, enviando los datos de manera controlada hacia esos destinos para respaldo, análisis adicional o integración con otros sistemas. La configuración de estas conexiones remotas incluye la definición de credenciales, endpoints y buckets de destino, garantizando que la transmisión se realice de forma segura y estructurada. De esta manera, los datos no solo permanecen almacenados localmente, sino

que pueden ser compartidos o replicados a otros entornos para su consulta o procesamiento sin comprometer la integridad ni la seguridad de la información[15].

Finalmente, InfluxDB permite exportar la base de datos de InfluxDB a una unidad USB. InfluxDB permite realizar exportaciones de datos en formatos estándar como CSV, que luego se pueden copiar a un dispositivo de almacenamiento externo como una memoria USB. Esto se hace mediante comandos de la CLI, por medio de la aplicación web o utilizando scripts que extraigan los datos de los buckets y los guarden en archivos locales. De esta forma, los datos pueden transportarse físicamente, compartirse o respaldarse sin necesidad de conexión a Internet, asegurando que la información se mantenga disponible para análisis o recuperación en otros equipos [15].

De forma gráfica, el sistema de almacenamiento, acceso remoto y de alertas funcionan como se puede observar en la Figura 4.11.

## 4.5 Conexión Remota

SSH y VNC se consideraron para esta funcionalidad ya que proveen acceso seguro a una terminal y a una pantalla compartida de la Raspberry Pi respectivamente. SSH es un protocolo de red cuyas siglas significan “Secure Shell”, este protocolo sirve para la conexión con computadoras con la utilización de una red Internet como intermediario de comunicaciones. VNC es un sistema cuya finalidad consta de la compartición de pantallas para estas ser controladas desde otra computadora. En caso de que se quiera utilizar la Raspberry PI de forma remota, la plataforma Raspberry Pi Connect sirve como manera gratuita para compartir pantalla y tiene el protocolo de SSH integrado. Esto supera a la SSH y VNC ya que estos requieren requisitos externos como la dirección IP y la red local de la Raspberry Pi. Además, el único requisito que se necesita para el uso de la Raspberry Pi Connect es el usuario y contraseña configurados en la página web. Esto es ideal para los fines del proyecto ya que este está diseñado para un usuario sin experiencia previa sobre este campo [6].

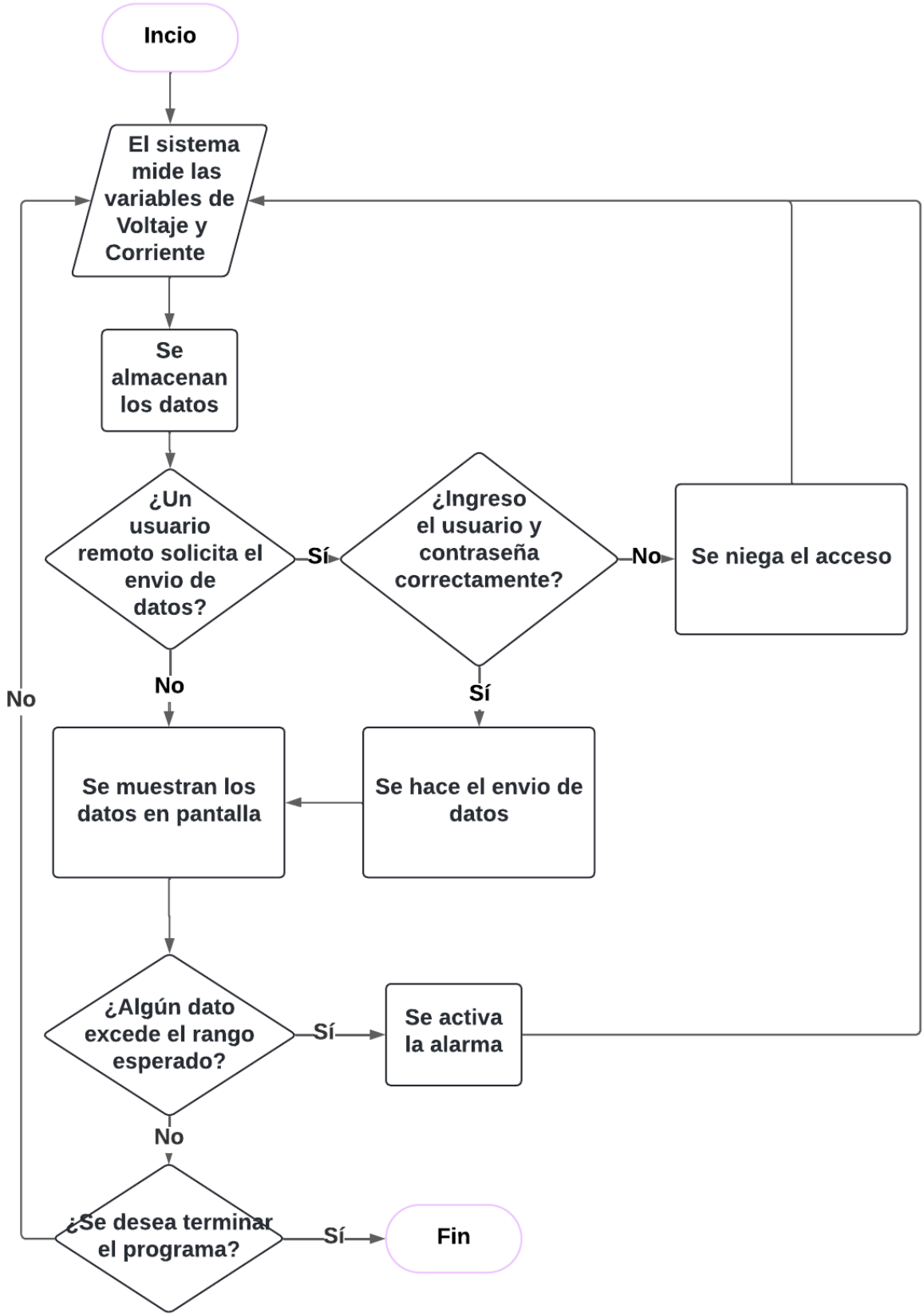



**Figura 4.11:** Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de almacenamiento, acceso remoto y de alertas.

# Capítulo 5

# Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los datos recopilados, los resultados obtenidos y, finalmente, un análisis detallado de los mismos. Para cada prueba se realizaron treinta mediciones debido a el Teorema Central del Límite que establece que, para un número suficientemente grande de observaciones independientes, la distribución muestral de la media tiende a una distribución normal, independientemente de la distribución original de los datos. El teorema usa el valor de treinta muestras como umbral. Para validar la normalidad de los datos, se realizó un el cálculo de la función de densidad de probabilidad, donde $\mu$ representa la media y $\sigma$ la desviación estándar. El resultado de este cálculo se grafica contra las mediciones para poder comparar su distribución con la campana de Gauss. La función de densidad de probabilidad para una distribución normal se define en la ecuación 5.1[16].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{5.1}$$

Luego, se realizó un estudio de los datos utilizando la regla empírica 68-95-99.7. En una distribución aproximadamente normal, la mayoría de los datos se concentran alrededor del valor medio. Aproximadamente el 68% de las observaciones se encuentran dentro del intervalo $\mu \pm 1\sigma$, el 95% dentro de $\mu \pm 2\sigma$ y el 99.7% dentro de $\mu \pm 3\sigma$.
Finalmente, para asegurar la confiabilidad de los datos, se utilizó el método de Intervalos de confianza. Este rango de valores, con un cierto nivel de probabilidad (confianza), contiene el verdadero valor de un parámetro poblacional (como la media), calculado a partir de datos de una muestra. El nivel de confianza definido para el estudio fue de 95% (por lo que el valor de $\alpha = 0.05$) debido que el proyecto no requiere de una precisión tan alta ya que no tiene contacto con vidas humanas como en la industria médica. Sin embargo, como el fin del proyecto es monitorear equipo costoso y realizar trabajos académicos, no se debería considerar valores menores. De seguido, se utilizó la distribución t Student debido a que no se conoce la desviación estándar de la población al ser mediciones. El intervalo de confianza para la media poblacional se calcula mediante la distribución $t$ de Student, como se observa en la ecuación 5.2[16].

$$IC = \bar{x} \pm t_{\alpha/2,n-1}\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \tag{5.2}$$

En esta ecuación $n$ es la cantidad de mediciones, $t_{\alpha/2,n-1}$ es el valor crítico de la distribución $t$ de Student y $s$ es la desviación estándar muestral[16].

## 5.1 Sistema de Medición

Como se puede observar en la Figura 5.1, el sistema de medición cuenta con un circuito para la medición del voltaje de las baterias (en el medio), un arduino para procesar la señal (a la izquierda) y el Raspberry Pi 5 (a la derecha) que almacena los datos. Sobre este último está el RPICT que mide el voltaje y la corriente de las líneas. Todos los modulos se aislaron con tape eléctrico para proteger sus componentes y pines. De seguido, el cable de medición de corriente sale del lado derecho de la Raspberry Pi y el de voltaje sale del lado de abajo.

Originalmente, se propuso conectar el circuito de medición de las baterías a la Raspberry Pi. Sin embargo, dado que no se conocía el estado de las baterías, el jefe de mantenimiento prefirió usar un Arduino de sacrificio en caso de un percance. Es por esto por lo que, a pesar de que el Arduino tiene pines analógicos, se usó un ADC para comunicarse con el Arduino. Sin embargo, este componente permite la reconexión futura a la Raspberry Pi.

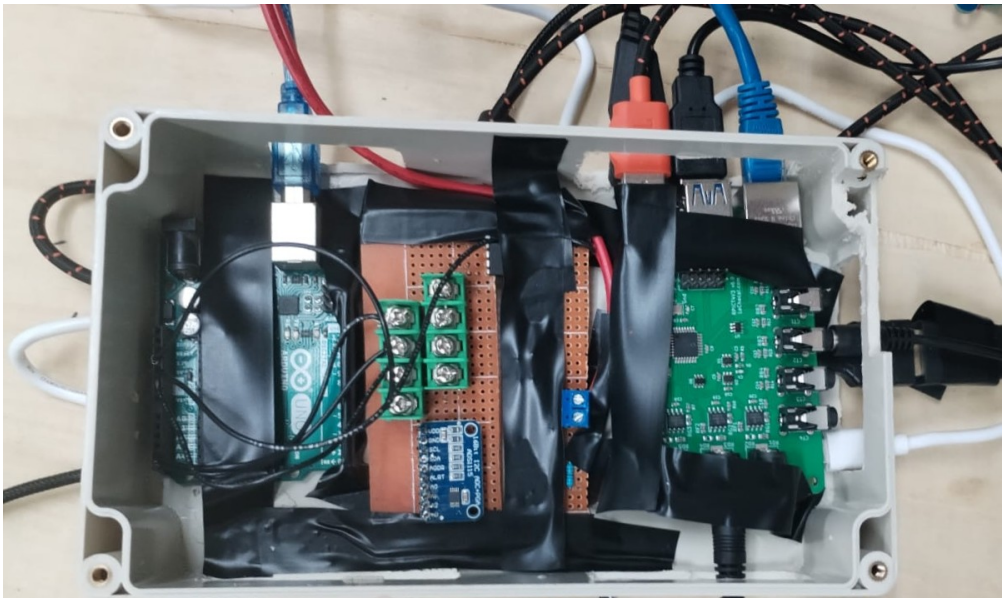


**Figura 5.1:** Sistema de medición de las baterías y líneas.

### 5.1.1 Medición de las baterías

El proceso de medición fue relativamente limitado en el sitio. Esto se debe a las normativas internas del laboratorio y al estado de las baterías. Las baterías de vanadio y ácido de plomo estaban dañadas. Esto provocó que se imposibilitara realizar pruebas con estas. Debido a esto, las pruebas se realizaron con las baterías de litio. Todas las pruebas en el lugar fueron supervisadas por el jefe de mantenimiento del laboratorio. En este sentido, él prefirió que el

contacto con el equipo del lugar lo realizarlo por si mismo. En consecuencia, él realizó las conexiones para las mediciones a su criterio.

De seguido, como los ingenieros que realizaron la instalación original no pudieron mandar una esquema de conexión, se tuvo que hacer una inspección de la conexión del sistema. Al final, los puntos de conexión y la forma de acceso a estos fueron determinados por el jefe de mantenimiento. La Figura 5.2 destaca como se realizó la conexión para los sensores de las líneas. Los resultados de la medición de las baterías se evidencian en la Tabla 5.1.

Un aspecto importante es que las incertidumbres fueron obtenidas de las hojas de datos de los componentes relevantes. Para las mediciones indirectas se usó la fórmula de incertidumbre propagada.

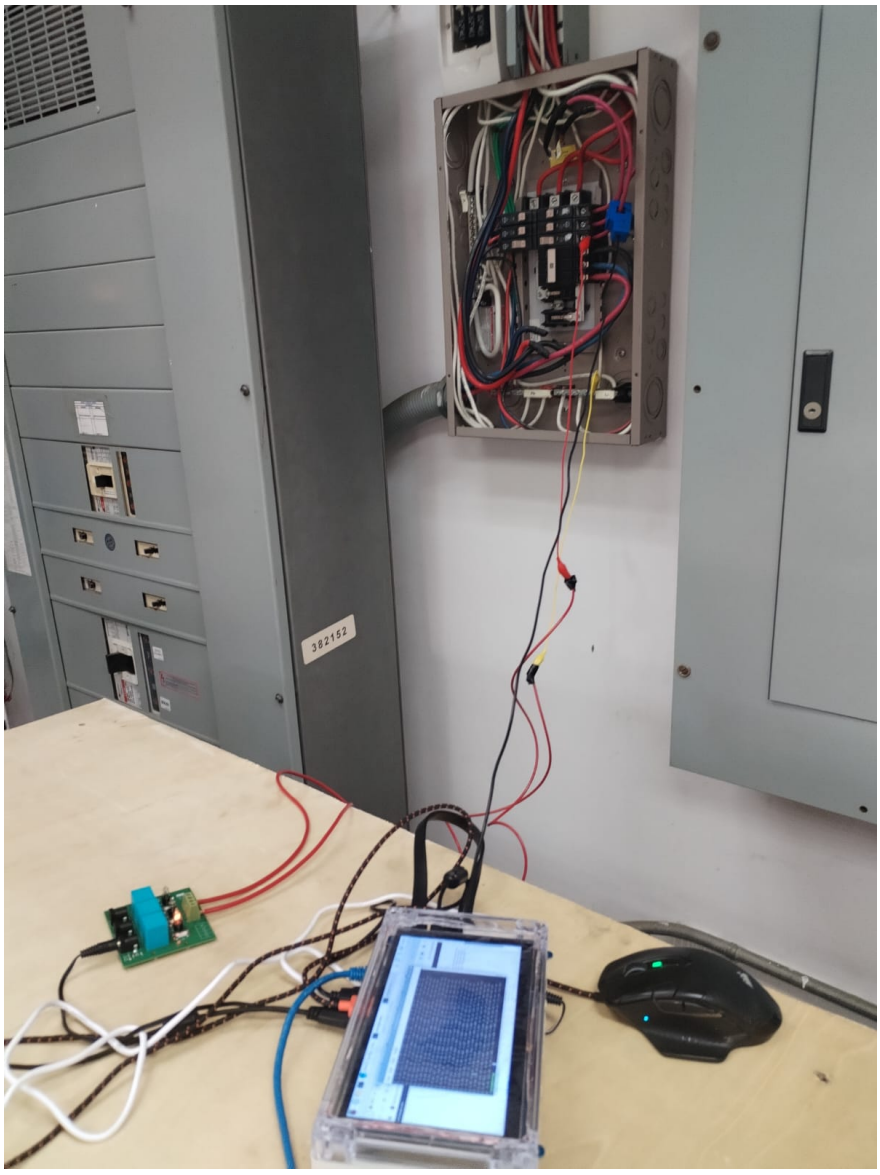


**Figura 5.2:** Conexión del sistema de medición de las líneas.

**Tabla 5.1:** Medición de las Baterías

| # | **Circuito de medición (±0.00094 Voltios)** | **Multímetro Steren MUL-110 (±0.8% Voltios)** | **Corriente calculada (mA)** | **Potencia calculada (W)** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 53.7096 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 2 | 53.7072 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 3 | 53.7072 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 4 | 53.7190 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1013 ± 0.0051 |
| 5 | 53.7119 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 6 | 53.7119 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 7 | 53.7096 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 8 | 53.7214 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1013 ± 0.0051 |
| 9 | 53.7096 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 10 | 53.7072 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 11 | 53.7096 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 12 | 53.7190 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1013 ± 0.0051 |
| 13 | 53.7048 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 14 | 53.7048 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 15 | 53.7025 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 16 | 53.7143 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 17 | 53.7072 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 18 | 53.6930 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 19 | 53.7048 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 20 | 53.6930 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 21 | 53.6906 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1011 ± 0.0051 |
| 22 | 53.6930 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 23 | 53.7025 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 24 | 53.6906 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1011 ± 0.0051 |
| 25 | 53.6882 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1011 ± 0.0051 |
| 26 | 53.6953 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 27 | 53.7072 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 28 | 53.6930 | 53.8 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| 29 | 53.6906 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1011 ± 0.0051 |
| 30 | 53.6953 | 53.7 | 2.3000±0.0942 | 0.1012 ± 0.0051 |
| **Promedio** | **53.7038** | **53.7** | **2.3000** | **0.1012** |
| **Desviación estándar** | **0.0094** | **0.0407** | **0.0000** | **0.0000** |
| **Error (%)** | **0.03** | | | |

Como se puede observar el sistema presenta una desviación estándar menor a la del multímetro. En este sentido, su incertidumbre es menor. La potencia se calculó basándose en la medición de corriente y voltaje como se ve en la ecuación 5.3.

$$P = V \cdot I \tag{5.3}$$

De seguido se realizó el estudio estadístico que se explicó al inicio del capítulo. Debido a que la corriente fue calculada y no medida directamente con base al voltaje, se espera que su comportamiento estadístico sea el mismo al del voltaje. Para esta sección la distribución calculada en la Tabla 5.2, tiene la forma esperada como se ve en la Figura 5.3. Sin embargo, respecto a la regla empírica ejemplificada en la Tabla 5.3, los datos presentan una ligera subrepresentación en el primer nivel de la regla empírica. Esto indica que la distribución es algo más dispersa en el centro de lo que dicta la teoría. Sin embargo, en ingeniería, un 60% frente a un 68% con una muestra de treinta es una aproximación aceptable, teniendo en cuenta que la medición final es de baterías que van a ser utilizadas para averiguar su estado de salud. Para los demás rangos, el cumplimiento es del 100% por lo que no hay valores atípicos. El margen de error calculado es de apenas ±0.0035 V, como se puede visualizar en la Tabla 5.4. Esto representa un error relativo de aproximadamente 0.006% respecto a la media (53.7038 V). En términos de ingeniería, esto indica una alta precisión en la toma de datos y una variabilidad mínima en el suministro de tensión del sistema durante la prueba. Finalmente, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que el valor verdadero de la tensión de operación de la batería no es un punto único, sino que se encuentra contenido entre 53.7003 V y 53.7073 V.

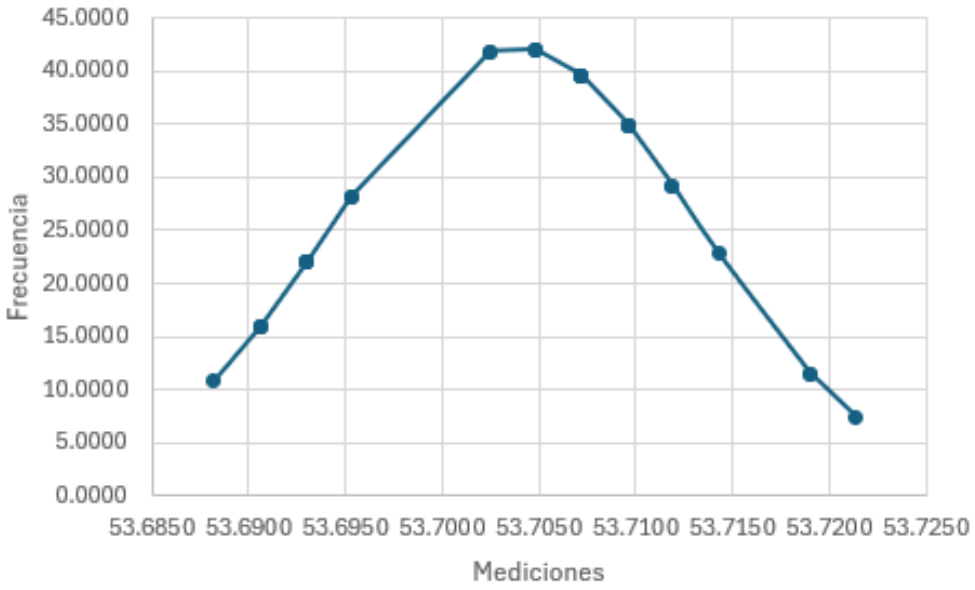



**Figura 5.3:** Distribución normal de medición de baterías

**Tabla 5.2:** Datos de voltaje de baterías y función de densidad de probabilidad.

| Voltaje (V) | Función de densidad de probabilidad |
|---|---|
| 53.7214 | 7.4450 |
| 53.7190 | 11.5707 |
| 53.7190 | 11.5707 |
| 53.7143 | 22.7622 |
| 53.7119 | 29.2296 |
| 53.7119 | 29.2296 |
| 53.7096 | 34.9636 |
| 53.7096 | 34.9636 |
| 53.7096 | 34.9636 |
| 53.7096 | 34.9636 |
| 53.7072 | 39.5691 |
| 53.7072 | 39.5691 |
| 53.7072 | 39.5691 |
| 53.7072 | 39.5691 |
| 53.7072 | 39.5691 |
| 53.7048 | 41.9835 |
| 53.7048 | 41.9835 |
| 53.7048 | 41.9835 |
| 53.7025 | 41.8252 |
| 53.7025 | 41.8252 |
| 53.6953 | 28.1801 |
| 53.6953 | 28.1801 |
| 53.6930 | 21.9795 |
| 53.6930 | 21.9795 |
| 53.6930 | 21.9795 |
| 53.6930 | 21.9795 |
| 53.6906 | 15.9208 |
| 53.6906 | 15.9208 |
| 53.6906 | 15.9208 |
| 53.6882 | 10.8117 |

**Tabla 5.3:** Validación de la distribución de voltajes mediante la regla empírica.

| Rango | Cantidad de datos | Porcentaje Real | Expectativa Teórica |
|---|---|---|---|
| $\pm 1\sigma$ | 18 | 60.0% | 68% |
| $\pm 2\sigma$ | 30 | 100.0% | 95% |
| $\pm 3\sigma$ | 30 | 100.0% | 99.70% |

*Parámetros descriptivos:*
Promedio ($\bar{x}$): 53.7038 V
Desviación estándar ($s$): 0.0094 V

**Tabla 5.4:** Estimación del intervalo de confianza para el voltaje promedio (Baterías de Litio).

| **Parámetro Estadístico** | **Valor** |
|---|---|
| Nivel de Confianza $(1 - \alpha)$ | 95% |
| Significancia $(\alpha)$ | 0.05 |
| Margen de Error $(E)$ | $\pm$ 0.0035 V |
| **Límite Inferior** | **53.7003 V** |
| **Límite Superior** | **53.7073 V** |

### 5.1.2 Medición de las líneas

Concomitantemente, se hizo la Tabla 5.5 para medir el voltaje y corriente de las líneas que alimentan las luces del edificio. Sin embargo, las mediciones se tuvieron que hacer en estado de operación debido a que las luces iluminaban laboratorios utilizados. Por lo que, no se pudo hacer una comparación de las mediciones con todas las luces apagadas o prendidas. Esto se debe a que el acceso al edificio es durante horario laboral y durante ese periodo no se pueden interrumpir a los funcionarios. Esto provoca que, si alguien prende o apaga una luz, la medida puede ser alterada. Esta fue una limitación inevitable en el proceso. En este sentido, como las baterías de ácido de plomo y de vanadio no estaban funcionando no se pudieron realizar medidas para estas ni para sus líneas.

**Tabla 5.5:** Resultados de 30 ensayos de corriente y voltaje usando SCT-013 + ZMPT + RPICT Hat (RPICT4V3).

| # | **Instrumento** | **Linea de batería** | **Voltaje de la línea (±0.00122 V)** | **Corriente de la Línea ±1% (A)** | **Potencia calculada (W)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.48 | 4.927 | 119.480 ± 4.927 |
| 2 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.15 | 4.954 | 119.150 ± 4.954 |
| 3 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.76 | 4.950 | 118.760 ± 4.950 |
| 4 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.41 | 4.951 | 118.410 ± 4.951 |
| 5 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.54 | 4.952 | 118.540 ± 4.952 |
| 6 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.47 | 4.954 | 119.470 ± 4.954 |
| 7 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.07 | 4.945 | 120.070 ± 4.945 |
| 8 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.68 | 4.933 | 120.680 ± 4.933 |
| 9 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.09 | 4.914 | 120.090 ± 4.914 |
| 10 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.77 | 4.928 | 119.770 ± 4.928 |
| 11 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.77 | 4.946 | 118.770 ± 4.946 |
| 12 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.97 | 4.951 | 119.970 ± 4.951 |
| 13 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.95 | 4.925 | 120.950 ± 4.925 |
| 14 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.44 | 4.916 | 120.440 ± 4.916 |
| 15 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.09 | 4.918 | 120.090 ± 4.918 |
| 16 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.78 | 4.946 | 118.780 ± 4.946 |
| 17 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.25 | 4.940 | 120.250 ± 4.940 |
| 18 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 121.01 | 4.911 | 121.010 ± 4.911 |
| 19 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.12 | 4.914 | 120.120 ± 4.914 |
| 20 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.72 | 4.928 | 119.720 ± 4.928 |
| 21 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.15 | 4.952 | 119.150 ± 4.952 |
| 22 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.11 | 4.947 | 119.110 ± 4.947 |
| 23 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.27 | 4.947 | 118.270 ± 4.947 |
| 24 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.47 | 4.948 | 118.470 ± 4.948 |
| 25 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 119.08 | 4.948 | 119.080 ± 4.948 |
| 26 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.68 | 4.949 | 118.680 ± 4.949 |
| 27 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.87 | 4.947 | 118.870 ± 4.947 |
| 28 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 118.96 | 4.946 | 118.960 ± 4.946 |
| 29 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.06 | 4.921 | 120.060 ± 4.921 |
| 30 | SCT-013 + ZMPT | Litio | 120.30 | 4.916 | 120.300 ± 4.916 |
| **Promedio** | | | 119.52 | 4.937 | 119.5157 |
| **Desviación Estándar** | | | 0.7907 | 0.0147 | 0.7907 |

Con el propósito de comparar estas mediciones se volvieron a hacer mediciones pero con un multímetro proporcionado por el laboratorio. El resultado de esas mediciones se evidencia en la Tabla 5.6

**Tabla 5.6:** Resultados de medición de voltaje y corriente de la línea con Multímetro (Steren MUL-110).

| # | Línea de batería | Voltaje (±1.0% V) | Corriente (±3% A) |
|---|---|---|---|
| 1 | Litio | 119.80 | 5.06 |
| 2 | Litio | 119.70 | 5.06 |
| 3 | Litio | 119.70 | 5.07 |
| 4 | Litio | 119.70 | 5.09 |
| 5 | Litio | 119.70 | 5.07 |
| 6 | Litio | 119.80 | 4.95 |
| 7 | Litio | 119.70 | 4.88 |
| 8 | Litio | 119.70 | 4.99 |
| 9 | Litio | 119.70 | 5.04 |
| 10 | Litio | 119.70 | 5.03 |
| 11 | Litio | 119.70 | 5.02 |
| 12 | Litio | 119.70 | 5.01 |
| 13 | Litio | 119.70 | 4.98 |
| 14 | Litio | 119.70 | 4.97 |
| 15 | Litio | 119.70 | 4.98 |
| 16 | Litio | 119.70 | 4.98 |
| 17 | Litio | 119.70 | 5.00 |
| 18 | Litio | 119.70 | 5.00 |
| 19 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 20 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 21 | Litio | 119.70 | 5.07 |
| 22 | Litio | 119.70 | 5.09 |
| 23 | Litio | 119.70 | 5.06 |
| 24 | Litio | 119.70 | 5.07 |
| 25 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 26 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 27 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 28 | Litio | 119.70 | 5.09 |
| 29 | Litio | 119.70 | 5.10 |
| 30 | Litio | 119.70 | 5.12 |
| **Promedio** | | **119.71** | **5.04** |
| **Desviación estándar** | | **0.0254** | **0.0577** |

Comparando ambas tablas, se evidencia que el multímetro tiene una menor desviación estándar para el voltaje. No obstante, la incertidumbre del voltaje y corriente es mayor para el multímetro. De seguido, el sistema de medición de corriente aplicado tiene una menor desviación estándar en el voltaje. Sin embargo, la desviación estándar de la corriente es más favorable y el sistema permite calcular la potencia.
Posteriormente, se realizó el estudio estadístico descrito al inicio de este capítulo. Para esta sección, la distribución calculada del voltaje, presentada en la Tabla 5.7, muestra la forma esperada, tal como se observa en la Figura 5.4. En lo que respecta a la regla empírica detallada en la Tabla 5.8, los datos evidencian una concentración significativa en el primer nivel, alcanzando un 70% de las observaciones dentro del intervalo $\pm 1\sigma$. Este valor supera levemente el 68% teórico asociado a una distribución normal ideal, lo que indica que el voltaje de línea presentó una alta estabilidad y se mantuvo muy cercano al valor medio durante el proceso de medición. Para los intervalos $\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$, se obtuvo un cumplimiento del 100%, lo cual confirma la ausencia de valores atípicos o transitorios críticos en la red eléctrica durante la prueba.

El margen de error calculado es de $\pm 0.2953$ V, como se observa en la Tabla 5.9. Esto representa un error relativo de aproximadamente 0.247% respecto a la media (119.5157 V).

Finalmente, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar con rigor estadístico que el valor verdadero de la tensión de operación de la línea no es un punto único, sino que se encuentra contenido en el intervalo entre 119.2204 V y 119.8109 V.

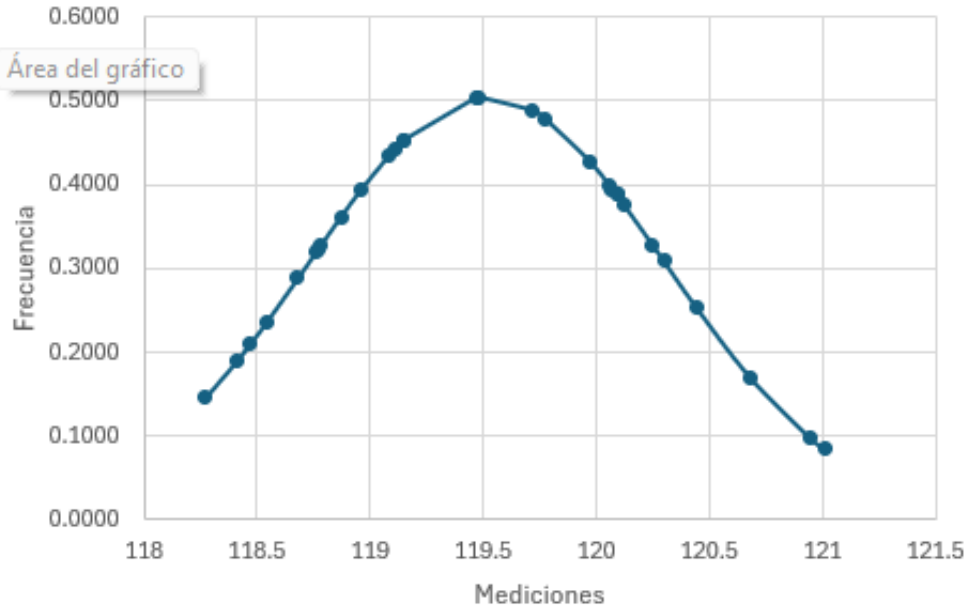



**Figura 5.4:** Distribución normal de medición de voltaje de la línea.

**Tabla 5.7:** Datos de voltaje de las líneas y función de densidad de probabilidad.

| Datos de voltaje de las líneas | Función de densidad de probabilidad |
|---|---|
| 118.27 | 0.1459 |
| 118.41 | 0.1898 |
| 118.47 | 0.2105 |
| 118.54 | 0.2357 |
| 118.68 | 0.2886 |
| 118.76 | 0.3196 |
| 118.77 | 0.3234 |
| 118.78 | 0.3273 |
| 118.87 | 0.3615 |
| 118.96 | 0.3941 |
| 119.08 | 0.4335 |
| 119.11 | 0.4423 |
| 119.15 | 0.4534 |
| 119.15 | 0.4534 |
| 119.47 | 0.5037 |
| 119.48 | 0.5040 |
| 119.72 | 0.4879 |
| 119.77 | 0.4791 |
| 119.97 | 0.4277 |
| 120.06 | 0.3981 |
| 120.07 | 0.3946 |
| 120.09 | 0.3875 |
| 120.09 | 0.3875 |
| 120.12 | 0.3767 |
| 120.25 | 0.3278 |
| 120.30 | 0.3085 |
| 120.44 | 0.2548 |
| 120.68 | 0.1706 |
| 120.95 | 0.0974 |
| 121.01 | 0.0846 |

**Tabla 5.8:** Validación de la distribución del Voltaje de Línea mediante la regla empírica.

| Rango | Cantidad de datos | Porcentaje Real | Expectativa Teórica |
|---|---|---|---|
| $\pm 1\sigma$ | 21 | 70.0% | 68% |
| $\pm 2\sigma$ | 30 | 100.0% | 95% |
| $\pm 3\sigma$ | 30 | 100.0% | 99.70% |

*Parámetros del Voltaje de Línea:*
Promedio ($\bar{x}$): 119.5157 V
Desviación estándar ($s$): 0.7907 V

**Tabla 5.9:** Intervalo de confianza para el voltaje de línea.

| **Parámetro Estadístico** | **Valor** |
|---|---|
| Nivel de Confianza $(1 - \alpha)$ | 95% |
| Significancia $(\alpha)$ | 0.05 |
| Margen de Error $(E)$ | $\pm$ 0.2953 V |
| **Límite Inferior** | **119.2204 V** |
| **Límite Superior** | **119.8109 V** |

De seguido se realizó el estudio estadístico explicado al inicio del capítulo. Para esta sección, la distribución calculada para la corriente de línea en la Tabla 5.10 presenta la forma esperada, tal como se visualiza en la Figura 5.5. Respecto a la regla empírica detallada en la Tabla 5.11, los datos muestran una concentración sólida en el primer nivel, alcanzando un 70% de las observaciones dentro de $\pm 1\sigma$. Al igual que en el caso del voltaje de línea, este valor supera levemente el 68% teórico, lo que indica una estabilidad superior en la carga de corriente durante el muestreo. Para los demás rangos ($\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$), el cumplimiento es del 100%, lo que confirma la ausencia de valores atípicos o picos de corriente inesperados que pudieran comprometer el análisis del estado de salud de las baterías.El margen de error calculado es de apenas $\pm 0.0055$ A, como se puede visualizar en la Tabla 5.12. Esto representa un error relativo de aproximadamente 0.11% respecto a la media (4.9375 A). En términos de ingeniería, esto indica una alta precisión en la toma de datos y una variabilidad mínima en el flujo de corriente del sistema durante la prueba. Finalmente, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que el valor verdadero de la corriente de operación no es un punto único, sino que se encuentra contenido entre 4.9320 A y 4.9429 A.

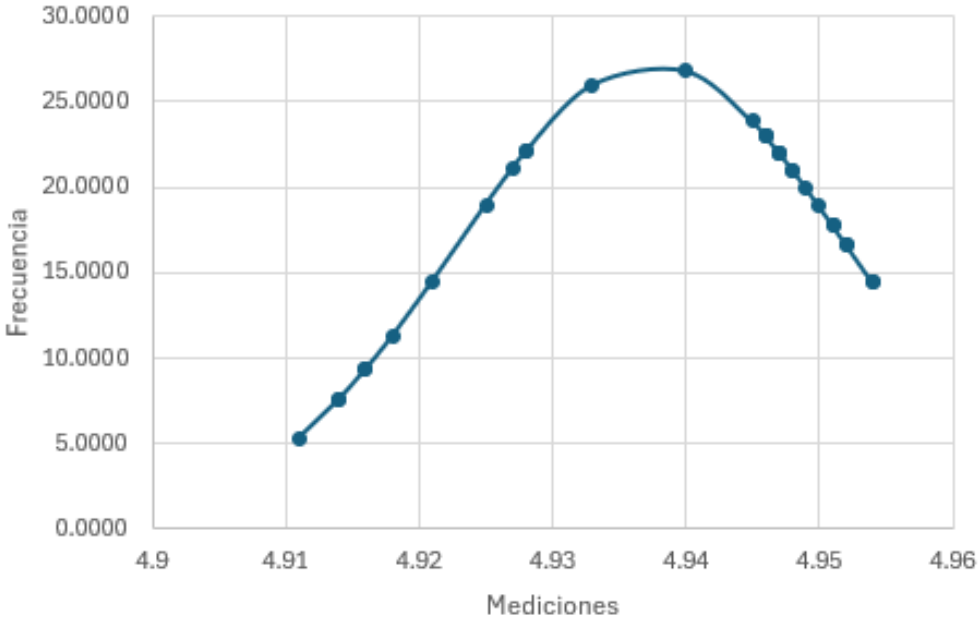



**Figura 5.5:** Distribución normal de medición de corriente de la línea.

**Tabla 5.10:** Valores de corriente de línea medidos y su correspondiente Función de Densidad de Probabilidad.

| Datos | Función de densidad de probabilidad |
|---|---|
| 4.911 | 5.3402 |
| 4.914 | 7.5640 |
| 4.914 | 7.5640 |
| 4.916 | 9.3207 |
| 4.916 | 9.3207 |
| 4.918 | 11.2739 |
| 4.921 | 14.4835 |
| 4.925 | 18.9530 |
| 4.927 | 21.0848 |
| 4.928 | 22.0845 |
| 4.928 | 22.0845 |
| 4.933 | 25.9657 |
| 4.940 | 26.7953 |
| 4.945 | 23.8374 |
| 4.946 | 22.9638 |
| 4.946 | 22.9638 |
| 4.946 | 22.9638 |
| 4.947 | 22.0196 |
| 4.947 | 22.0196 |
| 4.947 | 22.0196 |
| 4.948 | 21.0163 |
| 4.948 | 21.0163 |
| 4.949 | 19.9657 |
| 4.950 | 18.8797 |
| 4.951 | 17.7700 |
| 4.951 | 17.7700 |
| 4.952 | 16.6480 |
| 4.952 | 16.6480 |
| 4.954 | 14.4096 |
| 4.954 | 14.4096 |

**Tabla 5.11:** Validación de la distribución de la Corriente de Línea mediante la regla empírica.

| **Rango** | **Cantidad de datos** | **Porcentaje Real** | **Expectativa Teórica** |
|---|---|---|---|
| $\pm 1\sigma$ | 21 | 70.0% | 68% |
| $\pm 2\sigma$ | 30 | 100.0% | 95% |
| $\pm 3\sigma$ | 30 | 100.0% | 99.70% |

*Parámetros de la Corriente de Línea:*
Promedio ($\bar{x}$): 4.9375 A
Desviación estándar ($s$): 0.0147 A

**Tabla 5.12:** Intervalo de confianza para la corriente de línea.

| **Parámetro Estadístico** | **Valor** |
|---|---|
| Nivel de Confianza $(1 - \alpha)$ | 95% |
| Significancia $(\alpha)$ | 0.05 |
| Margen de Error $(E)$ | $\pm$ 0.0055 A |
| **Límite Inferior** | **4.9320 A** |
| **Límite Superior** | **4.9429 A** |

## 5.2 Facilidad de Comprensión

Debido a que el tiempo de aplicacion del sistema fue limitado y, en este sentido, cerca del final del proyecto los administadores de red decidieron bloquear ciertos puertos de red, las pruebas de uso no se pudieron realizar. De manera remedial se elaboró una breve explicación para entender la comprensión del uso del sistema. Luego de la explicación se elaboró un cuestionario que permitió evaluar la comprensión de cada usuario. La prueba esta en el Apéndice y los resultados se pueden ver en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13:** Resultados de comprensión por usuario

| **Usuario** | **Tiempo de Comprensión (s)** | **Aciertos** |
|---|---|---|
| Usuario 1 | 143.22 | 5/5 |
| Usuario 2 | 201.35 | 5/5 |
| Usuario 3 | 310.51 | 5/5 |

El tiempo de comprensión fue menor a los diez minutos que se propusieron como valor ideal. Sin embargo, dado que no se pudo analizar el uso practico, no se puede trazar que tan eficiente hubiera sido esta prueba para el uso del monitoreo. No obstante, el cuestionario permitió la comprensión básica del sistema y, como todos los usuarios acertaron las preguntas correctamente, la información se transmitió completamente.

## 5.3 Visualización de datos

El sistema de visualización de datos fue desarrollado con el fin de ser intuitivo y fácil de utilizar por cualquier usuario. Con este propósito, se incorporó un display táctil compatible con la Raspberry Pi, lo que permite una interacción directa y sencilla sin necesidad de periféricos adicionales como teclado o ratón. Además, se implementó la plataforma Grafana para la presentación de los datos almacenados en la base de datos InfluxDB, ya que ofrece una visualización confiable, flexible y en tiempo real, facilitando el monitoreo y análisis del sistema de manera eficiente. Dicho sistema se puede observar en la Figura 5.6.

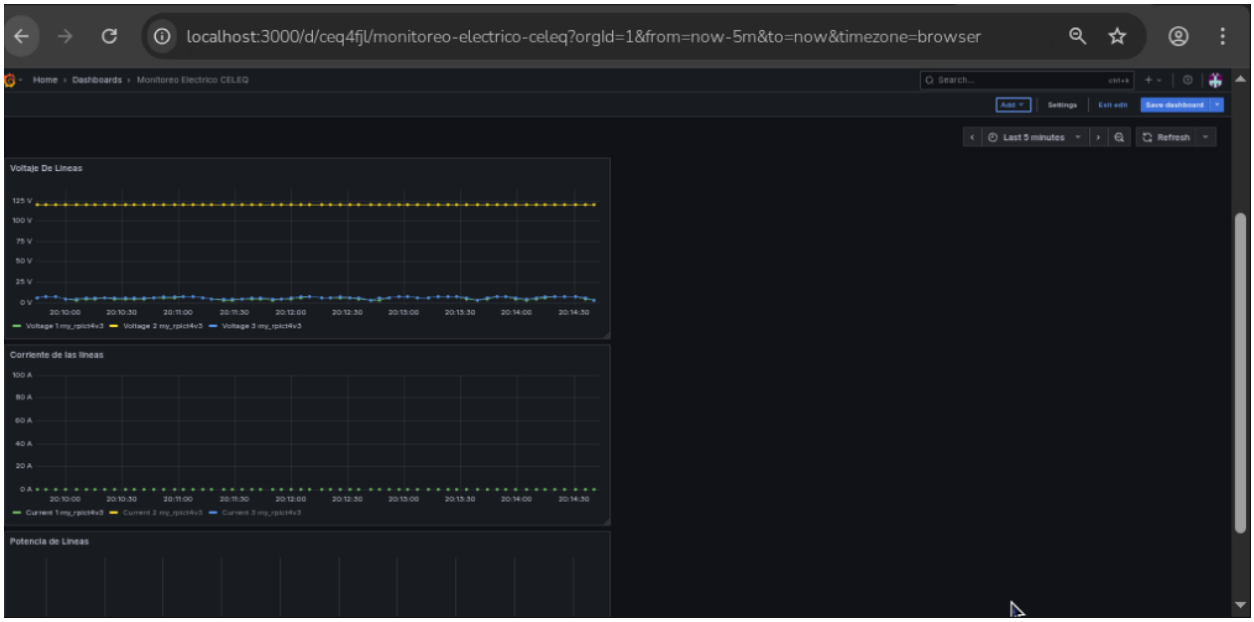



**Figura 5.6:** Interfaz de visualización de datos

## 5.4 Conexión Remota

Con el fin de tener acceso remoto se uso Raspberry Pi Connect. Raspberry Pi Connect constituye una solución de acceso remoto diseñada para facilitar la administración y el control de dispositivos que ejecutan Raspberry Pi OS. Esta herramienta se integra directamente con el Raspberry Pi ID service para la autenticación y utiliza una infraestructura de transmición de datos para establecer sesiones remotas sin requerir una configuración de red perimetral compleja, eliminando la necesidad de port forwarding o de un servidor VPN dedicado. En consecuencia, este método facilita la conexión y permite la interconexión con dipositivos como teléfonos inteligentes. Esto se debe a que su acceso es por medio de la página web. Esta manera de conectar se puede visualizar en la Figura 5.7 [6].

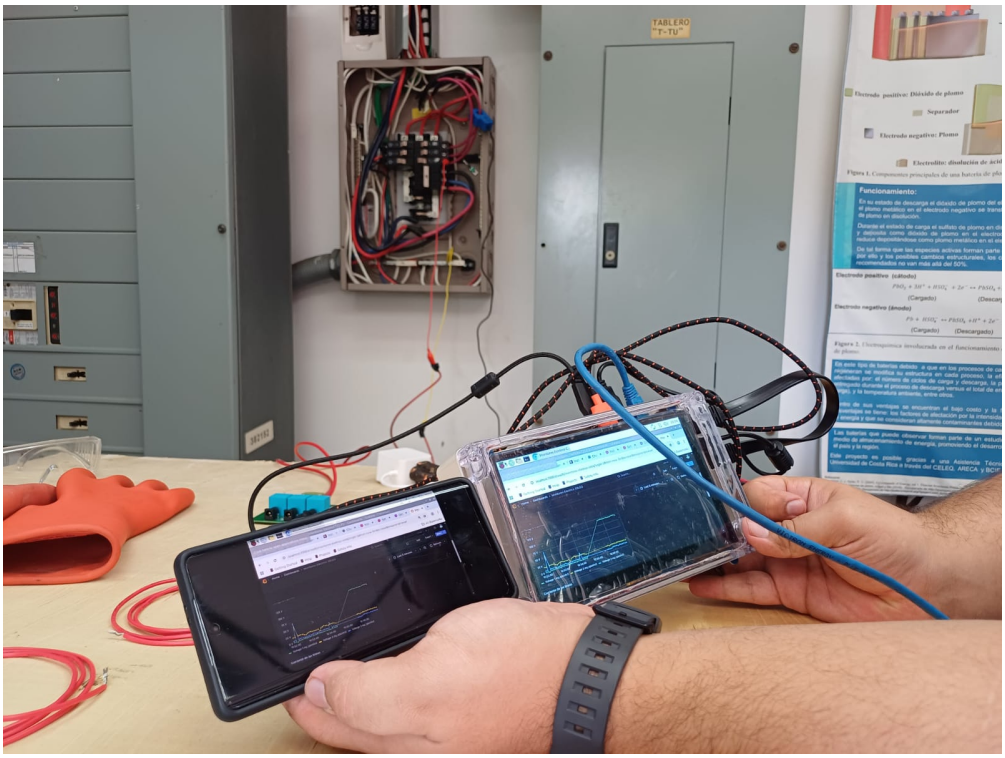



**Figura 5.7:** Prueba de conexión remota con una interfaz de visualización de escritorio remoto por medio de un teléfono celular usando datos móviles y el sistema original

Su funcionalidad principal radica en proveer una interfaz de visualización de escritorio remoto (screen sharing) y acceso a la línea de comandos (shell) directamente a través de un navegador web, utilizando protocolos de comunicación cifrada. El sistema prioriza el establecimiento de una conexión peer-to-peer (P2P) con baja latencia entre el cliente (browser client) y el dispositivo anfitrión (Raspberry Pi host). Con el fin de probar el funcionamiento, se realizó la prueba de la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14:** Raspberry Pi Connect: Prueba de conexión con Ookla (American Data Networks)

| # | Velocidad de red de Raspberry Pi Carga de datos (Mbps) | Velocidad de red de Raspberry Pi Descarga de datos (Mbps) | Velocidad de red de solicitante Descarga de datos (Mbps) | Tiempo para establecer conexión (s) | Ping Promedio (ms) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 215.82 | 193.31 | 69.30 | 6.70 | 40 |
| 2 | 213.45 | 190.10 | 67.58 | 6.17 | 17 |
| 3 | 213.93 | 193.06 | 69.93 | 6.80 | 56 |
| 4 | 220.93 | 191.88 | 72.53 | 11.81 | 9 |
| 5 | 216.94 | 190.73 | 71.20 | 7.53 | 81 |
| 6 | 217.08 | 191.45 | 74.39 | 6.54 | 11 |
| 7 | 220.94 | 192.92 | 75.72 | 6.94 | 13 |
| 8 | 214.50 | 191.13 | 80.47 | 6.88 | 46 |
| 9 | 215.03 | 190.79 | 64.19 | 7.16 | 9 |
| 10 | 216.22 | 192.69 | 93.97 | 7.01 | 11 |
| 11 | 216.99 | 191.32 | 103.06 | 5.90 | 7 |
| 12 | 215.38 | 190.23 | 78.20 | 7.34 | 46 |
| 13 | 214.43 | 193.02 | 84.68 | 7.96 | 17 |
| 14 | 220.88 | 189.68 | 76.70 | 6.89 | 6 |
| 15 | 216.19 | 191.21 | 72.84 | 7.63 | 10 |
| 16 | 220.49 | 192.45 | 69.48 | 7.69 | 26 |
| 17 | 220.51 | 193.69 | 75.08 | 9.13 | 32 |
| 18 | 215.94 | 191.91 | 73.12 | 7.75 | 28 |
| 19 | 214.43 | 191.61 | 75.58 | 7.85 | 7 |
| 20 | 216.56 | 191.68 | 91.64 | 7.20 | 47 |
| 21 | 217.10 | 191.25 | 85.16 | 8.06 | 32 |
| 22 | 215.60 | 192.52 | 110.73 | 6.74 | 26 |
| 23 | 215.47 | 191.94 | 85.90 | 7.33 | 24 |
| 24 | 216.17 | 191.20 | 79.42 | 7.26 | 12 |
| 25 | 214.21 | 191.92 | 84.61 | 11.87 | 14 |
| 26 | 213.24 | 192.22 | 97.17 | 7.89 | 33 |
| 27 | 213.45 | 192.56 | 97.14 | 7.37 | 6 |
| 28 | 216.52 | 191.45 | 91.88 | 7.03 | 9 |
| 29 | 215.10 | 188.81 | 96.03 | 11.35 | 13 |
| 30 | 220.82 | 188.76 | 94.79 | 9.57 | 12 |
| **Promedio** | **216.48** | **191.58** | **82.08** | **7.78** | **23.33** |
| **Desviación Estándar** | **2.44** | **1.22** | **11.83** | **1.52** | **18.01** |

Para realizar esta prueba se usó el servicio de prueba de velocidad de Internet de Ookla. Antes de usar Raspberry Pi Connect se realizó la prueba de velocidad en ambos dispositivos, el teléfono con datos móviles y la Raspberry Pi conectado a la red local. Luego, se corrió el comando ping al servidor de Google para tener una métrica indirecta de tiempo de una conexión remota. Finalmente, se realizó la conexión con Raspberry Pi connect y se midió con el cronómetro del ordenador desde el momento en que empezó el servicio hasta que se ve la pantalla remota. Es importante notar que la prueba no tuvo fallos de conexión. A pesar de que no se pudo realizar la prueba en ubicaciones distintas entre dispositivos. Los paquetes de datos emulan una conexión remota ya que al usar redes distintas (Datos móviles y WI-FI) los paquetes deben salir de la red local y llegar al provedor de internet.

Concomitantemente, se realizó el estudio estadístico explicado al inicio del capítulo. No se realizó este estudio para los datos del Ping ni para la velocidad de red debido a que estos no responden a los objetivo, sino que se colocaron para dar un contexto de las condiciones de red. En este sentido, estos valores son muy variables ya que dependen de muchos factores como tráfico de red y condiciones climatológicas.

Para esta sección, la distribución calculada para el tiempo de establecimiento de conexión en la Tabla 5.15 presenta la forma esperada, tal como se visualiza en la Figura 5.8. Respecto a la regla empírica ejemplificada en la Tabla 5.16, los datos muestran una concentración notable en el primer nivel, alcanzando un 80.0% de las observaciones dentro de $\pm 1\sigma$. Este valor es superior al 68% teórico, lo que indica que el sistema tiende a establecer enlace en un tiempo muy cercano al promedio de forma más frecuente de lo previsto por una distribución normal perfecta. Para el rango de $\pm 3\sigma$, el cumplimiento es del 100%, lo que confirma la ausencia de valores atípicos extremos y garantiza que el proceso de comunicación no sufrió retardos críticos fuera de los límites de control durante las pruebas.El margen de error calculado es de $\pm 0.5669$ s, como se puede visualizar en la Tabla 5.17. Esto representa un error relativo de aproximadamente 7.29% respecto a la media (7.7783 s). Aunque esta variabilidad es porcentualmente superior a la observada en las variables eléctricas de voltaje y corriente, sigue reflejando una precisión adecuada para los procesos de supervisión y control del sistema. Finalmente, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que el valor verdadero del tiempo de conexión no es un punto único, sino que se encuentra contenido entre 7.2114 s y 8.3453 s.

**Tabla 5.15:** Datos y función de densidad de probabilidad

| Datos | Función de densidad de probabilidad |
|---|---|
| 5.90 | 0.1222 |
| 6.17 | 0.1499 |
| 6.54 | 0.1884 |
| 6.70 | 0.2042 |
| 6.74 | 0.2080 |
| 6.80 | 0.2135 |
| 6.88 | 0.2206 |
| 6.89 | 0.2214 |
| 6.94 | 0.2256 |
| 7.01 | 0.2312 |
| 7.03 | 0.2327 |
| 7.16 | 0.2418 |
| 7.20 | 0.2444 |
| 7.26 | 0.2479 |
| 7.33 | 0.2515 |
| 7.34 | 0.2520 |
| 7.37 | 0.2534 |
| 7.53 | 0.2593 |
| 7.63 | 0.2615 |
| 7.69 | 0.2623 |
| 7.75 | 0.2627 |
| 7.85 | 0.2625 |
| 7.89 | 0.2620 |
| 7.96 | 0.2609 |
| 8.06 | 0.2583 |
| 9.13 | 0.1768 |
| 9.57 | 0.1310 |
| 11.35 | 0.0165 |
| 11.81 | 0.0077 |
| 11.87 | 0.0070 |

**Tabla 5.16:** Validación de la distribución del tiempo de conexión mediante la regla empírica.

| Rango | Cantidad de datos | Porcentaje Real | Expectativa Teórica |
|---|---|---|---|
| $\pm 1\sigma$ | 24 | 80.0% | 68.20% |
| $\pm 2\sigma$ | 27 | 90.0% | 95.40% |
| $\pm 3\sigma$ | 30 | 100.0% | 99.70% |

*Parámetros calculados:*
Promedio ($\bar{x}$): 7.7783 s
Desviación estándar ($s$): 1.5183 s

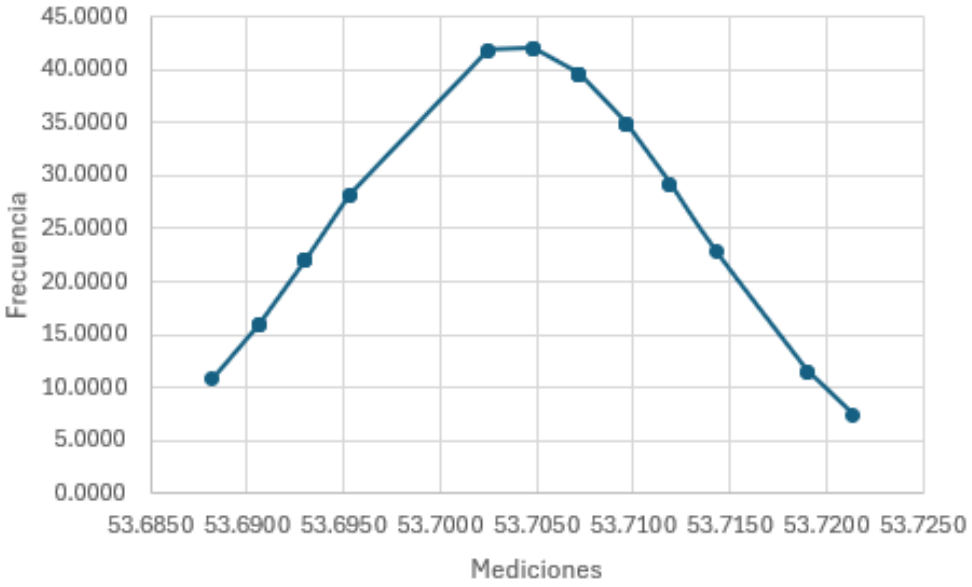



**Figura 5.8:** Distribución normal de medición de tiempo de conexión.

**Tabla 5.17:** Intervalo de confianza para el tiempo promedio de establecimiento de conexión.

| **Parámetro Estadístico** | **Valor** |
|---|---|
| Nivel de Confianza $(1-\alpha)$ | 95% |
| Significancia $(\alpha)$ | 0.05 |
| Margen de Error $(E)$ | $\pm$ 0.5669 s |
| **Límite Inferior** | **7.2114 s** |
| **Límite Superior** | **8.3453 s** |

## 5.5 Alertas

Con el fin de validar si el zumbador activo es aplicable para el sistema, se hicieron pruebas con un zumbador, un interruptor y una batería de nueve voltios. En este sentido, se midió la amplitud sonora con un teléfono celular usando la aplicación Pyphox en el cuarto de máquinas con y sin el zumbador a diferentes distancias. Para esta prueba no se consideró realizar el análisis estadístico ya que no responde directamente a uno de los objetivos. Las alertas fueron una necesidad identificada por el cliente que debido a la falta de instrumentos, no se puede realizar la correcta validación estadística. La distancia se midió con una cinta métrica como se observa en la Figura 5.9. Los resultados se pueden ver en las Tablas 5.18 y 5.19.




**Figura 5.9:** Zumbador y cinta métrica.

**Tabla 5.18:** Mediciones de nivel de sonido a 0 metros (Buzzer activo)

| # | Distancia perceptible (m) | Nivel de sonido sirena (dB) | Nivel de sonido de cuarto con contaminación sonora (dB) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 58.0 | 5.8 |
| 2 | 0 | 58.1 | 0.1 |
| 3 | 0 | 58.0 | 2.2 |
| 4 | 0 | 58.1 | 0.7 |
| 5 | 0 | 58.1 | 6.9 |
| 6 | 0 | 58.0 | 6.3 |
| 7 | 0 | 58.0 | 5.0 |
| 8 | 0 | 58.0 | 5.3 |
| 9 | 0 | 58.1 | -0.8 |
| 10 | 0 | 58.1 | 7.0 |
| 11 | 0 | 57.9 | -2.0 |
| 12 | 0 | 57.9 | 10.6 |
| 13 | 0 | 58.0 | -7.0 |
| 14 | 0 | 58.0 | -6.4 |
| 15 | 0 | 58.0 | 9.0 |
| 16 | 0 | 58.1 | 10.5 |
| 17 | 0 | 58.0 | 8.1 |
| 18 | 0 | 58.0 | 12.2 |
| 19 | 0 | 58.1 | 5.0 |
| 20 | 0 | 58.0 | 9.2 |
| 21 | 0 | 58.1 | 13.6 |
| 22 | 0 | 57.9 | 7.9 |
| 23 | 0 | 58.0 | 11.4 |
| 24 | 0 | 58.0 | 2.9 |
| 25 | 0 | 58.0 | 3.1 |
| 26 | 0 | 58.0 | 5.0 |
| 27 | 0 | 58.0 | 2.5 |
| 28 | 0 | 58.0 | 8.7 |
| 29 | 0 | 58.0 | 6.2 |
| 30 | 0 | 58.0 | -20.0 |
| Promedio | | 58.0 | 4.3 |
| Desviación Estándar | | 0.059 | 6.789 |

**Tabla 5.19:** Mediciones de nivel de sonido a 1 metro (Buzzer activo)

| # | Distancia perceptible (m) | Nivel de sonido sirena (dB) | Nivel de sonido de cuarto con contaminación sonora (dB) |
|---|---|---|---|
| 31 | 1 | 31.3 | 15.0 |
| 32 | 1 | 31.4 | 14.7 |
| 33 | 1 | 31.4 | 15.4 |
| 34 | 1 | 32.3 | 12.3 |
| 35 | 1 | 32.4 | 13.5 |
| 36 | 1 | 32.1 | 17.1 |
| 37 | 1 | 30.9 | 17.7 |
| 38 | 1 | 30.4 | 17.2 |
| 39 | 1 | 30.2 | 15.7 |
| 40 | 1 | 30.1 | 16.4 |
| 41 | 1 | 29.5 | 12.5 |
| 42 | 1 | 28.6 | 15.3 |
| 43 | 1 | 28.7 | 14.1 |
| 44 | 1 | 28.6 | 13.2 |
| 45 | 1 | 28.4 | 16.1 |
| 46 | 1 | 29.2 | 15.6 |
| 47 | 1 | 29.1 | 15.1 |
| 48 | 1 | 29.7 | 16.4 |
| 49 | 1 | 29.3 | 15.9 |
| 50 | 1 | 29.3 | 12.5 |
| 51 | 1 | 29.2 | 14.1 |
| 52 | 1 | 29.3 | 14.3 |
| 53 | 1 | 28.9 | 15.3 |
| 54 | 1 | 28.4 | 16.4 |
| 55 | 1 | 28.4 | 17.2 |
| 56 | 1 | 27.6 | 14.8 |
| 57 | 1 | 28.1 | 15.5 |
| 58 | 1 | 27.8 | 15.6 |
| 59 | 1 | 27.3 | 15.6 |
| 60 | 1 | 29.0 | 14.9 |
| Promedio | | 29.6 | 15.2 |
| Desviación Estándar | | 1.4 | 1.4 |

Respecto a la alarma visual, como el concepto ganador fue una pantalla táctil, la alarma visual se vería en la pantalla por medio de las gráficas y de correo electrónico. En este sentido, en caso de que un valor se salga de lo esperado, la gráfica indicaría el momento en el que ocurrió el evento. De seguido, se puede configurar una alarma de correo por medio de Grafana. Sin embargo, dado el limitado tiempo de intervención con el sistema actual, no se pudo programar una alarma relevante a los valores reales del sistema fotovoltaico. Concomitantemente, como no se realizó la descarga de las baterías, no se puede determinar los valores críticos de voltaje de la batería por lo que cualquier alarma no puede reflejar el estado del sistema. No obstante, se comunicó a la empresa la opción para que eventualmente se pueda aprovechar esta funcionalidad.

### 5.5.1 Análisis de los datos de alerta

Al analizar las mediciones del nivel de sonido emitido por el zumbador, se observa una variación considerable en la intensidad del sonido al pasar de una distancia de 0 metros a 1 metro. A 0 metros, el nivel promedio de sonido registrado fue de 58.0 dB, con una desviación estándar muy baja (0.059 dB). Esto indica que el zumbador presenta una emisión estable y constante cuando se mide directamente junto a la fuente.

En cambio, al aumentar la distancia a 1 metro, el nivel promedio disminuye a 29.6 dB, lo que representa una reducción cercana al 50% respecto al valor medido a corta distancia. La desviación estándar aumenta a 1.4 dB, reflejando una mayor dispersión en los datos debido a las reflexiones acústicas del entorno, interferencias y pequeñas variaciones en la posición del sensor.

Por otra parte, el nivel de sonido del cuarto con contaminación sonora muestra comportamientos distintos según la distancia. A 0 metros, el promedio fue de 4.3 dB con una desviación estándar alta (6.79 dB), lo que evidencia fluctuaciones significativas en el ruido ambiental, mientras que a 1 metro, el promedio aumentó a 15.2 dB con una desviación estándar menor (1.4 dB), reflejando un entorno más estable pero con mayor nivel general de ruido.

Las mediciones se realizaron en el cuarto de máquinas de un laboratorio en uso, un entorno con equipos eléctricos, ventiladores y sistemas mecánicos en funcionamiento. Este contexto generó ruido de fondo constante, vibraciones y resonancias que afectaron las lecturas, en especial las de contaminación sonora y aquellas cercanas al zumbador.

Las mediciones fueron efectuadas utilizando la aplicación de sonómetro de un teléfono móvil **Honor Magic 5 Lite**. Si bien este dispositivo permite obtener estimaciones útiles de nivel sonoro, su micrófono no está diseñado ni calibrado para mediciones acústicas de precisión. El micrófono integrado posee una respuesta en frecuencia limitada y una compresión automática del rango dinámico, lo cual puede atenuar picos de intensidad y suavizar variaciones rápidas. Además, el sistema operativo aplica filtrado digital para mejorar la captación de voz, introduciendo errores adicionales al medir fuentes no vocales, como zumbadores. En conjunto, estas limitaciones reducen la exactitud y repetibilidad de las mediciones.

Respecto a la incertidumbre, no se presenta un valor asociado a las mediciones debido a que el sistema de adquisición no fue calibrado frente a un patrón de referencia trazable ni se dispuso de un instrumento con certificado de calibración. Las lecturas se basaron únicamente en los valores digitales entregados por la aplicación del teléfono, por lo que la incertidumbre no puede cuantificarse formalmente. Sin embargo, si se conocieran las características del convertidor analógico-digital (ADC) interno del dispositivo, sería posible estimarla.

Esta resolución representa el valor mínimo detectable por el ADC, que a su vez determina la incertidumbre instrumental mínima del sistema de adquisición. En términos prácticos, cualquier variación menor a 2.0 mV en la señal de salida del sensor no podría distinguirse del ruido o del error de cuantificación.

En conclusión, los resultados muestran que la intensidad sonora del zumbador disminuye de forma notable con la distancia, lo que concuerda con la teoría de propagación acústica. No obstante, el ruido ambiental del cuarto de máquinas, las limitaciones del teléfono móvil Honor Magic 5 Lite y la ausencia de calibración del sistema de medición afectaron la precisión de las lecturas. Aun así, si se conociera el rango del ADC y su resolución efectiva, podría estimarse una incertidumbre asociada al proceso de digitalización, permitiendo un análisis más completo y trazable de los resultados.

## 5.6 Análisis Económico

Para la elaboración del proyecto se utilizaron los componentes listados en la Tabla 5.20. En este sentido, El costo asociado a la ejecución de este proyecto se detalla en la Tabla 5.21. Este monto representa la valoración económica del trabajo invertido, considerando que el autor no cuenta aún con el título universitario, por lo que se utilizó el salario mínimo de referencia. Asimismo, se incluye el tiempo de colaboración del jefe de mantenimiento, cuya participación se cuantificó en un día de labor; debido al desconocimiento de su nivel de instrucción académica formal, se aplicó la misma base salarial para garantizar un análisis de costos conservador y estandarizado.[17]

El costo total de inversión para la ejecución de este sistema asciende a ₡1,756,243.18 debido al desglose de la Tabla 5.21. Desde una perspectiva económica, el valor principal del sistema desarrollado no radica en la generación directa de ingresos, sino en su contribución al aprovechamiento de los recursos ya existentes. El producto corresponde a un sistema de monitoreo diseñado para supervisar los equipos e instalaciones actuales, permitiendo detectar irregularidades o fallas de manera temprana mediante alertas automatizadas. Este enfoque preventivo no solo reduce el riesgo de daños mayores, sino que también prolonga la vida útil de los equipos y mejora la eficiencia operativa del laboratorio.

No obstante, haciendo un estudio del costo del proyecto en comparación con el costo del monitoreo original, se puede notar que el proyecto es de mucho menor costo y se adapta mejor a las necesidades del cliente. En este sentido, la mayoría de los componentes del proyecto ya los poseía el laboratorio. Entonces la inversión monetaria inmediata es menor de la del costo total. El costo del monitoreo anterior con precios actuales se denota en la

**Tabla 5.20:** Lista de costos.

| # | Nombre | Descripción | Cant. | Costo Unitario (₡) | Impuestos (₡) | SubTotal (₡) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Raspberry Pi | Raspberry Pi 5 4GB | 1 | 56,806.40 | 1,136.13 | 57,942.53 |
| 2 | Raspberry Pi Fuente de Alimentación | Raspberry Pi 27W USB-C PD Power Supply Black | 1 | 11,750.40 | 235.01 | 11,985.41 |
| 3 | Pantalla | Capacitive Touch Screen 7" HDMI | 1 | 45,030.40 | 900.61 | 45,931.01 |
| 4 | Sensor de Corriente | Non-Invasive AC Current Sensor SCT-013 (100A MAX) | 1 | 8,166.40 | 163.33 | 8,329.73 |
| 5 | Cable MicroHDMI-HDMI | High Speed 4K Micro HDMI to HDMI cable (2m) | 1 | 4,070.40 | 81.41 | 4,151.81 |
| 6 | Micro SD | MEM Micro SD 256GB ADATA PREMIER PRO V30 U3 100/85MB | 1 | 9,911.20 | | 9,911.20 |
| 7 | Memoria USB | MEM USB 64GB KINGSTON EXODIA USB3.2 NEGRA | 1 | 2,035.80 | | 2,035.80 |
| 8 | Lector de tarjetas USB-C | Lector de tarjetas USB-C UNNO TEKNNO | 1 | 3,982.30 | | 3,982.30 |
| 9 | Sensor de Voltaje | ZMPT 3X Voltage Sensor | 1 | 13,346.90 | | 13,346.90 |
| 10 | ADC | RPICT4V3 Version 6 | 1 | 27,854.40 | | 27,854.40 |
| 11 | ADC | Módulo convertidor analógico digital DAC 4ch 16bit ADS1115 | 1 | 4,000.00 | | 4,000.00 |
| 12 | Amplificador Operacional | Circuito integrado LM358 dual low power operational amplifier DIP-8 | 1 | 300.00 | | 300.00 |
| 13 | Resistores | Resistores 1/8W | 5 | 40.00 | | 200.00 |
| 14 | Arduino UNO | Arduino UNO | 1 | 18,500.00 | | 18,500.00 |
| 15 | Placa de Prototipado | Placa de cobre PCB perforada 9x15cm una cara fenólica | 1 | 1,500.00 | | 1,500.00 |
| 16 | Caja de Proyectos | Caja de Proyectos | 1 | 4,500.00 | | 4,500.00 |
| 17 | USB 2.0 Cable Type A/B | USB 2.0 Cable Type A/B | 1 | 1,500.00 | | 1,500.00 |
| 18 | Terminal de bloque | Terminal bloque 4 contactos PCB 7.62mm de tornillo tipo regleta KF7.62-4P | 2 | 600.00 | | 1,200.00 |
| 19 | Terminal de bloque | Terminal bloque 2 contactos PCB 2.54mm de tornillo | 1 | 250.00 | | 250.00 |
| 20 | Cable Eléctrico | Cable automotriz GPT calibre #12 AWG | 3 | 800.00 | | 2,400.00 |
| 21 | Cable Ethernet | Cable Ethernet | 1 | 4,800.00 | | 4,800.00 |
| 22 | Buzzer activo | Zumbador activo 9VDC | 1 | 300.00 | | 300.00 |
| 23 | Interruptor | Switch mini rocker 10A 125V 2 pines rojo sin luz KCD1 | 1 | 600.00 | | 600.00 |
| 24 | Multímetro | Multímetro Steren MUL-110 | 1 | 25,900.00 | | 25,900.00 |
| 25 | Cautín y estaño | Herramienta para soldar | 1 | 16,000.00 | | 16,000.00 |
| | | | | | **Total** | **₡251,437.09** |

Tabla 5.22. La implementación del sistema desarrollado representa una ventaja económica contundente frente a la adquisición de una solución comercial. Mientras que el costo total de este proyecto (incluyendo mano de obra y componentes) asciende a ₡1,756,243.18, el reemplazo del sistema actual con equipos comerciales de similares características técnicas supondría una inversión de €5,610, equivalentes a aproximadamente ₡3,258,849.00.

Esta diferencia representa un ahorro directo del 46% (aproximadamente ₡1,502,605.82) res-

**Tabla 5.21:** Desglose de salario bruto para un periodo de 4 meses y 1 día

| **Concepto** | **Monto en Colones (₡)** |
|---|---|
| Salario Mensual Bruto | 373,092.42 |
| Total 4 meses laborados (Bruto) | 1,492,369.68 |
| Pago por 1 día adicional (Bruto) | 12,436.41 |
| **Total Percibido Bruto** | **1,504,806.09** |

**Tabla 5.22:** Lista de productos de monitoreo y costos[5].

| **Producto de monitoreo** | **Cantidad** | **Costo (€)** |
|---|---|---|
| Quattro 48/3000/35 | 3 | 1338 |
| Battery Monitor BMV 702 | 3 | 132 |
| Blue Solar Charge Controller | 3 | 400 |
| **Total** | 9 | 5610 |

pecto al precio de mercado. Es importante resaltar que esta comparación es conservadora, ya que el costo comercial de €5,610 contempla únicamente la adquisición de los componentes y equipos, sin incluir los costos adicionales por servicios de instalación profesional, configuración especializada o mantenimiento post-venta. Por lo tanto, el desarrollo propio no solo ha permitido una personalización técnica superior adaptada a las necesidades del Centro, sino que también ha optimizado los recursos institucionales de manera drástica.

Cabe destacar que el sistema fotovoltáico original, con un valor aproximado de ochenta mil dólares según los funcionarios del laboratorio, fue adquirido mediante una donación con el propósito de impulsar la investigación. Sin embargo, debido a la complejidad de su uso y a la falta de integración con las necesidades reales del laboratorio, dicho sistema permaneció prácticamente inactivo por un largo periodo. Con el paso del tiempo, varios de sus subsistemas —entre ellos las baterías de vanadio y de plomo-ácido, así como un monitor de control— sufrieron deterioro físico y pérdida de funcionalidad. Esto representó no solo una merma económica, sino también una limitación significativa para el desarrollo de nuevos proyectos experimentales. En este contexto, el presente proyecto adquiere una relevancia estratégica, ya que permite recuperar y dar un uso efectivo a una inversión significativa que hasta ahora no había generado los beneficios esperados.

Mientras que una reposición comercial del sistema de monitoreo de €5,610 (aprox. ₡3,258,849) representaría un gasto adicional del 7.8% respecto al valor original del proyecto, el sistema desarrollado en este trabajo apenas impacta en un 4.2% de dicha inversión inicial. Esto demuestra que es posible mantener la operatividad de sistemas de gran escala sin depender de soluciones propietarias costosas que podrían derivar en la obsolescencia técnica. El desarrollo propio reduce significativamente la barrera económica para futuras actualizaciones. Al haber diseñado los circuitos y la arquitectura de datos localmente, el Centro deja de depender de proveedores externos para diagnósticos, evitando costos de consultoría que típicamente acompañan a sistemas de este presupuesto.

La implementación del nuevo sistema de monitoreo transforma un recurso subutilizado en una herramienta activa de investigación y desarrollo. Su puesta en funcionamiento permitirá realizar nuevos estudios, registrar datos experimentales de manera continua y analizar el comportamiento de los sistemas bajo condiciones reales de operación. Estas capacidades son fundamentales para un laboratorio como el CELEQ, donde la investigación aplicada y la validación experimental de soluciones tecnológicas son pilares esenciales.

En resumen, a partir del análisis económico realizado, se identifican una serie de beneficios asociados a la implementación del sistema desarrollado, los cuales evidencian su viabilidad financiera, su impacto positivo en la operación del laboratorio y su aporte estratégico a la optimización de los recursos institucionales.

- Reducción significativa de costos frente a soluciones comerciales equivalentes, logrando un ahorro aproximado del 46% respecto al precio de mercado, incluso considerando mano de obra y componentes.
- Aprovechamiento de infraestructura y recursos existentes en el laboratorio, lo que disminuye la inversión monetaria inmediata y maximiza el retorno sobre activos previamente adquiridos.
- Implementación de un enfoque preventivo mediante monitoreo continuo y alertas automatizadas, lo cual reduce el riesgo de fallas graves y prolonga la vida útil de los equipos.
- Eliminación de la dependencia de soluciones propietarias costosas, reduciendo gastos futuros asociados a licencias, consultorías externas, mantenimiento especializado y obsolescencia técnica.
- Revalorización de una inversión institucional previamente subutilizada, transformando el monitoreo de un sistema fotovoltaico inactivo en una plataforma funcional para investigación y desarrollo.
- Incremento de la eficiencia operativa del laboratorio al disponer de información confiable y en tiempo real sobre el estado de los sistemas energéticos.
- Fortalecimiento de la capacidad investigativa del CELEQ, al habilitar la recopilación continua de datos experimentales y el análisis del comportamiento de los sistemas bajo condiciones reales de operación.

# Capítulo 6

# Conclusiones y Recomendaciones

## 6.1 Conclusiones

A partir del desarrollo del proyecto, se concluye que fue posible implementar un sistema de medición, almacenamiento de datos y conexión remota que cumple con los objetivos planteados desde el inicio. El sistema demostró ser funcional, permitiendo la adquisición continua de datos desde múltiples sensores, su envío a una base de datos InfluxDB 2 y la posterior visualización mediante Grafana. La integración con Raspberry Pi Connect posibilitó el acceso remoto al sistema, ampliando significativamente su versatilidad y capacidad de monitoreo en entornos distribuidos.

Uno de los logros más relevantes del proyecto es su alto nivel de escalabilidad. El diseño modular y la estructura del software permiten agregar hasta 5 placas con 7 de sensores AC cada una sin comprometer el rendimiento general ni requerir modificaciones sustanciales en la arquitectura existente. En este sentido, el circuito actual de medición de baterías permite aceptar más circuitos por medio del ADC de 4 canales. De igual forma, tanto InfluxDB 2 como Grafana ofrecen una configuración flexible, lo que facilita adaptar el sistema a nuevas necesidades, formatos de datos o protocolos de comunicación en el futuro.

Los rangos de medición de corriente (0A-100A) y voltaje (0V-240V) se adaptan al sistema actual. En caso de que el rango sea mayor en el futuro, se pueden cambiar los sensores y solo volverlos a conectar.

Respecto al primer objetivo, la documentación del proceso se llevó a cabo exitosamente y su evidencia se puede consultar en el Apéndice. Este diagnóstico se complementó mediante entrevistas técnicas dirigidas al jefe de mantenimiento y al asesor industrial, las cuales permitieron identificar los protocolos operativos, las necesidades críticas del sistema y el estado actual del método de medición de variables eléctricas en el proceso de generación fotovoltaica del Centro de Electroquímica y Energía Química.

Luego, respecto al segundo objetivo, este se cumplió satisfactoriamente mediante el diseño y ensamblaje de los circuitos electrónicos de adquisición de datos, los cuales fueron optimizados para el entorno del Centro. El diseño integró la etapa de hardware y la interfaz de monitoreo

local, validando su desempeño de forma cuantitativa. Mediante el análisis de intervalos de confianza, se determinó que el sistema opera con márgenes de error sumamente reducidos, del orden de $\pm 0.0055$ A para corriente y $\pm 0.2953$ V para el voltaje de línea. Asimismo, es de suma relevancia el error obtenido en la medición del voltaje de las baterías, el cual presentó un margen de apenas $\pm 0.0035$ V. Estos valores, obtenidos bajo un nivel de confianza del 95%, aseguran que las mediciones procesadas por los circuitos diseñados son una representación fiel y exacta de la realidad física del sistema. Esta precisión técnica es fundamental, ya que un error de milivoltios en la lectura de las baterías permite una estimación altamente confiable de su estado de carga (SoC), garantizando que la instrumentación local suministre datos rigurosos para la gestión energética del Centro.

Concomitantemente, respecto al tercer objetivo, este se alcanzó mediante la implementación de un sistema de recopilación y almacenamiento de datos basado en una arquitectura de red que permite el acceso remoto en tiempo real. Se diseñó una estructura de base de datos capaz de organizar de manera cronológica las variables eléctricas, asegurando la integridad de la información para análisis posteriores. El cumplimiento de este objetivo se validó analizando la estabilidad del canal de comunicación; mediante el cálculo de intervalos de confianza, se determinó que el tiempo de establecimiento de conexión se encuentra contenido entre 7.2114 s y 8.3453 s con un nivel de confianza del 95%.

Por último, para el cuarto objetivo, este se cumplió mediante la ejecución de pruebas de concepto en las instalaciones del Centro, donde el sistema operó bajo condiciones reales de generación fotovoltaica. La validación fue exitosa al constatar que el sistema integró correctamente todas sus etapas: desde la captura de señales en los circuitos y la visualización en el monitor local, hasta el almacenamiento y la recuperación remota de la información. La consistencia entre los datos teóricos y los resultados experimentales obtenidos durante estas pruebas confirmó la viabilidad técnica del proyecto, demostrando que el sistema es una herramienta funcional y confiable para el monitoreo energético institucional.

A pesar de este tiempo inicial de apertura del enlace, una vez establecida la sesión de compartición de pantalla para el monitoreo remoto, se observó que el tiempo de latencia en la transmisión de datos es casi imperceptible. Esto permite una fluidez visual idéntica a la del monitor local, garantizando que el personal del Centro de Electroquímica y Energía Química pueda realizar ajustes o diagnósticos inmediatos. La integración de este sistema de almacenamiento y visualización remota facilita un monitoreo continuo y la gestión de bases de datos históricas para la evaluación del rendimiento energético a largo plazo desde cualquier ubicación con acceso a internet.

A pesar de que el sistema de alertas se encuentra aún en una etapa de prueba de concepto, su integración preliminar permitió validar la posibilidad de generar notificaciones automáticas a partir de condiciones específicas en los datos. Esto demuestra el potencial del sistema para evolucionar hacia una plataforma más completa de supervisión y respuesta ante eventos.

Finalmente, debido a que el error relativo de cada prueba fue menor al 5%, con una confianza de 95% y el tiempo de transferencia de datos fue menor a 10 segundos, se puede asegurar que todos los objetivos se cumplieron.

## 6.2 Recomendaciones

Por otra parte, se identificaron aspectos que pueden optimizarse en futuras iteraciones. Principalmente, la carcasa del sistema podría mejorarse, ya sea mediante un diseño propio que incremente su resistencia mecánica y facilite el mantenimiento, o incorporando un sistema de ventilación que garantice una temperatura de operación adecuada en condiciones exigentes.

En este sentido, la pantalla podría ser más grande para facilitar la comprensión de información. Una vez que las baterías sean arregladas, se puede conseguir más sensores para las baterías y las líneas. La Raspberry Pi podría sustituirse por un modelo con mayor memoria volátil u otra SBC con un mejor procesador y mejores periféricos. La tarjeta SD y la memoria USB también pueden ser sustituidas por unas con mayor almacenamiento. En este sentido, se podría buscar un disco duro o una SDD (solid state drive) para remplazar la SD.

Se podría cambiar el sistema de alertas por uno más potente, pero eso arriesga la producción de contaminación sonora. Esto tendría consecuencias graves ya que el laboratorio tiene servicios de docencia y se encuentra dentro de la Universidad de Costa Rica.

La integración de una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) con la Raspberry Pi permitiría mantener el funcionamiento continuo del sistema ante cortes de energía, garantizando la adquisición y el almacenamiento de datos sin interrupciones y protegiendo la integridad de la información.

Para concluir, el proyecto permite el eventual estudio de las baterías ya que, a pesar de que no se pudo elaborar la descarga de estas, el sistema mide corriente y voltaje por lo que se puede hacer un estudio de la energía liberada por las baterías. Esto es clave para un laboratorio que estudia la energía química.

En resumen, el trabajo realizado permite concluir que se ha desarrollado una solución sólida, flexible y preparada para su expansión, sentando las bases para proyectos más complejos de monitoreo remoto y gestión inteligente de datos.

# Bibliografía


[1] R. M, *Electrónica de Potencia.* Pearson Education, 2015.

[2] C. S, *Máquinas Eléctricas.* McGraw Hill, 2005.

[3] T. W, *Sistemas de comunicaciones electrónicas.* Pearson Education, 2003.

[4] CRCibernetica. Shop. [En línea]. Disponible: https://www.crcibernetica.com

[5] V. Energy. Pricelist. (2026). [En línea]. Disponible: https://www.victronenergy.com/information/pricelist

[6] RaspberryPi. Raspberrypi documentation. [En línea]. Disponible: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html

[7] lechacal. Rpict series. [En línea]. Disponible: https://lechacal.com/docs/RPICT/Raspberrypi_Current_and_Temperature_Sensor_Adaptor

[8] Grafana. Grafana oss. [En línea]. Disponible: https://grafana.com/oss/grafana/?plcmt=oss-nav

[9] B. R, *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos.* Pearson Education, 2009.

[10] Z. H. An-140: Basic concepts of linear regulator and switching mode power supplies. (2013). [En línea]. Disponible: http://www-cs-faculty.stanford.edu/~uno/abcde.html

[11] F. J, *Handbook of Modern Sensors : Physics, Designs, and Applications.* Springer International Publishing, 2015.

[12] MathWorks. Introducción al estado de carga de una batería. [En línea]. Disponible: https://la.mathworks.com/discovery/battery-state-of-charge.html

[13] W. J, "A basic guide to i2c," 2022. [En línea]. Disponible: https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf?ts=1756081255450

[14] K. U. Eppinger, *Product design and development.* New York: McGraw-Hill Education, 2016.

[15] InfluxDB. Documentation. (2026). [En línea]. Disponible: https://docs.influxdata.com/influxdb/v2/

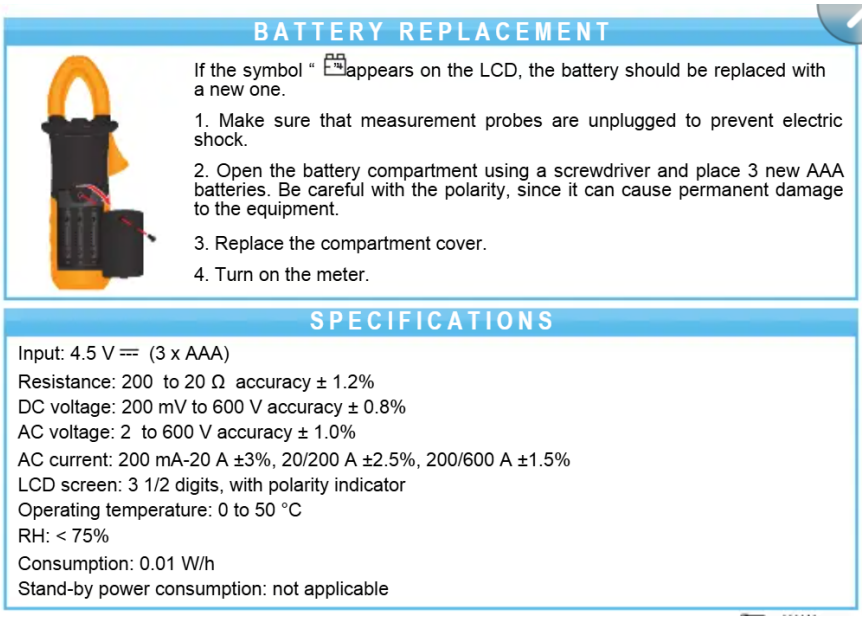
[16] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México: Pearson, 2012.

[17] M. de Trabajo y Seguridad Social. Salarios mínimos. (2026). [En línea]. Disponible: https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/salario_minimo.html

# Capítulo 7

# Anexos

## 7.1 Hojas de datos



**BATTERY REPLACEMENT**

If the symbol " appears on the LCD, the battery should be replaced with a new one.

1. Make sure that measurement probes are unplugged to prevent electric shock.

2. Open the battery compartment using a screwdriver and place 3 new AAA batteries. Be careful with the polarity, since it can cause permanent damage to the equipment.

3. Replace the compartment cover.

4. Turn on the meter.

**SPECIFICATIONS**

Input: 4.5 V ⎓ (3 x AAA)
Resistance: 200 to 20 Ω accuracy ± 1.2%
DC voltage: 200 mV to 600 V accuracy ± 0.8%
AC voltage: 2 to 600 V accuracy ± 1.0%
AC current: 200 mA-20 A ±3%, 20/200 A ±2.5%, 200/600 A ±1.5%
LCD screen: 3 1/2 digits, with polarity indicator
Operating temperature: 0 to 50 °C
RH: < 75%
Consumption: 0.01 W/h
Stand-by power consumption: not applicable

**Figura 7.1:** Resolución de Multímetro utilizado.

RPICT4V3 Version 6

This page is for board specific information. More information can be found on the generic page for RPICT series.

- 4 AC current sensors.
- 3 AC Voltage sensors.
- Compute real power.
- Fit on Raspberrypi 3/4/5 holes mounting pattern.
- 12 bits ADC
- AVR32DB32 Mcu (Arduino)
- Stackable (up to 5 boards together)

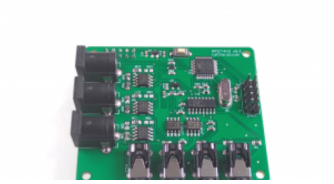


**Figura 7.2:** Datos RPICT4V3.

Product Folder | Order Now | Technical Documents | Tools & Software | Support & Community

TEXAS INSTRUMENTS

LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358B, LM2904, LM2904B, LM2904V

SLOS068V – JUNE 1976 – REVISED SEPTEMBER 2018

# Industry-Standard Dual Operational Amplifiers

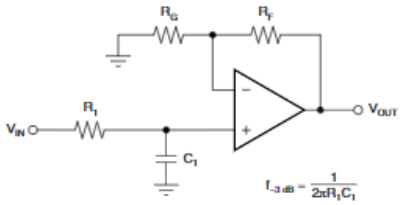
## 1 Features

- Wide Supply Range of 3 V to 36 V (B Version)
- Supply-Current of 300 µA (B Version, Typical)
- Unity-Gain Bandwidth of 1.2 MHz (B Version)
- Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Enabling Direct Sensing Near Ground
- Low Input Offset Voltage of 3 mV at 25°C (A and B Versions, Maximum)
- Internal RF and EMI Filter (B Version)
- On Products Compliant to MIL-PRF-38535, All Parameters Are Tested Unless Otherwise Noted. On All Other Products, Production Processing Does Not Necessarily Include Testing of All Parameters.

## 2 Applications

- Merchant Network and Server Power Supply Units
- Multi-Function Printers
- Power Supplies and Mobile Chargers
- Motor Control: AC Induction, Brushed DC, Brushless DC, High-Voltage, Low-Voltage, Permanent Magnet, and Stepper Motor
- Desktop PC and Motherboard
- Indoor and Outdoor Air Conditioners
- Washers, Dryers, and Refrigerators
- AC Inverters, String Inverters, Central Inverters, and Voltage Frequency Drives
- Uninterruptible Power Supplies
- Programmable Logic Controllers
- Electronic Point-of-Sale Systems

**Single-Pole, Low-Pass Filter**




$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)\left(\frac{1}{1 + sR_1C_1}\right)$$

## 3 Description

The LM358B and LM2904B devices are the next-generation versions of the industry-standard LM358 and LM2904 devices, which include two high-voltage (36-V) operational amplifiers (op amps). These devices provide outstanding value for cost-sensitive applications, with features including low offset (300 µV, typical), common-mode input range to ground, and high differential input voltage capability.

The LM358B and LM2904B devices simplify circuit design with enhanced features such as unity-gain stability, lower offset voltage of 3 mV (maximum at room temperature), and lower quiescent current of 300 µA (typical). High ESD (2 kV, HBM) and integrated EMI and RF filters enable the LM358B and LM2904B devices to be used in the most rugged, environmentally challenging applications.

The LM358B and LM2904B devices are available in micro-size packages, such as TSOT-8 and WSON, as well as industry standard packages, including SOIC, TSSOP, and VSSOP.

**Device Information**(1)

| PART NUMBER | PACKAGE | BODY SIZE (NOM) |
|---|---|---|
| LM358B(2), LM2904B(2), LM358, LM358A,LM2904, LM2904V, LM258, LM258A | SOIC (8) | 4.90 mm × 3.90 mm |
| LM358, LM358A, LM2904, LM2490V | TSSOP (8) | 3.00 mm × 4.40 mm |
| LM358, LM358A LM2904, LM2904V, LM258, LM258A | VSSOP (8) | 3.00 mm × 3.00 mm |
| LM358, LM2904 | SO (8) | 5.20 mm × 5.30 mm |
| LM358, LM2904, LM358A, LM258, LM258A | PDIP (8) | 9.81 mm × 6.35 mm |
| LM158, LM158A | CDIP (8) | 9.60 mm × 6.67 mm |
| LM158, LM158A | LCCC (20) | 8.89 mm × 8.89 mm |

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

(2) Package is for preview only

**Figura 7.3:** Datos LM358.

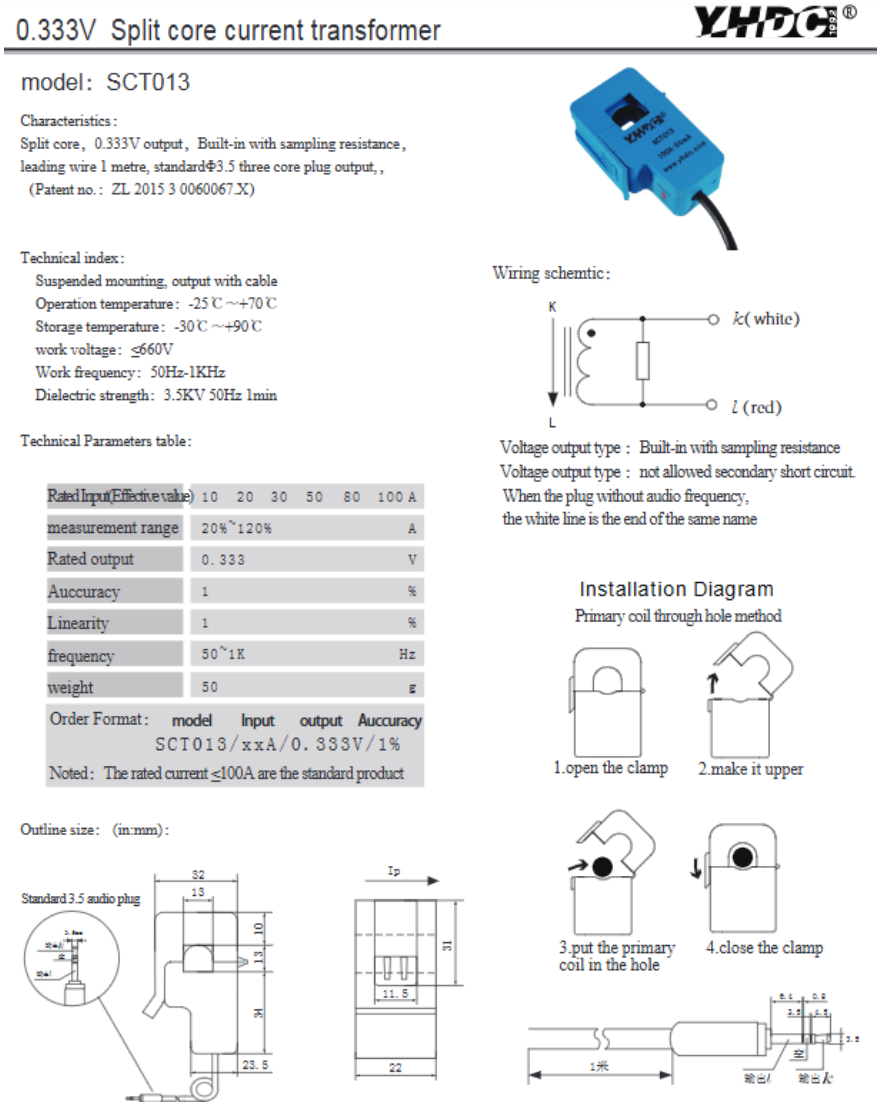



**Figura 7.4:** Datos SCT.

ZMPT101B Module 3x v4

## Technical Spec

| Name | Input Resistor | Output Resistor (Ω) | Sensitivity | Range (rms) | Comment |
|---|---|---|---|---|---|
| ZMPT_1X_225 | 160 kΩ | 100 Ω | 0.625 mV/V | 0 to 225V | Used to cover both 110 and 220V. |
| | | | | | |
| ZMPT_1X_140 | 100 kΩ | 100 Ω | 1 mV/V | 0 to 140V | For 110/120V use. |
| ZMPT_1X_280 | 200 kΩ | 100 Ω | 0.5 mV/V | 0 to 280V | For 220/240V use. |
| ZMPT_1X_420 | 300 kΩ | 100 Ω | 0.25 mV/V | 0 to 420V | |

**Figura 7.5:** Datos ZMPT.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

All specifications at –40°C to +125°C, VDD = 3.3V, and Full-Scale (FS) = ±2.048V, unless otherwise noted.
Typical values are at +25°C.

| PARAMETER | TEST CONDITIONS | ADS1113, ADS1114, ADS1115 | | | UNIT |
|---|---|---|---|---|---|
| | | MIN | TYP | MAX | |
| **ANALOG INPUT** | | | | | |
| Full-scale input voltage (1) | $V_{IN} = (AIN_P) - (AIN_N)$ | | ±4.096/PGA | | V |
| Analog input voltage | $AIN_P$ or $AIN_N$ to GND | GND | | VDD | V |
| Differential input impedance | | | See Table 2 | | |
| Common-mode input impedance | FS = ±6.144V (1) | | 10 | | MΩ |
| | FS = ±4.096V (1) , ±2.048V | | 6 | | MΩ |
| | FS = ±1.024V | | 3 | | MΩ |
| | FS = ±0.512V, ±0.256V | | 100 | | MΩ |
| **SYSTEM PERFORMANCE** | | | | | |
| Resolution | No missing codes | 16 | | | Bits |
| Data rate (DR) | | | 8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860 | | SPS |
| Data rate variation | All data rates | –10 | | 10 | % |
| Output noise | | | See Typical Characteristics | | |
| Integral nonlinearity | DR = 8SPS, FS = ±2.048V, best fit (2) | | | 1 | LSB |
| Offset error | FS = ±2.048V, differential inputs | | ±1 | ±3 | LSB |
| | FS = ±2.048V, single-ended inputs | | ±3 | | LSB |
| Offset drift | FS = ±2.048V | | 0.005 | | LSB/°C |
| Offset power-supply rejection | FS = ±2.048V | | 1 | | LSB/V |
| Gain error (3) | FS = ±2.048V at 25°C | | 0.01 | 0.15 | % |
| Gain drift (3) | FS = ±0.256V | | 7 | | ppm/°C |
| | FS = ±2.048V | | 5 | 40 | ppm/°C |
| | FS = ±6.144V (1) | | 5 | | ppm/°C |
| Gain power-supply rejection | | | 80 | | ppm/V |
| PGA gain match (3) | Match between any two PGA gains | | 0.02 | 0.1 | % |
| Gain match | Match between any two inputs | | 0.05 | 0.1 | % |
| Offset match | Match between any two inputs | | 3 | | LSB |

**Figura 7.6:** Datos ADC.

# Capítulo 8

# Apéndices

## 8.1 Documentación de método actual



**Figura 8.1:** Estado de baterías de Ácido de Plomo.



**Figura 8.2:** Estado del Vanadio de las baterías.




**Figura 8.3:** Estado de baterías de litio.




**Figura 8.4:** Estado de uno de los monitores.

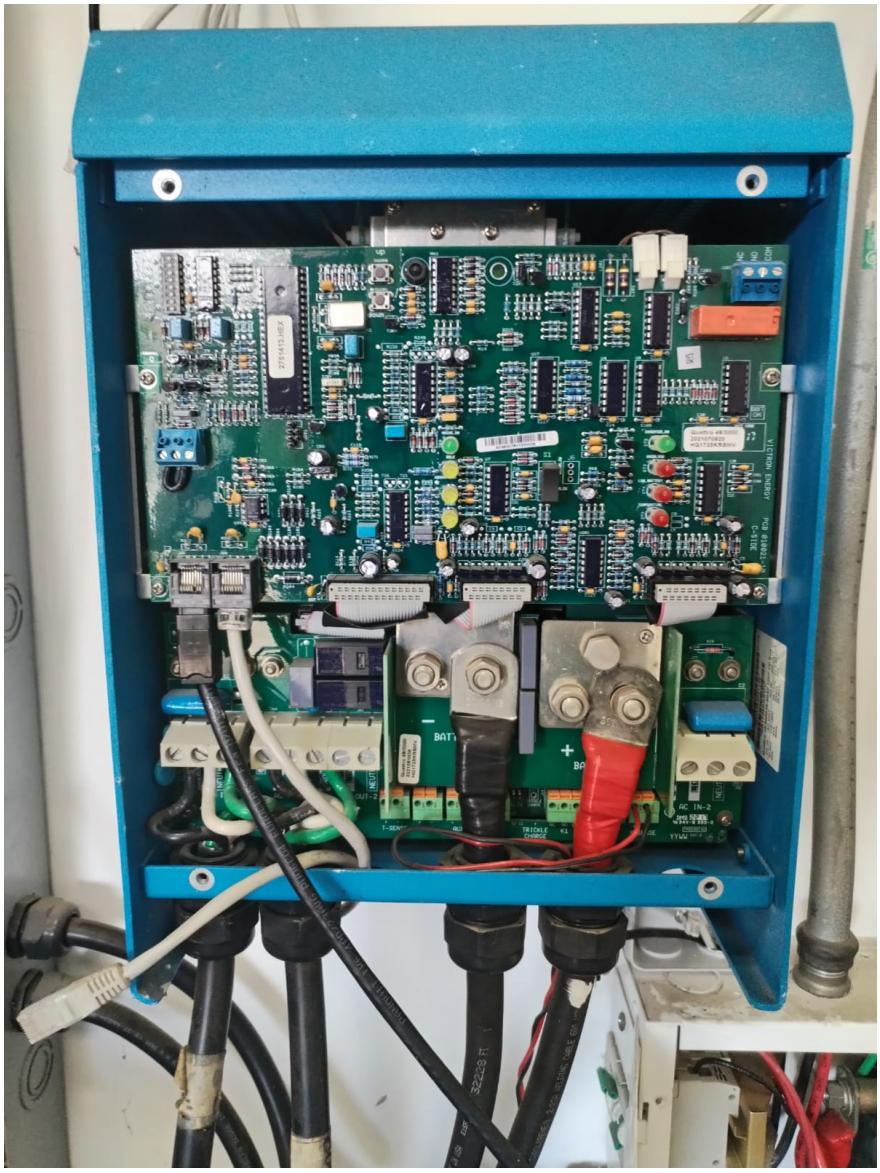


**Figura 8.5:** Estado de uno de los inversores.

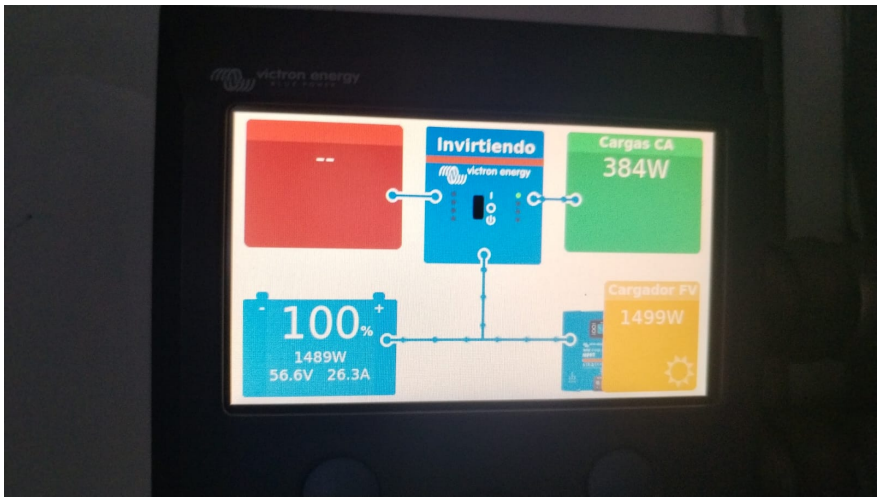



**Figura 8.6:** Interfaz funcional del método actual.

## 8.2 Programación de Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

Adafruit_ADS1115 ads;  // ADS1115 (16 bits)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();

  if (!ads.begin()) {
    Serial.println("No se encontró el ADS1115");
    while (1);
  }

  // Ganancia ±6.144 V (necesaria para señales hasta ~5 V)
  ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);

  //Serial.println("ADS1115 listo. Leyendo canal A0...");
}

void loop() {
  int16_t raw = ads.readADC_SingleEnded(0)+64;  // Canal A0

  // Conversión a voltaje
  float voltage = raw * 0.1875 / 1000.0;
  // 0.1875 mV por bit con GAIN_TWOTHIRDS
  float calibrador = 18.94499;
  // Calibrador es la variable a modificar para escalar el valor de salida del ADS A0
  // Comparar con valor experimental y sacar regla de 3

  // Cálculo corriente
  int resistencia = 28260;
  // Este valor se usa para calcular la corriente.
  // Si se requiere drenar la batería con otra carga se requiere actualizar
  // Con el circuito apagado medir terminales con multímetro. Está en ohms.

  Serial.print("RAW: ");
  Serial.print(raw);
  Serial.print("  |  Voltaje: ");
  Serial.print(voltage*calibrador, 4);
  Serial.print(" V");
```

```
  Serial.print("  |  Corriente: ");
  Serial.print(voltage*calibrador/resistencia, 4);
  Serial.println(" A");

  delay(500);
}
```

## 8.3 Uso de InfluxDB 2, Grafana y la configuración web de RPICT

### 8.3.1 Uso básico de InfluxDB 2 y Grafana con la aplicación web

InfluxDB 2 es una base de datos especializada en almacenar datos en el tiempo, como mediciones de voltaje, corriente, temperatura o potencia tomadas periódicamente. Grafana es una herramienta de visualización que permite convertir esos datos en gráficos claros e interactivos, accesibles desde un navegador web.

En una aplicación web típica, la aplicación mide o recibe los datos desde sensores o equipos y los envía a InfluxDB 2 mediante su API HTTP. Cada dato se almacena junto con su marca de tiempo, lo que permite analizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo.

InfluxDB 2 se administra desde su interfaz web, a la cual se accede normalmente mediante:

`http://localhost:8086`

(o bien `http://<IP-del-servidor>:8086` si se accede desde otro equipo). Desde esta interfaz, el usuario crea la organización, el bucket donde se guardarán los datos y el token de acceso. Estos parámetros se configuran una sola vez y luego se utilizan en la aplicación web para autorizar el envío de datos de forma segura.

Grafana se utiliza para visualizar la información almacenada en InfluxDB 2. Su interfaz web suele estar disponible en:

`http://localhost:3000`

(o `http://<IP-del-servidor>:3000`). En Grafana, el usuario configura InfluxDB 2 como fuente de datos ingresando la URL del servidor de InfluxDB, el bucket y el token. Una vez configurado, es posible crear paneles con gráficos, tablas e indicadores que se actualizan automáticamente conforme se almacenan nuevas mediciones.

Para el usuario final, el uso diario es sencillo: basta con acceder desde el navegador web a Grafana, seleccionar el panel deseado y observar el comportamiento de las variables medidas en tiempo real o de forma histórica. No es necesario interactuar directamente con la base de datos, ya que toda la información se presenta de manera gráfica y organizada.

En conjunto, InfluxDB 2 se encarga del almacenamiento confiable y eficiente de los datos, mientras que Grafana proporciona una visualización clara e intuitiva, facilitando el monitoreo y análisis del sistema desde una aplicación web.

### 8.3.2 Configuración Web de RPICT

La herramienta de configuración web del RPICT permite configurar el sistema de medición de forma sencilla utilizando únicamente un navegador web. Para acceder a esta herramienta, el usuario debe ingresar desde un navegador a la dirección del dispositivo donde está instalado el RPICT, utilizando la IP del Raspberry Pi seguida del puerto 8000:

```
http://localhost:8000
```

Desde esta interfaz web, el usuario puede administrar el funcionamiento del sistema sin necesidad de utilizar la línea de comandos, lo que facilita la puesta en marcha y reduce errores de configuración.

### 8.3.3 Funciones disponibles en la herramienta web

- **Ajustar los parámetros principales de funcionamiento del sistema:** El usuario puede modificar parámetros que definen cómo se realizan las mediciones, como el intervalo de muestreo, el tipo de variables a medir (voltaje, corriente o potencia), los rangos de medición y las opciones de comunicación con el sistema de almacenamiento de datos. Esto permite adaptar el RPICT a distintas aplicaciones de monitoreo.

- **Cargar una configuración existente desde el dispositivo:** Permite cargar configuraciones previamente guardadas, evitando tener que configurar el sistema desde cero.

- **Guardar configuraciones para uso posterior:** El usuario puede guardar las configuraciones creadas o modificadas para utilizarlas más adelante, facilitando cambios rápidos entre distintos modos de operación.

- **Aplicar los cambios directamente al RPICT:** Una vez ajustados los parámetros, se pueden aplicar los cambios inmediatamente, haciendo que el sistema comience a operar con la nueva configuración.

### 8.3.4 Preguntas de evaluación

A continuación se proponen cinco preguntas importantes que evalúan la comprensión de los conceptos clave:

1. ¿Cuál es la función principal de InfluxDB 2 en el sistema? Marque con una X la respuesta correcta.

   - ( ) Visualizar los datos mediante gráficos interactivos
   - ( ) Configurar los parámetros del RPICT
   - (X) Almacenar las mediciones junto con su marca de tiempo
   - ( ) Controlar el hardware de medición directamente

2. ¿Cuál es la función principal de Grafana dentro del sistema? Marque con una X la respuesta correcta.

   - ( ) Almacenar los datos de medición
   - (X) Visualizar los datos almacenados en forma gráfica
   - ( ) Generar las mediciones desde los sensores
   - ( ) Configurar el intervalo de muestreo

3. ¿Qué elementos deben configurarse inicialmente en InfluxDB 2 para que la aplicación funcione correctamente? Marque con una X la respuesta correcta.

   - ( ) Usuario, contraseña y puerto
   - ( ) Servidor, IP y protocolo
   - (X) Organización, bucket y token
   - ( ) Paneles, gráficos y tablas

4. ¿Desde la herramienta de configuración web del RPICT, qué parámetro puede modificar el usuario? Marque con una X la respuesta correcta.

   - ( ) El sistema operativo del Raspberry Pi
   - ( ) El código fuente de InfluxDB
   - (X) El intervalo de muestreo de las mediciones
   - ( ) El navegador web del usuario

5. ¿Cuál es una ventaja de usar la interfaz web del RPICT en lugar de la línea de comandos? Marque con una X la respuesta correcta.

   - ( ) Requiere mayor conocimiento técnico
   - ( ) Elimina la necesidad de usar InfluxDB
   - (X) Facilita la configuración y reduce errores
   - ( ) Impide guardar configuraciones

# Índice alfabético

Flyback, 8

Inter-Integrated Circuit, 13