DESARROLLO DE UN NODO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO.

YESICA ALEJANDRA ARANGO SERNA.
DANIEL SANTIAGO ORTIZ URREGO.
YEFERSON QUINTERO SALAMANCA.

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

DESARROLLO DE UN NODO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

YESICA ALEJANDRA ARANGO SERNA.
DANIEL SANTIAGO ORTIZ URREGO.
YEFERSON QUINTERO SALAMANCA.

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista.

Asesor
William Orozco Murillo
MSc en Gestión Energética Industrial

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

Contenido

1. Planteamiento del problema 2

1.1 Descripción 2

1.2 Formulación 3

2. Justificación 4

3. Objetivos 5

3.1 Objetivo general 5

3.2 Objetivos específicos 5

4. Referentes teóricos 6

4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia y la Transmisión de Energía. 6

4.2 Redes monofásicas, trifásicas y de corriente directa. 7

4.2.1 Redes Monofásicas. 7

4.2.2 Redes Trifásicas. 7

4.2.3 Redes de Corriente Directa (DC). 8

4.3 Microrredes Eléctricas. 8

4.4 La Transición Energética. 9

4.5 La digitalización del sistema eléctrico. 10

4.6 La emulación de procesos eléctricos. 11

4.7 Simulación tipo hardware in the loop (HIL). 12

4.8 La integración de generadores y cargas en una microrred. 13

4.9 Internet de las cosas y control supervisor. 14

4.10 Módulos ESP32 aplicado a los procesos eléctrico 15

4.11 Los inversores electrónicos de voltaje. 16

5. Metodología 19

5.1 Tipo de proyecto 19

5.2 Método 19

5.2.1 Fase 1: Análisis y modelado del sistema. 19
5.2.2 Fase 2: Diseño e implementación del sistema. 20
5.2.3 Fase 3: Validación experimental. 21
5.3 Instrumentos de recolección de información. 22
5.3.1 Fuentes primarias 22
5.3.2 Fuentes secundarias 22
6. Resultados 24
6.1 Levantamiento de información técnica de la microrred. 24
6.1.1 Arquitectura de la microrred con nodo de almacenamiento 24
6.2 Caracterización del sistema de almacenamiento de energía. 26
6.2.1 Variables del modelo. 26
6.2.2 Modelo Dinámica del Estado de Carga (SoC) 27
6.2.3 Modelo Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}). 27
6.2.4 Modelo Voltaje en los Terminales (V_t) 27
6.2.5 Modelo Dinámica de Polarización (V_{rc}) 27
6.2.6 Modelo Térmico 28
6.2.7 Parámetros del sistema. 28
6.2.8 Parámetros eléctricos por tecnología. 28
6.3 Desarrollo del modelo de simulación. 29
6.4 Análisis de Resultados y Selección de Tecnología. 33
6.4.1 Evolución del Estado de Carga (SoC). 36
6.4.2 Análisis técnico - Efecto Peukert 37
6.4.3 Comportamiento Térmico 37
6.4.4 Análisis técnico - Generación de calor. 37
6.4.5 Consecuencias del sobrecalentamiento. 38
6.4.6 Balance térmico. 38
6.5 Selección y adquisición de los componentes. 40
6.6 Diseño Eléctrico y Estructural 43

6.7 Programación y configuración del sistema de control. 45
6.8 Montaje e integración del prototipo. 46
6.9 Protocolo de pruebas. 48
6.10 Ejecución de pruebas experimentales. 56
6.11 Análisis comparativo de resultados. 61
6.12 Validación final del nodo de almacenamiento. 63
7. Conclusiones 66
8. Recomendaciones 67
9. Referencias bibliográficas 68

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 *Sistemas eléctricos de transmisión de potencia.* 6
Figura 2 *Microrred eléctrica.* 8
Figura 3 *Red de energías renovables.* 10
Figura 4 *Digitalización del sistema.* 11
Figura 5 *Simulación experimental.* 12
Figura 6 *Estructura de una Microrred.* 14
Figura 7 *Control Supervisor.* 15
Figura 8 *Microcontrolador ESP32.* 16
Figura 9 *Inversores Electrónicos.* 17
Figura 10 *Topología de la Microrred.* 25
Figura 11 *Código de la Simulación.* 30
Figura 12 *Graficas de la simulación.* 33
Figura 13 *Diagrama del nodo de almacenamiento.* 43
Figura 14 *Esquema eléctrico.* 44
Figura 15 *Código inversor parte 1.* 49
Figura 16 *Código inversor parte 2* 50
Figura 17 *Señal Línea Neutro* 51
Figura 18 *Tensión Fase Fase.* 53
Figura 19 *Señal de fase desfasada* 54
Figura 20 *Perfil de Voltaje DC y AC.* 56
Figura 21 *Estado de carga estimado.* 57
Figura 22 *Comportamiento de Potencias.* 58
Figura 23 *Corriente de carga y descarga.* 59
Figura 24 *Factor de potencia.* 60
Figura 25 *Energía activa entregada.* 61
Figura 26 *Eficiencia energética del nodo.* 62

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 *Datos de baterías.* 29
Tabla 2 *Resumen batería ion litio*. 34
Tabla 3 *Resumen batería plomo acido.* 35
Tabla 4 *Diferencias a 16V*. 36
Tabla 5 *Resumen de criterios* 39
Tabla 6 *Variables del sistema.* 63
Tabla 7 *Criterios de validación.* 64

Resumen

DESARROLLO DE UN NODO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO.

YESICA ALEJANDRA ARANGO SERNA.
DANIEL SANTIAGO ORTIZ URREGO.
YEFERSON QUINTERO SALAMANCA.

La Institución Universitaria Pascual Bravo está llevando a cabo un proyecto muy innovador. Este proyecto se centra en la transición energética. Para lograr esto, están desarrollando un sistema para almacenar energía. Esto ayudará a mejorar la infraestructura de su microrred didáctica. De esta manera, podrán convertirla en un laboratorio de primera para sus estudiantes. El proyecto busca resolver un problema técnico importante. Este problema tiene que ver con la gestión de fuentes de energía renovable que no siempre están disponibles. Para resolver esto, están siguiendo un enfoque de tres pasos. Primero, utilizan simulaciones dinámicas en MATLAB/Simulink para optimizar los parámetros. Luego, integran tecnologías de hardware, como convertidores de potencia y módulos especiales, en un entorno de Internet de las cosas (IoT) y supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Finalmente, realizan pruebas experimentales para asegurarse de que la frecuencia y la tensión sean estables. Este proyecto no solo permite probar estrategias de control avanzadas, sino que también ayuda a formar ingenieros que puedan generar y consumir energía de manera sostenible. De esta forma, la institución se posiciona como líder en innovación, sostenibilidad y digitalización en el sector eléctrico del país.

Palabras claves: Inversores, Convertidores, Simulación, Microred, Almacenamiento, Didáctico.

Abstract

The Pascual Bravo University is carrying out a highly innovative project focused on the energy transition. To achieve this, they are developing an energy storage system aimed at improving the infrastructure of their didactic microgrid, transforming it into a world-class laboratory. The project seeks to solve a major technical issue regarding the management of intermittent renewable energy sources. To address this, they are following a three-step approach. First, they use dynamic simulations in MATLAB/Simulink to optimize system parameters. Second, they integrate hardware technologies such as power converters and specialized modules into an Internet of Things (IoT) and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) environment. Finally, they conduct experimental tests to ensure frequency and voltage stability. This project not only allows for the testing of advanced control strategies but also helps train engineers to become prosumers who can generate and consume energy sustainably. In doing so, the institution positions itself as a leader in innovation, sustainability, and digitalization within the country's electrical sector.

Keywords: Inverters, Converters, Simulation, Microgrid, Storage, Didactic.

Glosario

Almacenamiento: Tecnologías y dispositivos que permiten guardar energía para su uso posterior, como baterías o sistemas de almacenamiento térmico.

Convertidores: Equipos que transforman parámetros eléctricos (voltaje, corriente o frecuencia) para adaptar la energía a las necesidades de un sistema específico.

Didáctico: Relativo a la enseñanza; se refiere a materiales, métodos o recursos diseñados para facilitar el aprendizaje y la comprensión de un tema.

Inversores: Dispositivos electrónicos que convierten corriente continua (DC) en corriente alterna (AC), permitiendo la conexión de fuentes renovables a la red eléctrica.

Microred: Conjunto de cargas y fuentes de energía interconectadas que pueden operar de manera autónoma o conectadas a la red principal, favoreciendo la integración de energías renovables.

Simulación: Proceso de modelar y analizar un sistema mediante software o herramientas matemáticas, con el fin de predecir su comportamiento sin necesidad de pruebas físicas inmediatas.

Introducción

Las microrredes eléctricas se han consolidado como una alternativa tecnológica clave para la gestión eficiente, sostenible y flexible de la energía eléctrica, al permitir la integración de fuentes de energía renovable, sistemas de control inteligente y almacenamiento energético en entornos controlados y fácilmente replicables. En este contexto, las instituciones académicas desempeñan un papel fundamental al desarrollar plataformas experimentales que fomentan la formación práctica, la investigación aplicada y la innovación tecnológica.

No obstante, para que una microrred opere como un sistema integral de análisis y experimentación, es indispensable contar con un sistema de almacenamiento de energía que permita estabilizar el flujo de potencia, gestionar la intermitencia de las fuentes renovables y reproducir condiciones reales de operación. La ausencia de estos sistemas limita significativamente el alcance de estudio y validación de estrategias avanzadas de control y gestión energética.

Actualmente, la microrred didáctica de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo presenta restricciones operativas debido a la falta de un nodo de almacenamiento de energía que pueda ser monitoreado y controlado en tiempo real. Esta limitación dificulta la implementación y validación experimental de tecnologías basadas en IoT–SCADA, así como el desarrollo de prácticas académicas orientadas al análisis dinámico de sistemas eléctricos. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar e implementar un nodo de almacenamiento que permita supervisar, gestionar y analizar el comportamiento de la microrred bajo diferentes condiciones de generación y demanda, fortaleciendo su funcionalidad como herramienta de aprendizaje e investigación.

El presente trabajo aborda el diseño, simulación, construcción e integración de un nodo de almacenamiento de energía dentro de un sistema de supervisión y control remoto, que permite la comparación entre resultados simulados y datos experimentales obtenidos en laboratorio. Con ello, se busca mejorar la infraestructura tecnológica de la microrred, consolidar un entorno práctico para el estudio de sistemas eléctricos inteligentes y contribuir al fortalecimiento de la formación profesional, la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones orientadas a la transición energética y la automatización de procesos industriales.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

En la actualidad, las microrredes eléctricas se consolidan como una solución tecnológica clave para la gestión eficiente, segura y sostenible de la energía eléctrica, especialmente en entornos académicos y de investigación, donde permiten la experimentación con fuentes renovables, sistemas de control avanzado y estrategias de almacenamiento energético. Sin embargo, la microrred didáctica de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo presenta limitaciones en su infraestructura, particularmente en la ausencia de un nodo de almacenamiento de energía funcional, que permita analizar el comportamiento dinámico del sistema ante diferentes condiciones de generación y demanda.

Esta carencia dificulta la validación práctica de algoritmos de control, la integración de tecnologías emergentes como IoT-SCADA y el desarrollo de prácticas de laboratorio que representen de manera realista los fenómenos eléctricos presentes en microrredes modernas. Además, sin un sistema de almacenamiento activo, la microrred no puede gestionar de forma óptima la intermitencia de fuentes renovables ni garantizar estabilidad frente a variaciones en la carga.

La falta de un nodo de almacenamiento integrado y supervisado impide que la microrred cumpla plenamente su propósito como plataforma de investigación, enseñanza y desarrollo tecnológico. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar, construir y validar un nodo de almacenamiento de energía que integre tecnologías de supervisión y control remoto, permitiendo la comparación entre resultados simulados y datos experimentales.

El desarrollo de este nodo no solo atenderá una necesidad institucional, sino que además contribuirá al fortalecimiento de las capacidades investigativas en energías renovables, automatización y sistemas eléctricos inteligentes, consolidando a la Institución Universitaria

Pascual Bravo como referente en la implementación de soluciones aplicadas a la gestión energética sostenible.

1.2 Formulación

¿Cómo desarrollar un nodo de almacenamiento de energía que integre tecnologías IoT-SCADA, permitiendo su simulación, construcción y validación dentro de la microrred didáctica de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo, garantizando su precisión, eficiencia y funcionalidad en condiciones reales de operación?

2. Justificación

El desarrollo de sistemas eléctricos inteligentes constituye una de las áreas de mayor impacto en la transición hacia modelos energéticos sostenibles. En este contexto, las microrredes se consolidan como entornos experimentales idóneos para la integración de fuentes renovables, sistemas de control automatizado y tecnologías de almacenamiento energético, permitiendo evaluar su desempeño bajo condiciones reales y controladas.

La Institución Universitaria Pascual Bravo, comprometida con la formación en ingeniería eléctrica y el fortalecimiento de la investigación aplicada, quiere disponer de una microrred didáctica de investigación orientada a la experimentación en gestión energética. No obstante, la ausencia de un nodo de almacenamiento de energía limita su funcionalidad y su capacidad para replicar condiciones operativas propias de sistemas eléctricos modernos, reduciendo las oportunidades de aprendizaje y validación de soluciones tecnológicas avanzadas.

Implementar un nodo de almacenamiento de energía que integre tecnologías IoT y SCADA permitirá dotar a la microrred de una infraestructura más completa y versátil, capaz de registrar, analizar y controlar flujos energéticos en tiempo real. Esto facilitará la validación experimental de estrategias de control, el análisis de estabilidad del sistema y la comparación entre resultados simulados y datos reales, fortaleciendo la calidad del proceso de investigación y desarrollo tecnológico.

Además, el proyecto aportará un valor significativo a la institución al consolidar un entorno de ensayo e innovación en energías renovables, generando un espacio de formación práctica para estudiantes e investigadores, alineado con los objetivos del Ministerio de Minas y Energía de Colombia y las políticas nacionales de fomento a la transición energética. Desde una perspectiva académica y social, este proyecto no solo contribuye al avance del conocimiento en automatización y almacenamiento energético, sino que también promueve la aplicación de tecnologías limpias, la eficiencia operativa y la sostenibilidad, respondiendo a los desafíos energéticos contemporáneos y fortaleciendo las capacidades institucionales en investigación y desarrollo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un nodo funcional de almacenamiento de energía que integre tecnologías IoT-SCADA, validando su desempeño mediante la comparación entre datos simulados y reales obtenidos en pruebas, garantizando la precisión y efectividad del sistema diseñado.

3.2 Objetivos específicos

Simular el comportamiento del nodo de almacenamiento de energía mediante el uso de herramientas de modelado como MATLAB/Simulink, con el fin de analizar su respuesta dinámica ante variaciones de carga y generación, definiendo los parámetros de diseño y control necesarios para la validación del prototipo.

Implementar el prototipo físico del nodo de almacenamiento de energía integrando componentes electrónicos, autómatas programables y sistemas de comunicación IoT–SCADA, para garantizar la supervisión, control y registro de variables eléctricas, asegurando su interoperabilidad con la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

Validar el desempeño del nodo de almacenamiento de energía mediante pruebas experimentales, comparando los resultados de la simulación con los datos obtenidos en laboratorio, para determinar la precisión del modelo, la eficiencia del sistema implementado y su estabilidad operativa en condiciones reales de funcionamiento dentro de la microrred didáctica.

4. Referentes teóricos

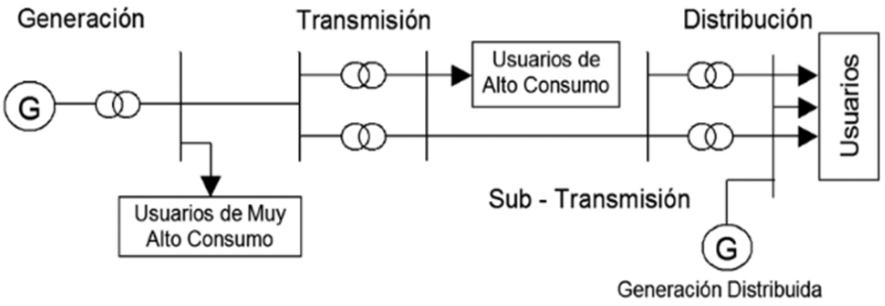
4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia y la Transmisión de Energía.

Un sistema eléctrico de potencia está compuesto por procesos de generación, transmisión, distribución y consumo. La transmisión, específicamente, utiliza líneas de alta tensión para transportar grandes cantidades de energía desde plantas de generación hacia centros urbanos o industriales, buscando minimizar pérdidas eléctricas. La estabilidad de la red depende del balance constante entre generación y demanda; cualquier desequilibrio puede provocar variaciones en tensión y frecuencia (Acevedo Rueda, 2013).

En el caso del presente proyecto, la microrred didáctica se conecta al sistema de transmisión a través de un punto común de acoplamiento (PCC). Esto significa que el nodo de almacenamiento debe operar de forma coordinada con los parámetros eléctricos de la red principal, evitando flujos no deseados que puedan afectar su estabilidad. Por tanto, el diseño del nodo incluye sistemas de medición, protección y control que permitan asegurar un intercambio energético seguro y eficiente.

Del capítulo de referentes teóricos corresponden a los saberes de la hoja “saberes” de la estructura de desglose de trabajo de grado.

Figura 1 *Sistemas eléctricos de transmisión de potencia.*



Nota: Adaptado de Sistema Eléctrico de Potencia: ¿Qué es y cuáles son las etapas?, por Tecnología Eléctrica, 2024 (https://blogspot.com).cc-by.

También puede haber datos históricos importantes sobre los conceptos teóricos del saber. Las referencias cruzadas se utilizan como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra su utilización.

4.2 Redes monofásicas, trifásicas y de corriente directa.

Las redes eléctricas se estructuran en distintos esquemas de distribución de energía, según el tipo de cargas a alimentar, el nivel de potencia requerido y el tipo de generación disponible. En el contexto de una microrred, la correcta selección y comprensión de estos tipos de redes es fundamental para asegurar la interconexión adecuada de las fuentes de generación, los nodos de almacenamiento y los sistemas de control.

4.2.1 Redes Monofásicas. Las redes monofásicas están compuestas por dos conductores: una fase y un neutro. Operan generalmente a niveles de baja potencia y son comúnmente utilizadas en instalaciones residenciales y pequeños comercios. La tensión típica en este tipo de red puede variar según la normativa del país, pero en Colombia suele encontrarse en valores de 120 V o 120/240 V.

En una microrred didáctica, el análisis de redes monofásicas permite comprender el suministro básico de energía hacia cargas simples como iluminación, pequeños motores o dispositivos electrónicos. Además, el nodo de almacenamiento debe ser capaz de interactuar con este tipo de carga mediante convertidores DC-AC que aseguren la calidad de la energía, evitando fluctuaciones de tensión y distorsión armónica.

4.2.2 Redes Trifásicas. Las redes trifásicas están compuestas por tres fases alternadas, con un desfase de 120° entre sí. Este esquema permite una transmisión más eficiente de energía, especialmente para cargas industriales o sistemas de mayor potencia, debido a que reduce pérdidas y mejora la estabilidad del flujo energético. La tensión común en distribución trifásica en Colombia se encuentra alrededor de 208 V, 220 V o 440 V, dependiendo del nivel de consumo y la topología de la red.

En el contexto del proyecto, la microrred didáctica puede incorporar generadores trifásicos, inversores y sistemas de compensación, que requieren del nodo de almacenamiento una

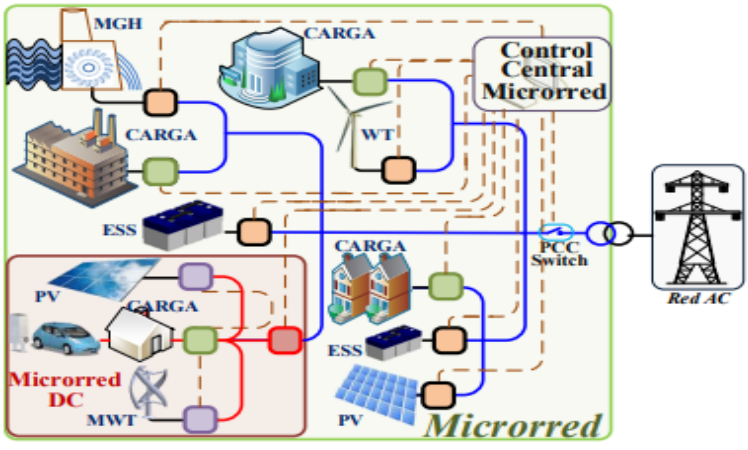
capacidad de equilibrar las fases, absorber picos de demanda y suministrar energía en situaciones de contingencia. El análisis trifásico es fundamental para el diseño del control, ya que permite detectar desbalances, armónicos y variaciones en el factor de potencia.

4.2.3 Redes de Corriente Directa (DC). Las redes de corriente directa están conformadas por dos conductores: positivo y negativo. A diferencia de las redes AC, en estas no existe variación sinusoidal en la tensión o corriente. Se utilizan ampliamente en sistemas de energía renovable y almacenamiento, ya que paneles solares y bancos de baterías operan naturalmente en DC, evitando conversiones innecesarias. Para el proyecto, este tipo de red es esencial, ya que el nodo de almacenamiento funciona en DC, interactuando con baterías, convertidores DC-DC y controladores de carga. Posteriormente, cuando la energía debe ser entregada a una red AC (monofásica o trifásica), se emplean inversores que permiten la integración eficiente del sistema de almacenamiento con el resto de la microrred (Atcitty, 2022).

4.3 Microrredes Eléctricas.

Una microrred es un sistema eléctrico controlado que integra fuentes de generación distribuida, almacenamiento y cargas bajo una infraestructura de gestión.

Figura 2 *Microrred eléctrica.*



Nota: Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2021). Review of energy management system approaches in microgrids. Energies, 14(17), 5459. doi.org

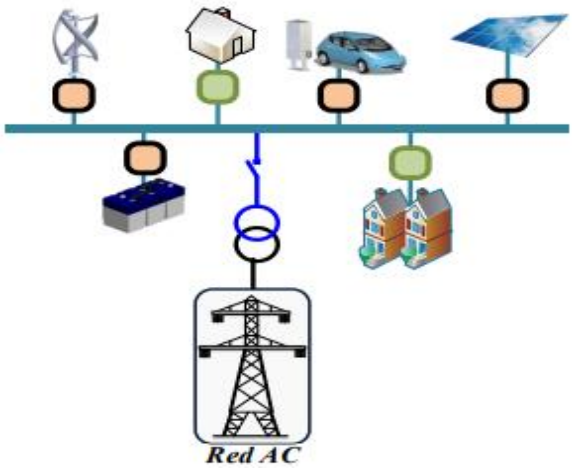
Su principal ventaja radica en la capacidad de operar de manera autónoma (modo isla) o conectada a la red pública.

Esto permite mayor resiliencia ante fallas externas, eficiencia en la gestión energética y aprovechamiento de recursos renovables (Guerra Careaga, 2023), la microrred didáctica se utiliza como entorno de experimentación, permitiendo evaluar el comportamiento real del nodo de almacenamiento sin intervenir la red pública. El nodo desarrollado deberá interactuar con las otras unidades de la microrred (generación fotovoltaica, inversores, cargas y sistema de protección), asegurando estabilidad en la tensión y calidad del suministro.

4.4 La Transición Energética.

Representa un cambio estructural en la forma como se produce, gestiona y distribuye la energía eléctrica, avanzando desde modelos centralizados basados en combustibles fósiles hacia sistemas descentralizados que integran fuentes renovables y tecnologías inteligentes. Este proceso surge como respuesta a la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero, atender la creciente demanda energética y garantizar la sostenibilidad del suministro eléctrico. En este escenario, las Microrredes Eléctricas desempeñan un papel fundamental, al actuar como plataformas que permiten la integración de Recursos Energéticos Distribuidos (DER), especialmente las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), en redes de media y baja tensión. Las microrredes facilitan el flujo bidireccional de energía y la participación de los usuarios, transformándolos en prosumidores, capaces de generar y consumir energía. Además, estas redes contribuyen a disminuir la dependencia de grandes centrales tradicionales, acortando la brecha hacia sistemas eléctricos más flexibles y resilientes. Para garantizar su operación eficiente, las microrredes requieren la implementación de Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS), que compensen la variabilidad propia de las fuentes renovables, y la incorporación de Sistemas de Gestión y Control Energético (MGEMS), encargados de optimizar la coordinación, estabilidad y confiabilidad del suministro. En conjunto, las microrredes actúan como catalizadoras de la transición energética, impulsando la evolución hacia redes inteligentes y sostenibles (Díaz Aldana, Luna Hernández, & Trujillo Rodríguez, 2022).

Figura 3 *Red de energías renovables.*



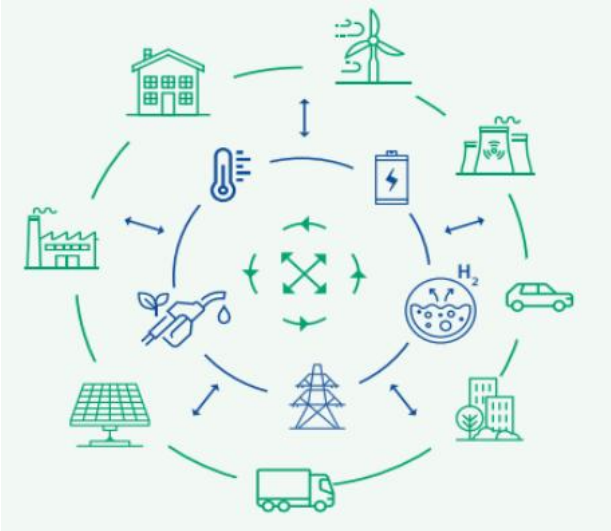
Nota: Adaptado de Review of energy management system approaches in microgrids, por M. F. Zia, E. Elbouchikhi, y M. Benbouzid, 2021, Energies, 14(17), 5459 (https://mdpi.com). CC BY 4.0.

4.5 La digitalización del sistema eléctrico.

Consiste en la incorporación de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), el Big Data y el blockchain para optimizar la generación, distribución y consumo de energía, desempeñando un papel esencial dentro de la transición energética hacia modelos más eficientes, sostenibles y con menores emisiones de carbono. Este proceso responde a la creciente integración de energías renovables, a la necesidad de mejorar la eficiencia energética y al desarrollo de redes eléctricas inteligentes (smart grids) que permiten una gestión más flexible y confiable del sistema. La digitalización no solo mejora el análisis y predicción de la demanda eléctrica mediante IA y Big Data, sino que también facilita el monitoreo y control en tiempo real a través del IoT y la implementación de medidores inteligentes, lo que reduce costos operativos y pérdidas energéticas. Además, tecnologías como blockchain permiten transacciones energéticas descentralizadas y trazables entre usuarios, impulsando la figura del prosumidor. En el contexto de las microrredes, la digitalización habilita el control coordinado de fuentes renovables y sistemas de almacenamiento mediante Sistemas de Gestión de Energía (EMS) y esquemas de control jerárquico, garantizando estabilidad, confiabilidad y operación eficiente. De este modo, la digitalización se convierte en un habilitador clave para la implementación y

funcionamiento óptimo de microrredes sostenibles, inteligentes y adaptadas a las necesidades actuales y futuras de los sistemas eléctricos (Inova, 2024).

Figura 4 *Digitalización del sistema.*



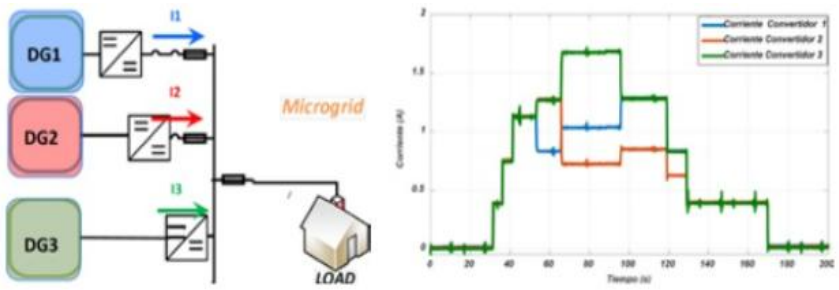
Nota: Adaptado de An EU Strategy for Energy System Integration, por la Comisión Europea, 2020 (europa.eu). En el dominio público.

4.6 La emulación de procesos eléctricos.

En el contexto de las microrredes consiste en la reproducción controlada y en tiempo real del comportamiento de sistemas energéticos y sus componentes, con el fin de diseñar, validar y optimizar algoritmos de control y estrategias de operación antes de su implementación en entornos físicos. Esta metodología es esencial para garantizar una integración eficiente y segura de los recursos energéticos distribuidos, ya que permite analizar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga, generación y perturbaciones, sin incurrir en riesgos o costos elevados. En este marco, la simulación y el modelado mediante herramientas como MATLAB/Simulink desempeñan un papel fundamental, pues permiten representar con precisión el comportamiento dinámico de tecnologías como sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, generadores diésel y baterías de almacenamiento, así como el diseño de esquemas de control en coordenadas dq0. Gracias a estos modelos, es posible ajustar parámetros, prever respuestas del sistema, corregir fallas y optimizar la operación de la microrred. Por tanto, la emulación

constituye un puente crítico entre el diseño teórico y la implementación práctica, asegurando que las estrategias desarrolladas en el proyecto sean confiables, eficientes y compatibles con los requerimientos reales de control, estabilidad y gestión energética (Redondo Martinez, 2020).

Figura 5 *Simulación experimental.*



Nota: Adaptado de Control de reparto de potencia y corriente en inversores paralelos para microrredes isla, por Laboratorio de Simulación de Sistemas de Potencia, 2022. Simulación realizada en MATLAB/Simulink.

4.7 Simulación tipo hardware in the loop (HIL).

Es una herramienta esencial para el desarrollo, análisis y validación de estrategias de control en microrredes eléctricas, permitiendo recrear con precisión el comportamiento dinámico de sistemas energéticos sin la necesidad de contar con todos los equipos físicos. Dentro de este enfoque, se destacan las plataformas Hardware-in-the-Loop (HIL) y Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL). El esquema HIL utiliza simulaciones computacionales de alto desempeño para representar componentes eléctricos y permite la interacción en tiempo real con controladores físicos externos, facilitando un prototipado rápido y seguro; mientras que el esquema PHIL añade la capacidad de intercambiar potencia real, permitiendo emular fuentes como sistemas fotovoltaicos, generadores eólicos y bancos de baterías mediante electrónica de potencia. Estas plataformas posibilitan el estudio de fenómenos como el control del flujo de potencia, la estabilidad del sistema y la respuesta ante fallas, incluyendo estrategias avanzadas como el control droop para la operación de inversores. Asimismo, la emulación permite analizar distintas topologías de microrredes en AC y DC, con configuraciones conectadas a red o en modo isla,

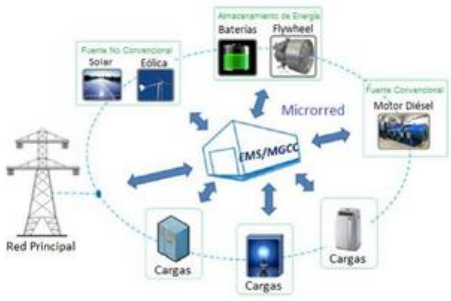
asegurando la repetibilidad y precisión de los resultados. Laboratorios de referencia como los de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, la Universidad Nacional de Colombia, el Instituto Coreano de Electro tecnología y el centro IMDEA Energía han adoptado estas tecnologías, utilizando plataformas como OPAL-RT y RTDS, las cuales permiten ejecutar modelos construidos en MATLAB/Simulink en tiempo real. En el contexto de este proyecto, la emulación resulta estratégica, ya que permite validar el comportamiento del nodo de almacenamiento energético y su control antes de la implementación física, reduciendo riesgos, costos y tiempos de ajuste en el desarrollo del prototipo (Redondo Martinez, 2020).

4.8 La integración de generadores y cargas en una microrred.

Consiste en la coordinación de los recursos energéticos distribuidos y los sistemas de control de potencia para asegurar una operación estable tanto en modo conectado como en isla. En una microrred, se combinan fuentes renovables como sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, pequeñas hidroeléctricas o generación a biogás, junto con sistemas de almacenamiento como bancos de baterías y cargas de distinta naturaleza. El elemento central que permite esta interacción es el inversor, dispositivo de electrónica de potencia que regula el flujo de energía entre las fuentes de generación y las cargas, y cuyo comportamiento depende de la estrategia de control implementada. Este control suele organizarse mediante una jerarquía funcional: el control primario, local a cada inversor, se encarga de mantener el equilibrio potencia–frecuencia y tensión–corriente, siendo el control droop la técnica más empleada por su capacidad de repartir carga sin necesidad de comunicaciones; el control secundario corrige desviaciones para restablecer los valores nominales de operación, mejorando la calidad de la energía; y el control terciario optimiza el intercambio energético con la red principal a través de un Sistema de Gestión de Energía (EMS). Dependiendo de su función, los inversores pueden operar como grid-forming, actuando como fuente de tensión para establecer la referencia de frecuencia y amplitud, o como grid-feeding, inyectando potencia activa y reactiva siguiendo una referencia externa. Sin embargo, este proceso implica desafíos de estabilidad, ya que el comportamiento dinámico depende de la composición de la matriz de generación: microrredes con alta penetración de máquinas síncronas (como generadores diésel) tienden a ser más robustas, mientras que aquellas dominadas por inversores requieren estrategias de control avanzadas para garantizar confiabilidad

y respuesta transitoria adecuada. En el contexto del proyecto, este marco de integración es fundamental para definir el rol del nodo de almacenamiento, su forma de control y la manera en que interactuará con el resto de la microrred didáctica (Redondo Martinez, 2020).

Figura 6 *Estructura de una Microrred.*



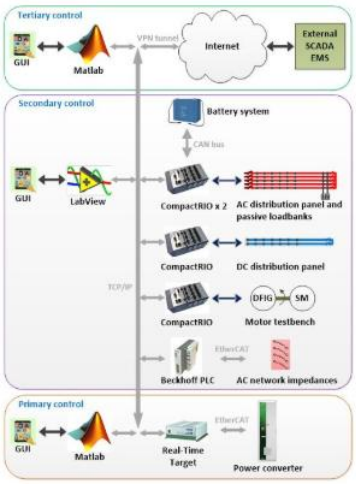
Nota: Adaptado de Microgrid supervisory controllers and energy management systems, por ScienceDirect, 2016 (ScienceDirect).

4.9 Internet de las cosas y control supervisor.

La digitalización del sector energético ha transformado la manera en que se gestionan, controlan y optimizan los sistemas eléctricos, permitiendo una interacción más eficiente entre los recursos de generación, la infraestructura de distribución y los usuarios finales. En este proceso, el Internet de las Cosas (IoT) desempeña un papel central, ya que permite monitorear variables eléctricas en tiempo real, automatizar procesos y aplicar estrategias de mantenimiento predictivo que aumentan la confiabilidad y reducen costos operativos. Estas capacidades resultan fundamentales en el desarrollo y operación de microrredes, donde la coordinación y el equilibrio energético requieren sistemas inteligentes de supervisión. En este marco surge el Control Supervisor o Sistema de Gestión de Energía (EMS), ubicado en el nivel superior de la arquitectura de control, encargado de regular el flujo de potencia, optimizar el despacho de recursos distribuidos y minimizar el costo de operación. La integración del IoT dentro del EMS permite una toma de decisiones más precisa y adaptativa, ya que los dispositivos conectados suministran información continua para ajustar la operación en función de la demanda, los costos o la disponibilidad energética. Además, en escenarios con múltiples microrredes interconectadas, se han desarrollado enfoques de control distribuido y esquemas de optimización en doble nivel

que permiten coordinar la operación local de cada microrred con los objetivos globales del sistema de distribución, promoviendo la flexibilidad, la escalabilidad y la operación eficiente en tiempo real (Diaz Aldana & Cortes Guerrero , 2024).

Figura 7 *Control Supervisor.*



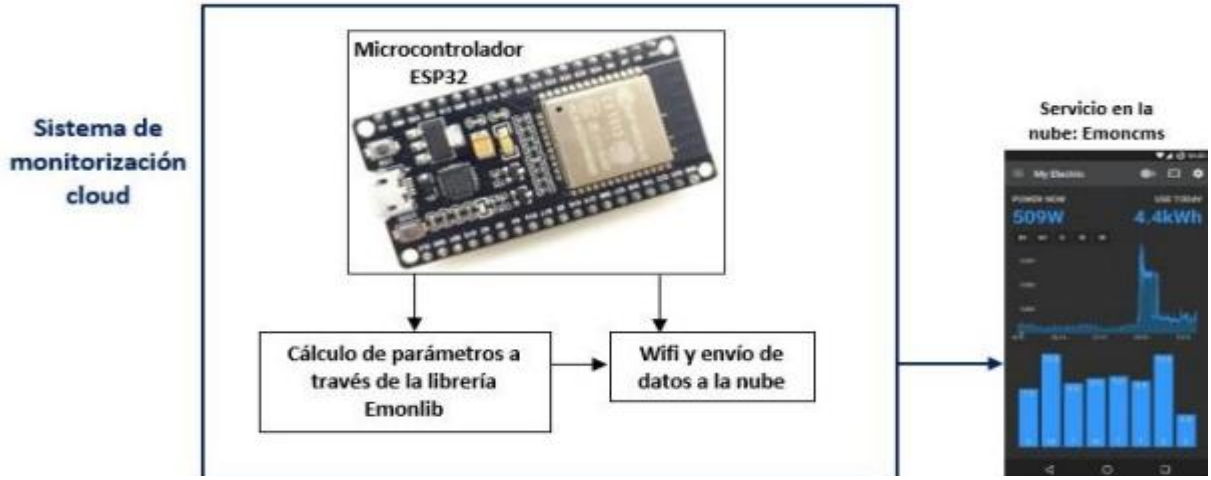
Nota: Adaptado de A laboratory environment for real-time testing of energy management scenarios: Smart Energy Integration Lab (SEIL), por ResearchGate, 2015. Copyright 2015 por el Instituto IMDEA Energía.

4.10 Módulos ESP32 aplicado a los procesos eléctrico

El módulo ESP32 desempeña un papel fundamental en la modernización y supervisión de procesos eléctricos dentro de microrredes, gracias a su capacidad de procesamiento integrado, su soporte para múltiples interfaces de comunicación y su conectividad inalámbrica mediante Wifi y Bluetooth. Este dispositivo permite la adquisición en tiempo real de variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y factor de carga, mediante la integración de sensores y convertidores analógicos-digitales, posibilitando la generación de registros continuos de operación y la detección temprana de variaciones críticas. Asimismo, al soportar protocolos de comunicación orientados al Internet de las Cosas (IoT) como MQTT, CoAP o Modbus TCP, el ESP32 facilita la interacción directa con plataformas de Control Supervisor o Sistemas de Gestión de Energía (EMS), permitiendo ejecutar estrategias de control distribuido, despacho óptimo y balance

dinámico entre fuentes de generación y cargas. Su versatilidad lo convierte en una herramienta esencial para implementar automatización, mantenimiento predictivo y monitoreo remoto dentro de entornos eléctricos experimentales y reales. En el marco del presente proyecto, el uso del ESP32 permite construir una solución funcional de supervisión y control para la microrred propuesta, soportando la visualización, el análisis y la gestión inteligente de los flujos de energía, contribuyendo así al cumplimiento del objetivo de desarrollar un sistema que optimice la operación eléctrica mediante digitalización, control descentralizado y emulación práctica de escenarios energéticos (Garcia Maestre, 2022).

Figura 8 *Microcontrolador ESP32.*



Nota: Adaptado de OpenEnergyMonitor documentation and Emoncms applications, por OpenEnergyMonitor, 2021. El sistema integra el procesamiento de señales eléctricas de corriente alterna usando la librería EmonLib en el nodo ESP32 y la posterior visualización de consumo en tiempo real a través de la plataforma en la nube Emoncms.

4.11 Los inversores electrónicos de voltaje.

Son componentes esenciales en los sistemas de energía solar fotovoltaica, ya que permiten transformar la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es el tipo de energía utilizada por la mayoría de los dispositivos eléctricos y por la red de distribución. Su función no solo se limita a la conversión eléctrica, sino que también gestionan la

calidad, estabilidad y eficiencia del suministro energético, actuando como el núcleo de control del sistema. De acuerdo con su aplicación, pueden clasificarse en inversores de interconexión con la red, inversores cargadores para sistemas aislados, e inversores híbridos que combinan ambas funciones, con variantes monofásicas o trifásicas según el tipo de instalación. Una característica clave es la forma de onda de salida, siendo la onda sinusoidal pura la más adecuada para garantizar un funcionamiento estable y seguro, a diferencia de las ondas modificadas que pueden generar pérdidas y fallas en motores y equipos electrónicos. Entre los parámetros técnicos relevantes destacan la potencia nominal, la capacidad de potencia pico para arranques, el tipo de controlador incorporado (siendo el MPPT el más eficiente), el sistema de monitoreo y las protecciones integradas. La eficiencia del inversor determina la proporción de energía que se convierte efectivamente en energía útil, y por tanto influye directamente en el rendimiento y viabilidad económica del sistema.

Figura 9 *Inversores Electrónicos.*



Nota: Adaptado de STGIB15CH60TS-L Datasheet, por STMicroelectronics, 2021 (STMicroelectronics). Vista tridimensional del encapsulado completamente aislado diseñado para el control de motores y etapas de potencia en corriente alterna.

En cuanto a topologías avanzadas, los inversores tipo Cuasi Fuente de Impedancia (QZSI) se destacan por su capacidad de elevar e invertir el voltaje en una sola etapa, lo que los hace más eficientes y versátiles en condiciones variables de irradiación solar, mostrando mejor desempeño

cuando se emplean MOSFET en lugar de IGBT, especialmente en aplicaciones de baja potencia como micro inversores (Solar, 2021).

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El presente trabajo corresponde a un proyecto de desarrollo experimental, cuyo propósito es el diseño, construcción y validación de un prototipo funcional de un nodo de almacenamiento de energía, integrando tecnologías IoT–SCADA aplicadas a una microrred eléctrica didáctica.

El carácter experimental del proyecto radica en la aplicación de conocimientos teóricos en áreas como sistemas eléctricos de potencia, electrónica de potencia y control automático, con el fin de desarrollar una solución tecnológica original. Su funcionalidad se valida mediante pruebas en condiciones reales de operación.

A diferencia de una investigación puramente teórica, este trabajo se enfoca en la implementación práctica y verificación de un sistema, generando un aporte tangible a la infraestructura de investigación de la institución.

5.2 Método

La metodología del proyecto se estructura en tres fases principales: análisis y modelado del sistema, diseño e implementación del prototipo, y validación experimental.

5.2.1 Fase 1: Análisis y modelado del sistema.

En esta fase se analiza el comportamiento del nodo de almacenamiento de energía y se establecen los parámetros técnicos necesarios para su posterior implementación.

En primer lugar, se realiza el levantamiento de la información técnica de la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo. En esta etapa se recopilan datos como tensiones nominales, niveles de potencia, topología de la red, tipos de carga y fuentes de generación renovable. Asimismo, se identifican los puntos de conexión más adecuados para la integración del nodo de almacenamiento, considerando criterios de seguridad eléctrica y estabilidad operativa.

Posteriormente, se lleva a cabo la caracterización del sistema de almacenamiento, donde se define la tecnología de batería más apropiada, su capacidad nominal, niveles de voltaje, corriente

máxima y parámetros eléctricos relevantes. De igual forma, se establecen las variables de control a monitorear, tales como corriente, voltaje, temperatura y estado de carga (SoC), las cuales constituyen la base para el desarrollo del modelo de simulación.

A continuación, se desarrolla el modelo del sistema en la plataforma MATLAB/Simulink, en el cual se representa el comportamiento eléctrico del almacenamiento, incluyendo el convertidor DC/DC y las estrategias básicas de control de carga y descarga.

Este modelo permite evaluar la respuesta dinámica del sistema frente a variaciones en la demanda y en la generación, mediante la simulación de diferentes escenarios de operación.

Finalmente, se realiza el análisis y ajuste del modelo, comparando los resultados obtenidos en las simulaciones y ajustando los parámetros eléctricos y de control que requieran optimización. Este proceso garantiza que el modelo teórico represente adecuadamente el comportamiento real del sistema y sirva como base para el diseño del prototipo físico.

5.2.2 Fase 2: Diseño e implementación del sistema.

Esta fase tiene como propósito construir e integrar el nodo de almacenamiento de energía utilizando componentes electrónicos, autómatas programables y sistemas de supervisión IoT–SCADA, asegurando su correcta operación dentro de la microrred didáctica.

En primer lugar, se desarrolla la selección y adquisición de los componentes, proceso que implica la elección de baterías, convertidores DC/DC, sensores de corriente y voltaje, módulos de comunicación, relés de protección y controladores lógicos programables (PLC o microcontroladores).

En esta etapa se analizan las especificaciones técnicas de cada componente para garantizar su compatibilidad con los niveles de tensión, potencia y control definidos en la simulación.

Posteriormente, se ejecuta la actividad de diseño eléctrico y estructural, en la cual se elaboran los esquemas de conexión, los diagramas unifilares y de control, además del diseño físico del gabinete o tablero que alojará el sistema.

También se determinan los dispositivos de protección eléctrica necesarios (fusibles, disyuntores, diodos de bloqueo, etc.), asegurando el cumplimiento de los lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

La siguiente actividad corresponde a la programación y configuración del sistema de control, donde se implementan las rutinas lógicas que permiten la gestión automática del proceso de carga y descarga del nodo.

En este punto se establecen las condiciones de supervisión, los umbrales de alarma y la comunicación con la plataforma IoT–SCADA, que servirá para la visualización en tiempo real de las variables eléctricas y la transmisión de datos hacia una base central de monitoreo.

Finalmente, se realiza la actividad de montaje e integración del prototipo, que comprende el ensamblaje de los componentes sobre la estructura física, la conexión de sensores, módulos de potencia y dispositivos de control, así como la verificación del funcionamiento del sistema completo.

Se comprueba la comunicación entre el hardware y el entorno SCADA, garantizando que las lecturas, comandos y registros funcionen correctamente antes de las pruebas finales.

5.2.3 Fase 3: Validación experimental.

En esta fase se evalúa el desempeño del nodo de almacenamiento mediante pruebas experimentales, comparando los resultados obtenidos con los valores previamente simulados.

En primer lugar, se diseña el protocolo de pruebas, definiendo los escenarios experimentales, las variables de medición (voltaje, corriente, potencia, temperatura y estado de carga), los intervalos de registro y los instrumentos de medición a emplear.

Esta etapa permite garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados.

Posteriormente, se ejecutan las pruebas experimentales, sometiendo el sistema a diferentes condiciones de carga y descarga.

Durante estas pruebas, se utiliza la plataforma SCADA para monitorear en tiempo real las variables del sistema y registrar su comportamiento ante variaciones en la demanda y condiciones operativas.

A continuación, se realiza el análisis comparativo de los resultados, donde los datos experimentales se contrastan con los obtenidos en la simulación.

Este análisis permite evaluar la correlación entre ambos escenarios, determinar la eficiencia del sistema e identificar posibles desviaciones en el proceso de almacenamiento y conversión de energía.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1 Fuentes primarias.

Sensores eléctricos de corriente y tensión permiten registrar en tiempo real los valores de corriente y voltaje en el sistema de almacenamiento, tanto durante la carga como en la descarga, suministrando datos fundamentales para validar el comportamiento energético del nodo.

El Sistema SCADA o plataforma IoT se utilizará como instrumento de adquisición y registro de variables eléctricas voltaje, corriente, potencia, temperatura, estado de carga de la batería. Estos datos servirán para comparar el desempeño real frente al modelo simulado.

Software de simulación MATLAB/Simulink herramienta principal para generar información técnica del modelo teórico del nodo. Los datos obtenidos (curvas de tensión, potencia, eficiencia, etc.) serán considerados como información experimental simulada, que luego se contrastará con los resultados reales.

Equipos de medición eléctrica de laboratorio (multímetro, pinza amperimétrica, osciloscopio, analizador de potencia permiten verificar experimentalmente las condiciones eléctricas del prototipo, validando magnitudes y comportamiento ante distintos escenarios operativos.

Bitácora de pruebas y registro de laboratorio documento físico o digital donde se consignan las observaciones, configuraciones de ensayo, resultados parciales y condiciones de prueba. Este instrumento garantiza la trazabilidad de los datos obtenidos.

5.3.2 Fuentes secundarias.

Revisión bibliográfica y documental consulta de artículos científicos, libros, tesis y publicaciones especializadas sobre almacenamiento de energía, microrredes eléctricas, sistemas SCADA, control de potencia y gestión energética inteligente.

Normas y estándares técnicos documentos de referencia como RETIE, IEC 61850 (comunicaciones en sistemas eléctricos), IEEE Std 1547 (interconexión de fuentes distribuidas) e

IEEE Std 2030 (arquitectura de redes inteligentes), que orientan los criterios de diseño y seguridad.

Fichas técnicas y manuales de componentes información proporcionada por los fabricantes sobre las especificaciones eléctricas y operativas de los dispositivos empleados (baterías, convertidores, sensores, PLCs, módulos IoT), fundamental para el diseño y dimensionamiento.

Documentación institucional y reportes del laboratorio de microrredes registros técnicos de la infraestructura existente en la Institución Universitaria Pascual Bravo, esquemas eléctricos, configuraciones de control y parámetros de operación que servirán como base para la integración del nodo al sistema real.

6. Resultados

6.1 Levantamiento de información técnica de la microrred.

Como punto de partida para el desarrollo del proyecto, se realizó el levantamiento de la información técnica de la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, con el fin de identificar sus características eléctricas, topología de operación y condiciones de integración del nodo de almacenamiento.

Durante esta etapa se recopilaron los principales parámetros del sistema, entre los cuales se destacan los niveles de tensión de operación, definidos en 24 V en corriente continua (DC), y 120 V y 240 V en corriente alterna (AC). Asimismo, se identificaron los niveles de potencia manejados por la microrred, así como la configuración de la red, la cual presenta una estructura radial con diferentes nodos de conexión.

Adicionalmente, se realizó la caracterización de las cargas presentes en el sistema, clasificándolas en resistivas, inductivas y mixtas, lo cual permite comprender el comportamiento dinámico de la demanda energética. También se identificaron las fuentes de generación existentes, principalmente sistemas de energía renovable, que introducen variabilidad en la producción eléctrica.

A partir de esta información, se determinaron los puntos de conexión más adecuados para la integración del nodo de almacenamiento de energía, considerando criterios de estabilidad del sistema, calidad de energía y seguridad eléctrica. Este análisis permitió establecer las bases técnicas necesarias para el diseño del sistema de almacenamiento y su posterior implementación dentro de la microrred.

6.1.1 Arquitectura de la microrred con nodo de almacenamiento.

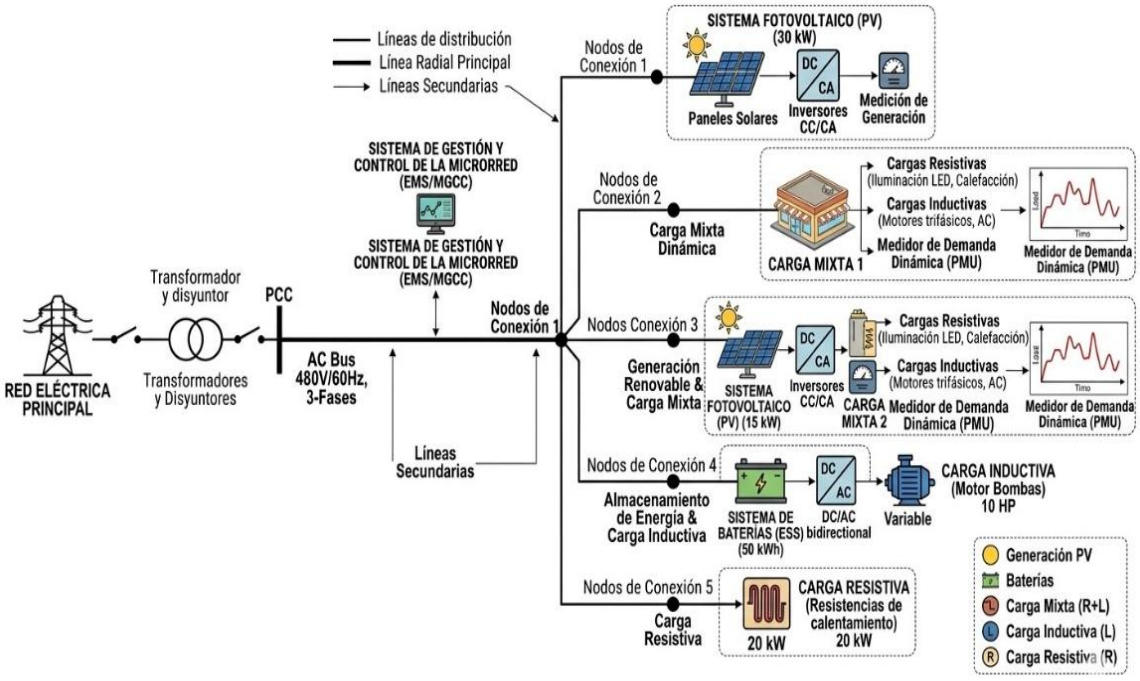
La microrred didáctica, una vez integrado el nodo de almacenamiento de energía, presenta una arquitectura basada en la generación distribuida, el almacenamiento energético y la gestión inteligente de la energía.

El sistema opera en múltiples niveles de tensión, definidos en 24 V en corriente continua (DC), así como en 120 V y 240 V en corriente alterna (AC), permitiendo la integración de diferentes tipos de cargas y fuentes de generación. Esta configuración posibilita el

funcionamiento en esquemas monofásicos, bifásicos y trifásicos, según los requerimientos del sistema.

La topología de la microrred corresponde a una estructura radial con múltiples nodos de conexión, en los cuales se integran fuentes de generación renovable, como sistemas fotovoltaicos, junto con cargas de naturaleza resistiva, inductiva y mixta. Esta diversidad de cargas introduce un comportamiento dinámico en la demanda energética.

Figura 10 *Topología de la Microrred.*



Fuente. Propia

El nodo de almacenamiento de energía, basado en un sistema de baterías, se encuentra conectado en puntos estratégicos de la microrred previamente identificados durante la etapa de caracterización. Estos puntos corresponden a zonas donde se presentan mayores variaciones de tensión y demanda, lo que permite al sistema de almacenamiento intervenir directamente en la regulación del flujo energético.

El sistema de almacenamiento cumple funciones fundamentales dentro de la microrred, tales como la compensación de picos de carga, el almacenamiento de excedentes de energía generada y

el suministro de respaldo en condiciones de falla. Esto contribuye a mejorar la estabilidad, eficiencia y confiabilidad del sistema.

Adicionalmente, la microrred puede operar tanto en modo conectado a la red principal como en modo aislado (isla). En el modo conectado, se permite el intercambio bidireccional de energía con la red externa, optimizando el consumo energético. En modo isla, el sistema garantiza el suministro continuo a cargas críticas, incrementando la resiliencia ante interrupciones del servicio.

Finalmente, se integra un sistema de monitoreo y control basado en tecnologías IoT–SCADA, el cual permite supervisar en tiempo real variables como voltaje, corriente, potencia y estado del sistema, facilitando la toma de decisiones operativas y la implementación de estrategias de gestión energética.

6.2 Caracterización del sistema de almacenamiento de energía.

La caracterización del sistema de almacenamiento constituye una etapa fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que permite definir el comportamiento eléctrico y térmico de las baterías utilizadas, así como establecer los parámetros necesarios para su modelado, simulación e implementación.

Para este propósito, se empleó un modelo de circuito equivalente de primer orden tipo Thevenin, el cual permite representar de manera adecuada la dinámica de carga y descarga de las baterías, incluyendo efectos de polarización y pérdidas internas.

Este modelo fue aplicado a dos tecnologías de almacenamiento: baterías de ion-litio y baterías de plomo-ácido, con el fin de comparar su desempeño bajo condiciones operativas equivalentes.

6.2.1 Variables del modelo.

El modelo considera las siguientes variables.

Vt: Voltaje en los terminales (lo que mides con un multímetro).

Voc: Voltaje de Circuito Abierto (Voltaje interno ideal dependiendo de la carga).

I: Corriente (Positiva para descarga, Negativa para carga).

SoC: Estado de Carga (0% a 100%).

t: Temperatura de la batería.

6.2.2 Modelo Dinámica del Estado de Carga (SoC).

El estado de carga se determinó mediante el método de conteo de Coulomb, el cual se expresa como

$$SoC(t) = SoC_0 - \frac{1}{Q_{nom} \cdot 3600} \int_0^t I(\tau)\, d\tau$$

Donde:

Q_{nom} es la capacidad en Amperios-hora (10 Ah).

SoC: Estado de carga inicial (100%).

I: Corriente de descarga (positiva) o carga (negativa)

6.2.3 Modelo Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}).

Voltaje de circuito abierto depende del estado de carga y presenta un comportamiento no lineal. Para su modelado, se empleó una aproximación polinómica diferente para cada tecnología de batería.

$$V_{oc}(SoC) = V_{nom} \cdot (K_0 + K_1 \cdot SoC + K_2 \cdot SoC^2 + \cdots)$$

6.2.4 Modelo Voltaje en los Terminales (V_t)

El voltaje en los terminales se calcula considerando las pérdidas internas del sistema:

$$V_t = V_{oc}(SoC) - I \cdot R_0 - V_{rc}$$

Donde:

R_0: Resistencia óhmica interna (pérdidas inmediatas).

V_{rc}: Voltaje en el circuito RC (polarización, efectos transitorios).

6.2.5 Modelo Dinámica de Polarización (V_{rc})

El efecto de polarización se modela mediante un circuito RC, cuya dinámica está dada por:

$$\frac{dV_{rc}}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_{rc} + \frac{1}{C_1} I$$

6.2.6 Modelo Térmico

El comportamiento térmico de la batería se modeló mediante un balance energético simplificado, considerando la generación de calor por efecto Joule (I^2R_0) y la disipación hacia el ambiente:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_p}(I^2 \cdot R_0 - h \cdot A \cdot (T - T_{amb}))$$

I^2R_0: Calor generado.

Enfriamiento hacia el ambiente.

6.2.7 Parámetros del sistema.

Se evaluaron dos tecnologías de baterías con especificaciones nominales idénticas para permitir una comparación justa.

Especificaciones Comunes:

Voltaje nominal: 24 V

Capacidad nominal: 10 Ah

Corriente de operación: 2-16 A (perfil variable)

Temperatura ambiente: 25°C

6.2.8 Parámetros eléctricos por tecnología.

La tabla expone una comparación técnica entre dos tipos de baterías: Ion Litio y Plomo Ácido, mostrando parámetros eléctricos y físicos relevantes para evaluar su desempeño en aplicaciones energéticas.

Los valores incluyen resistencia interna, resistencia y capacidad de polarización, exponente de Peukert y masa, lo que permite establecer diferencias claras en eficiencia, comportamiento dinámico y características constructivas de cada tecnología, con respecto a las baterías que se han de analizar.

En cuanto a los parámetros eléctricos, la batería de Ion Litio presenta una resistencia interna de 0.05 Ω y una resistencia de polarización de 0.02 Ω, mientras que la de Plomo Ácido muestra valores mayores de 0.15 Ω y 0.05 Ω respectivamente.

Tabla 1 *Datos de baterías.*

Parámetro	Ion Litio	Plomo Ácido
Resistencia Interna(R_0)	0.05 Ω	0.15 Ω
Resistencia Polarización(R_1)	0.02 Ω	0.05 Ω
Capacidad Polarización(C_1)	5000 F	2000 F
Exponente de Peukert	1.05	1.25
Masa	1.5 Kg	3.0 Kg

Fuente. Propia

La capacidad de polarización también es superior en Ion Litio con 5000 F frente a los 2000 F del Plomo Ácido. El exponente de Peukert se mantiene cercano a 1 en Ion Litio (1.05), lo que indica estabilidad en la capacidad útil, mientras que en Plomo Ácido es de 1.25, reflejando una mayor pérdida de capacidad a altas corrientes. Finalmente, la masa de la batería de Ion Litio es de 1.5 kg, significativamente menor que los 3.0 kg de la batería de Plomo Ácido.

La comparación evidencia que las baterías de Ion Litio ofrecen un rendimiento superior en términos de eficiencia y estabilidad, gracias a sus menores resistencias y mayor capacidad de polarización, lo que reduce pérdidas y mejora la respuesta ante variaciones de carga. El exponente de Peukert cercano a 1 confirma que mantienen su capacidad útil incluso bajo altas demandas de corriente, mientras que las de Plomo Ácido muestran una caída más pronunciada. Además, la menor masa de las baterías de Ion Litio las hace más adecuadas para aplicaciones portátiles y de movilidad eléctrica. En conjunto, estos factores posicionan a la tecnología de Ion Litio como más eficiente y versátil, aunque las baterías de Plomo Ácido siguen siendo una alternativa robusta y económica en sistemas estacionarios.

6.3 Desarrollo del modelo de simulación.

El modelo desarrollado en MATLAB/Simulink replica el comportamiento de dos tecnologías de baterías de 24 V y 10 Ah, Ion Litio y Plomo Ácido, respetando en todo lo posible un perfil de corriente variable entre 2 A y 16 A durante una hora de funcionamiento. La simulación tiene en cuenta los parámetros eléctricos, térmicos y dinámicos, las resistencias internas, la polarización,

la capacidad de polarización, el exponente de Peukert y la masa con el objetivo de contrastar el comportamiento de ambas químicas desde el punto de vista de las cargas y descargas realistas.

Figura 11 *Código de la Simulación.*

```
%% SIMULACIÓN DE CARGA Y DESCARGA DE BATERÍAS (24V, 10Ah)
% Compatible con lógica de Simscape Battery

clear; clc; close all;

%% 1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL SISTEMA
% Configuración General
dt = 1;                 % Paso de tiempo en segundos
t_final = 3600;         % Duración de la simulación (1 hora)
tiempo = 0:dt:t_final;  % Vector de tiempo
n = length(tiempo);     % Número de pasos

% Perfil de Corriente (Descarga variable entre 2A y 16A)
% Simulamos una demanda que sube y baja
I_perfil = 5 + 5*sin(2*pi*tiempo/1000) + 6*(tiempo>1000 & tiempo<2000);
I_perfil = max(2, min(16, I_perfil)); % Limitar entre 2A y 16A

% Parámetros Comunes
V_nom = 24;         % Voltaje Nominal del Pack
Q_nom = 10;         % Capacidad Nominal (Ah)
T_amb = 25;         % Temperatura Ambiente (°C)

%% 2. PARÁMETROS ESPECÍFICOS POR QUÍMICA
% --- BATERÍA 1: ION-LITIO (7S o 8S aprox) ---
bat_li.R0 = 0.05;       % Resistencia interna baja (Ohms)
bat_li.R1 = 0.02;       % Resistencia polarización
bat_li.C1 = 5000;       % Capacidad polarización (Farads)
bat_li.K_ocv = [21, 29.4]; % Rango Voltaje Min-Max (Pack 24V)
bat_li.m = 1.5;         % Masa (kg) para térmica
bat_li.Cp = 900;        % Calor específico
bat_li.Peukert = 1.05;  % Exponente de Peukert (Casi ideal)

% --- BATERÍA 2: PLOMO-ÁCIDO (12 celdas) ---
bat_la.R0 = 0.15;       % Resistencia interna alta (Ohms)
bat_la.R1 = 0.05;
bat_la.C1 = 2000;
bat_la.K_ocv = [21, 28.8]; % Rango Voltaje Min-Max
bat_la.m = 3.0;         % Masa (Kg) Más pesada
bat_la.Cp = 800;
bat_la.Peukert = 1.25;  % Muy sensible a corriente alta (Ley de Peukert)

```

```
%% 3. INICIALIZACIÓN DE VARIABLES DE ESTADO
% Estructuras para guardar resultados
res_li.V_t = zeros(1,n); res_li.SoC = zeros(1,n); res_li.Temp = zeros(1,n);
res_la.V_t = zeros(1,n); res_la.SoC = zeros(1,n); res_la.Temp = zeros(1,n);

% Condiciones Iniciales
SoC_0 = 1.0;    % 100% cargada
T_0 = 25;       % 25°C
Vrc_0 = 0;      % Voltaje RC inicial

% Aplicar a ambas
S_li = struct('SoC', SoC_0, 'T', T_0, 'Vrc', Vrc_0);
S_la = struct('SoC', SoC_0, 'T', T_0, 'Vrc', Vrc_0);

%% 4. BUCLE DE SIMULACIÓN (CORAZÓN DEL MODELO)
for k = 1:n
    I = I_perfil(k); % Corriente actual

    %% --- CÁLCULO PARA LITIO ---
    % 1. Capacidad efectiva (Ley de Peukert simplificada)
    Q_eff_li = Q_nom * (10 / (I + 0.1))^(bat_li.Peukert - 1);

    % 2. Actualizar SoC (Integración de Euler)
    % dSoC = -I / (Q * 3600) * dt
    delta_SoC_li = -(I / (Q_eff_li * 3600)) * dt;
    S_li.SoC = S_li.SoC + delta_SoC_li;
    S_li.SoC = max(0, min(1, S_li.SoC)); % Limitar entre 0 y 1

    % 3. Voltaje Circuito Abierto (OCV) Linealizado para el ejemplo
    % En Simscape esto es una tabla Look-Up
    V_oc_li = interp1([0, 1], bat_li.K_ocv, S_li.SoC);

    % 4. Dinámica RC (Polarización)
    dVrc_li = (-S_li.Vrc / (bat_li.R1 * bat_li.C1) + I / bat_li.C1) * dt;
    S_li.Vrc = S_li.Vrc + dVrc_li;

    % 5. Voltaje Terminal
    res_li.V_t(k) = V_oc_li - (I * bat_li.R0) - S_li.Vrc;

    % 6. Temperatura (Modelo Térmico Simplificado)
    P_loss_li = (I^2) * bat_li.R0; % Potencia perdida en calor
    dT_li = (1/(bat_li.m * bat_li.Cp)) * (P_loss_li - 0.5*(S_li.T - T_amb)) * dt;
    S_li.T = S_li.T + dT_li;
    res_li.Temp(k) = S_li.T;
    res_li.SoC(k) = S_li.SoC * 100; % Guardar en %
```

```
        %% --- CÁLCULO PARA PLOMO-ÁCIDO ---
        % 1. Capacidad efectiva (Peukert más agresivo)
        Q_eff_la = Q_nom * (10 / (I + 0.1))^(bat_la.Peukert - 1);

        % 2. Actualizar SoC
        delta_SoC_la = -(I / (Q_eff_la * 3600)) * dt;
        S_la.SoC = S_la.SoC + delta_SoC_la;
        S_la.SoC = max(0, min(1, S_la.SoC));

        % 3. Voltaje OCV (Curva más pronunciada en plomo-ácido)
        V_oc_la = interp1([0, 1], bat_la.K_ocv, S_la.SoC);

        % 4. Dinámica RC
        dVrc_la = (-S_la.Vrc / (bat_la.R1 * bat_la.C1) + I / bat_la.C1) * dt;
        S_la.Vrc = S_la.Vrc + dVrc_la;

        % 5. Voltaje Terminal
        res_la.V_t(k) = V_oc_la - (I * bat_la.R0) - S_la.Vrc;

        % 6. Temperatura
        P_loss_la = (I^2) * bat_la.R0;
        dT_la = (1/(bat_la.m * bat_la.Cp)) * (P_loss_la - 0.5*(S_la.T - T_amb)) * dt;
        S_la.T = S_la.T + dT_la;
        res_la.Temp(k) = S_la.T;
        res_la.SoC(k) = S_la.SoC * 100;
    end

    %% 5. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS
    figure('Name', 'Comparativa de Baterías 24V 10Ah', 'Color', 'w');

    subplot(3,1,1);
    plot(tiempo/60, res_li.V_t, 'b', 'LineWidth', 2); hold on;
    plot(tiempo/60, res_la.V_t, 'r', 'LineWidth', 2);
    ylabel('Voltaje (V)');
    title('Voltaje en Terminales durante Descarga');
    legend('Ion-Litio', 'Plomo-Ácido');
    grid on;

    subplot(3,1,2);
    plot(tiempo/60, res_li.SoC, 'b', 'LineWidth', 2); hold on;
    plot(tiempo/60, res_la.SoC, 'r', 'LineWidth', 2);
    ylabel('SoC (%)');
    title('Estado de Carga (SoC)');
    legend('Ion-Litio', 'Plomo-Ácido');
    grid on;

    subplot(3,1,3);
    plot(tiempo/60, I_perfil, 'k--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
    plot(tiempo/60, res_li.Temp, 'b', 'LineWidth', 2);
    plot(tiempo/60, res_la.Temp, 'r', 'LineWidth', 2);
    ylabel('Temp (°C) / Corr (A)');
    title('Temperatura y Perfil de Corriente');
    legend('Corriente', 'Temp Litio', 'Temp Plomo');
    grid on;
    xlabel('Tiempo (minutos)');
```

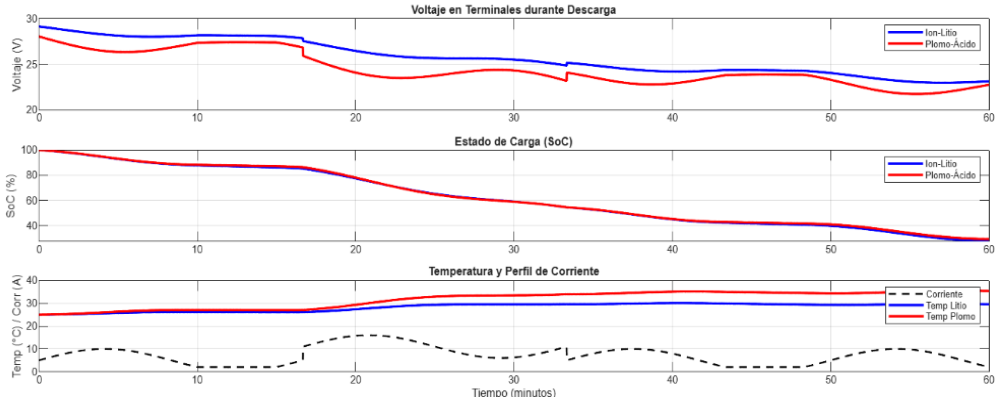
Nota: Adaptado de un script de simulación de sistemas de almacenamiento de energía en MATLAB, 2026. Rutina gráfica estructurada mediante comandos de subdivisión de ventanas (subplot) para representar variables de descarga temporalizadas en minutos.

Los resultados de la simulación indican que la batería de Ion Litio obtiene un voltaje más estable y un estado de carga más uniforme para demandas variables debido a su baja resistencia interna y su exponente de Peukert cercado a 1. Esto se traduce en mayor eficiencia energética y menor degradación ante altas corrientes. Por otro lado, su menor masa favorece aplicaciones móviles y portátiles. La batería de Plomo Ácido, por el contrario, manifiesta caídas de voltaje más pronunciadas y una acelerada reducción del SoC cuando se incrementa la corriente, confirmando su menor rendimiento dinámico y generación de calor. En conclusión, la tecnología de Ion Litio ofrece ventajas evidentes en capacidad, estabilidad energética y rendimiento estático a favor del almacenamiento de energía, mientras que la de Plomo Ácido incluso continúa conservando su utilidad en aplicaciones estacionarias donde el factor de robustez y coste son principales.

6.4 Análisis de Resultados y Selección de Tecnología.

La figura 11 muestra los resultados de la simulación de descarga para dos tipos de baterías — Ion Litio y Plomo Ácido— en un sistema de 24 V y 10 Ah. Se comparan tres variables principales: voltaje en terminales, estado de carga (SoC) y temperatura frente al perfil de corriente aplicado durante una hora de operación.

Figura 12 *Graficas de la simulación.*



Nota: Adaptado de resultados de simulación en MATLAB/Simulink, 2026. Gráficas obtenidas a partir de los modelos dinámicos de descarga para celdas de Ion-Litio (línea azul) y Plomo-Ácido (línea roja) expuestas a un ciclo de trabajo de 60 minutos.

El objetivo es observar el comportamiento dinámico y térmico de ambas tecnologías bajo condiciones de demanda variable, evaluando su estabilidad y eficiencia energética.

En el primer gráfico se observa que el voltaje terminal de ambas baterías decrece en el tiempo, siendo el Ion Litio el que mantiene valores más elevados y constantes, rondando entre 29 V y 23 V, el plomo ácido cae más rápido hasta un valor cercano a los 21 V. En el segundo gráfico, efectivamente también decrece el estado de carga (SoC) de ambas baterías, pero el Ion Litio mantiene mayor porcentaje de carga a lo largo de la duración del ciclo, poniendo en evidencia el mejor aprovechamiento de su capacidad útil; en el de título conclusión, apreciamos el comportamiento de la corriente que varía entre 2 A y 16 A y que va acompañando las curvas de temperatura: en este caso ambas baterías incrementan muy moderadamente la temperatura, siendo la de Ion Litio la que llega a temperaturas más elevadas, lo que pone de manifiesto, de nuevo, que aquella posee mayor densidad energética y actividad interna.

Tabla 2 *Resumen batería ion litio***.**

Variable	Dato
Voltaje inicial	~29 V (SoC 100%)
Voltaje promedio de operación	24-26 V
Caída máx. bajo pico de corriente (16 A)	~2-3 V
Voltaje final	~23 V (SoC 25%)

Fuente. Propia

Nota: Cuando la corriente disminuye, el voltaje se recupera rápidamente a sus niveles nominales

La batería de Ion Litio presenta un rendimiento más estable y efectivo a distintas tasas de carga dado que desarrolla menor resistencia interna y el exponente de Peukert es con un valor próximo a 1, lo que justifica que haya menores pérdidas y que la capacidad útil sea mantenida incluso en el caso de elevados consumos de corriente.

La batería de Plomo Ácido, no obstante, muestra un comportamiento característico donde los elevados consumos generan una caída del voltaje y del SoC de forma rápida, evidenciando su

carácter con limitaciones en cuanto a la respuesta dinámica y generación de calor mediante efecto Joule.

En términos de su aplicación, la batería Ion Litio es capaz de ofrecer un rendimiento ideal en aplicaciones que requieren elevadas densidades energéticas y estabilidad térmica, mientras que la batería de Plomo Ácido responde a su gama tradicional de aplicaciones confiables y económicas para sistemas estacionarios o de respaldo.

La tabla describe el comportamiento eléctrico de una batería de Plomo-Ácido durante su proceso de descarga, representado por la curva roja. Se muestran valores de voltaje en diferentes estados de carga (SoC) y bajo condiciones de corriente variable, incluyendo picos de 16 A. El objetivo es evidenciar cómo responde esta tecnología frente a demandas elevadas y cómo se comporta en términos de recuperación de voltaje después de los esfuerzos de carga.

Tabla 3 *Resumen batería plomo acido.*

Variable	Dato
Voltaje inicial	~28 V (SoC 100%)
Voltaje promedio de operación	23-25 V
Caída máx. bajo pico de corriente (16 A)	~4-5 V
Voltaje final	~22 V (SoC 25%)

Fuente. Propia

El voltaje inicial de la batería se encuentra alrededor de 28 V cuando está completamente cargada (SoC 100%), con un voltaje promedio de operación entre 23 y 25 V. Bajo picos de corriente de 16 A, se observa una caída significativa de aproximadamente 4 a 5 V, alcanzando un voltaje final cercano a 22 V cuando el estado de carga desciende al 25%. A diferencia de las baterías de Ion-Litio, la recuperación de voltaje en Plomo-Ácido es lenta e incompleta, lo que refleja una menor capacidad de respuesta dinámica frente a variaciones de carga.

El comportamiento evidenciado confirma que las baterías de Plomo-Ácido presentan limitaciones en eficiencia y estabilidad bajo corrientes elevadas, debido a su mayor resistencia interna y exponente de Peukert más alto. La caída pronunciada de voltaje y la recuperación incompleta tras los picos de corriente implican pérdidas energéticas y menor aprovechamiento de la capacidad útil. Sin embargo, su robustez y bajo costo las mantienen como una opción viable en

aplicaciones estacionarias, sistemas de respaldo y entornos donde la demanda energética es más estable y menos exigente.

Tabla 4 *Diferencias a 16V.*

Tecnología	Formula	Caída de voltaje
Ion-Litio	ΔV = 16 A × 0.05 Ω	0.8 V de caída
Plomo-Ácido	ΔV = 16 A × 0.15 Ω	2.4 V de caída

Fuente. Propia

La diferencia en el comportamiento de las baterías de Ion-Litio y Plomo-Ácido bajo condiciones de descarga variable tiene implicaciones directas en la selección tecnológica para aplicaciones específicas.

El Ion-Litio, al mantener un voltaje más estable y recuperarse rápidamente tras picos de corriente, garantiza un suministro confiable en sistemas donde la continuidad energética es crítica, como movilidad eléctrica, electrónica portátil y almacenamiento avanzado.

En contraste, el Plomo-Ácido, con caídas de voltaje más pronunciadas y recuperación lenta, resulta más adecuado en entornos estacionarios o de respaldo, donde la demanda es menos dinámica y el costo inicial es un factor determinante. Esta comparación evidencia que la elección de la tecnología no solo depende de parámetros eléctricos, sino también de criterios de aplicación, eficiencia y sostenibilidad.

6.4.1 Evolución del Estado de Carga (SoC).

La Figura 11 evidencia la evolución del estado de carga (SoC) desde un nivel inicial del 100% hasta aproximadamente el 25% al final de la simulación. Ambas tecnologías muestran una tendencia general de descarga progresiva, aunque con diferencias notables en la pendiente. Entre los minutos 15 y 40 se observa la mayor variación, coincidiendo con los períodos de mayor corriente aplicada.

La batería de Ion-Litio presenta una descarga más gradual y predecible, manteniendo estabilidad incluso bajo demandas elevadas, mientras que la de Plomo-Ácido exhibe una aceleración marcada de la descarga durante los picos de corriente, reflejando su mayor sensibilidad a variaciones de carga y menor eficiencia dinámica.

6.4.2 Análisis técnico - Efecto Peukert.

La diferencia en el comportamiento del estado de carga (SoC) entre las tecnologías de Ion-Litio y Plomo-Ácido se explica mediante la Ley de Peukert, la cual establece que la capacidad efectiva de una batería disminuye cuando se descarga a corrientes elevadas, la reducción alcanza ≈12% a 16 A de descarga. Esto implica que, aunque ambas baterías poseen una capacidad nominal de 10 Ah, en condiciones de alta demanda el Plomo-Ácido se agota más rápido, requiriendo un dimensionamiento mayor (~12–13 Ah) para igualar la autonomía del Ion-Litio, lo que incrementa peso y costo. Además, el Ion-Litio ofrece mayor predictibilidad en la estimación del tiempo restante de operación, mientras que el Plomo-Ácido presenta variaciones más abruptas y menos confiables. En conclusión parcial, el Ion-Litio aprovecha de manera más eficiente su capacidad nominal, proporcionando mayor autonomía real y estabilidad en aplicaciones con demandas variables de corriente.

6.4.3 Comportamiento Térmico.

La Figura 11 muestra la evolución de la temperatura de las baterías junto con el perfil de corriente aplicado durante la simulación. El perfil de corriente oscila entre 2 A y 16 A, y los picos de temperatura coinciden directamente con los picos de demanda. En la batería de Ion-Litio (curva azul), la temperatura inicial es de 25 °C y alcanza un máximo de aproximadamente 30–32 °C, con un incremento térmico moderado de 5–7 °C y una respuesta suave y controlada. En contraste, la batería de Plomo-Ácido (curva roja) parte igualmente de 25 °C, pero llega a valores más altos de 35–38 °C, con un incremento de 10–13 °C y una respuesta térmica más pronunciada y sostenida. Estas diferencias reflejan la mayor densidad energética y eficiencia del Ion-Litio, frente a la mayor disipación de calor y sensibilidad del Plomo-Ácido bajo condiciones de corriente variable.

6.4.4 Análisis técnico - Generación de calor.

El incremento de temperatura observado en ambas baterías durante la descarga se explica principalmente por el efecto Joule, donde la energía eléctrica se disipa como calor en función de la corriente y la resistencia interna.

Al aplicar una corriente de 16 A, la batería de Ion-Litio genera aproximadamente 12.8 W de calor, mientras que la de Plomo-Ácido alcanza 38.4 W, es decir, tres veces más bajo las mismas

condiciones de operación. Esta diferencia se traduce en un mayor incremento térmico en la batería de Plomo-Ácido, que eleva su temperatura entre 10 y 13 °C, frente a los 5–7 °C del Ion-Litio. En términos prácticos, el Ion-Litio ofrece una respuesta térmica más controlada y eficiente, reduciendo riesgos de sobrecalentamiento y mejorando la confiabilidad del sistema, mientras que el Plomo-Ácido requiere mayor atención en ventilación y gestión térmica para evitar degradación acelerada y pérdida de rendimiento.

6.4.5 Consecuencias del sobrecalentamiento.

El calentamiento excesivo de las baterías durante la descarga tiene consecuencias críticas en su desempeño y seguridad. En el caso de las baterías de Plomo-Ácido, por cada 10 °C por encima de los 25 °C de referencia, la vida útil se reduce aproximadamente en un 50%, lo que acelera su degradación y disminuye la confiabilidad del sistema. Aunque las baterías de Ion-Litio son menos sensibles, también presentan pérdida de vida útil cuando operan a temperaturas elevadas. Además, la energía convertida en calor representa una pérdida de eficiencia, ya que no se entrega a la carga: en el Plomo-Ácido, estas pérdidas alcanzan ~38.4 W, frente a los 12.8 W del Ion-Litio. Los riesgos de seguridad se incrementan cuando la temperatura supera los 45–50 °C, pudiendo provocar evaporación del electrolito en Plomo-Ácido, inflamiento de celdas o incluso fuga térmica en casos extremos. Por ello, el Plomo-Ácido requiere sistemas de ventilación o refrigeración activa, lo que aumenta la complejidad y el costo de la instalación, mientras que el Ion-Litio ofrece una operación más eficiente y segura bajo condiciones variables de corriente.

6.4.6 Balance térmico.

El comportamiento térmico de las baterías durante la descarga se modela considerando tanto la generación como la disipación de la capacidad térmica que depende de la masa y el calor específico, la disipación se relaciona con el intercambio con el ambiente; aunque el Plomo-Ácido posee el doble de masa (3.0 kg frente a 1.5 kg del Ion-Litio), su resistencia interna más elevada provoca pérdidas térmicas mucho mayores (≈38.4 W frente a 12.8 W a 16 A), generando incrementos de temperatura más pronunciados que aceleran la degradación (reducción de vida útil del 50% por cada 10 °C sobre 25 °C), disminuyen la eficiencia al convertir energía útil en calor y aumentan los riesgos de seguridad como evaporación del electrolito, inflamiento de celdas o fuga térmica; en consecuencia, el Plomo-Ácido requiere ventilación o sistemas de enfriamiento

adicionales que elevan la complejidad y el costo, mientras que el Ion-Litio opera en un régimen térmico más seguro y eficiente, reduciendo riesgos de degradación prematura y eliminando la necesidad de sistemas de refrigeración complejos.

La tabla 5 resume los principales criterios de evaluación técnica entre las baterías de Ion-Litio y Plomo-Ácido en un sistema de 24 V y 10 Ah. Se incluyen parámetros eléctricos, térmicos y físicos, tales como estabilidad de voltaje, capacidad efectiva bajo alta corriente, generación de calor, incremento de temperatura, peso y eficiencia energética. El objetivo es identificar de manera cuantitativa las ventajas relativas de cada tecnología en condiciones de operación exigentes.

Tabla 5 *Resumen de criterios*

Criterio de Evaluación	Ion-Litio	Plomo-Ácido	Ventaja
Estabilidad de voltaje	±2-3 V bajo carga	±4-5 V bajo carga	Ion-Litio (40% mejor)
Capacidad efectiva a 16 A	9.7 Ah (97%)	8.8 Ah (88%)	Ion-Litio (9% más capacidad)
Generación de calor	12.8 W	38.4 W	Ion-Litio (67% menos calor)
Incremento de temperatura	+5-7 °C	+10-13 °C	Ion-Litio (50% menos ΔT)
Peso	1.5 kg	3.0 kg	Ion-Litio (50% más ligero)
Eficiencia energética	~95-97 %	~85-90 %	Ion-Litio (5-7% más eficiente)

Fuente. Propia

Nota: Datos numéricos derivados de los resultados de simulación dinámica en condiciones de perfil de corriente variable para bancos de 24V 10Ah.

El Ion-Litio presenta una variación de voltaje más reducida (±2–3 V) frente al Plomo-Ácido (±4–5 V), lo que representa un 40% de mejora en estabilidad. Su capacidad efectiva a 16 A alcanza 9.7 Ah (97% de la nominal), mientras que el Plomo-Ácido se reduce a 8.8 Ah (88%), confirmando la influencia del Efecto Peukert. En términos térmicos, el Ion-Litio genera 12.8 W de calor y un incremento de 5–7 °C, frente a los 38.4 W y 10–13 °C del Plomo-Ácido, lo que

implica un 67% menos de pérdidas y un 50% menos de aumento de temperatura. Además, el Ion-Litio es más ligero (1.5 kg vs 3.0 kg) y más eficiente (~95–97% frente a ~85–90%).

Los resultados evidencian que el Ion-Litio ofrece ventajas significativas en todos los aspectos evaluados: mayor estabilidad de voltaje, mejor aprovechamiento de la capacidad nominal, menor generación de calor, menor incremento térmico, menor peso y mayor eficiencia energética. Estas características se traducen en mayor autonomía real, operación más segura y confiable, y reducción de requisitos de refrigeración. En contraste, el Plomo-Ácido, aunque más económico y robusto en aplicaciones estacionarias, presenta limitaciones críticas bajo corrientes elevadas, con pérdidas energéticas y térmicas que afectan su vida útil y desempeño. En conclusión parcial, el Ion-Litio se consolida como la tecnología más adecuada para aplicaciones dinámicas y exigentes, mientras que el Plomo-Ácido conserva su utilidad en sistemas de respaldo o donde el costo inicial es el factor predominante.

6.5 Selección y adquisición de los componentes.

El módulo de nodo en una microrred eléctrica constituye una unidad funcional integral diseñada para simular, analizar y controlar el comportamiento dinámico de sistemas eléctricos distribuidos. Su concepción no se limita a la simple generación o consumo de energía, sino que se orienta a reproducir de manera controlada las condiciones reales de operación de una red eléctrica, permitiendo estudiar fenómenos como la estabilidad, la variación de carga, la sincronización entre nodos y la respuesta ante perturbaciones.

Desde el punto de vista estructural, el nodo se implementa mediante un tablero de control que integra elementos de control, potencia, medición y comunicación, organizados de manera que se garantice tanto la funcionalidad eléctrica como la robustez frente a interferencias electromagnéticas. En este sistema, el elemento central es el autómata programable (PLC), el cual actúa como unidad de control principal, encargada de coordinar todas las operaciones del nodo. Este dispositivo recibe señales de entrada tanto de manera local, a través de pulsadores y elementos de mando, como de manera remota mediante protocolos de comunicación industrial. A partir de estas entradas, el autómata ejecuta algoritmos de control que definen el comportamiento eléctrico del nodo en cada instante.

El control del sistema se realiza mediante la interacción entre el autómata y el driver trifásico programable, establecida a través de comunicación serial bajo protocolo Modbus RTU. En este esquema, el autómata opera como maestro, enviando consignas específicas al driver, el cual actúa como esclavo ejecutando dichas órdenes.

Estas consignas corresponden principalmente a parámetros eléctricos fundamentales como la frecuencia, la amplitud del voltaje y el ángulo de fase, lo que permite modificar en tiempo real las características de la señal generada. Gracias a esta capacidad, el sistema no solo puede reproducir condiciones normales de operación, sino también simular escenarios anómalos como caídas de tensión, variaciones de frecuencia o desbalances, lo cual resulta fundamental para el análisis de la resiliencia de la microrred.

La etapa de potencia del nodo está constituida por el driver trifásico, el cual realiza la conversión de energía y la generación de señales eléctricas trifásicas mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). Este método consiste en la conmutación de dispositivos electrónicos de potencia a alta frecuencia, lo que permite sintetizar una señal alterna a partir de una fuente de corriente continua. Sin embargo, este proceso introduce componentes armónicas de alta frecuencia que deben ser tratadas para obtener una señal adecuada para la emulación de la red.

Con el fin de mejorar la calidad de la señal, se incorpora un sistema de filtrado basado en inductores de 220 μH conectados en serie a la salida del driver. Estos elementos presentan una reactancia inductiva que depende de la frecuencia, descrita por la expresión $XL=2\pi fLXL$, lo que implica que, a bajas frecuencias, como la frecuencia fundamental de operación (50 o 60 Hz), la oposición al paso de la corriente es mínima, mientras que, a frecuencias elevadas, como las asociadas al PWM, la oposición aumenta significativamente. Este comportamiento permite atenuar los armónicos de alta frecuencia y obtener una forma de onda más cercana a una señal senoidal, condición necesaria para una representación realista del sistema eléctrico.

Posteriormente, la energía filtrada es aplicada a un conjunto de resistencias que actúan como cargas eléctricas. Estas resistencias tienen como finalidad simular el consumo de energía dentro de la microrred, permitiendo evaluar la capacidad del nodo para mantener condiciones estables de operación bajo demanda. La presencia de estas cargas genera un flujo de corriente real, lo que habilita el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones de consumo, tal como ocurriría en una red eléctrica real.

El sistema de medición está conformado por sensores de corriente basados en efecto Hall, ubicados estratégicamente en la salida del nodo. Estos dispositivos permiten medir de manera no invasiva la corriente que circula hacia la carga, generando señales que son enviadas al autómata programable. A partir de esta información, el sistema puede calcular variables eléctricas como la potencia, mediante la relación $P=V \cdot I \cdot \cos\phi$ y evaluar si el nodo está operando dentro de los límites establecidos. Esta retroalimentación es fundamental para la implementación de un sistema de control en lazo cerrado, en el cual el autómata ajusta continuamente los parámetros del driver en función de las condiciones reales de operación.

El flujo de funcionamiento del módulo de nodo se desarrolla de manera secuencial y cíclica. Inicialmente, el autómata recibe una orden de operación, ya sea de forma local o remota, y procesa esta información para definir las consignas eléctricas que deben ser aplicadas. Estas consignas son transmitidas al driver trifásico, el cual genera la señal eléctrica correspondiente. La señal es posteriormente filtrada para mejorar su calidad y aplicada a la carga, generando una respuesta del sistema en términos de corriente y potencia. Los sensores capturan esta información y la envían nuevamente al autómata, cerrando el ciclo de control. Este proceso se repite continuamente, permitiendo una regulación dinámica del sistema y garantizando su estabilidad.

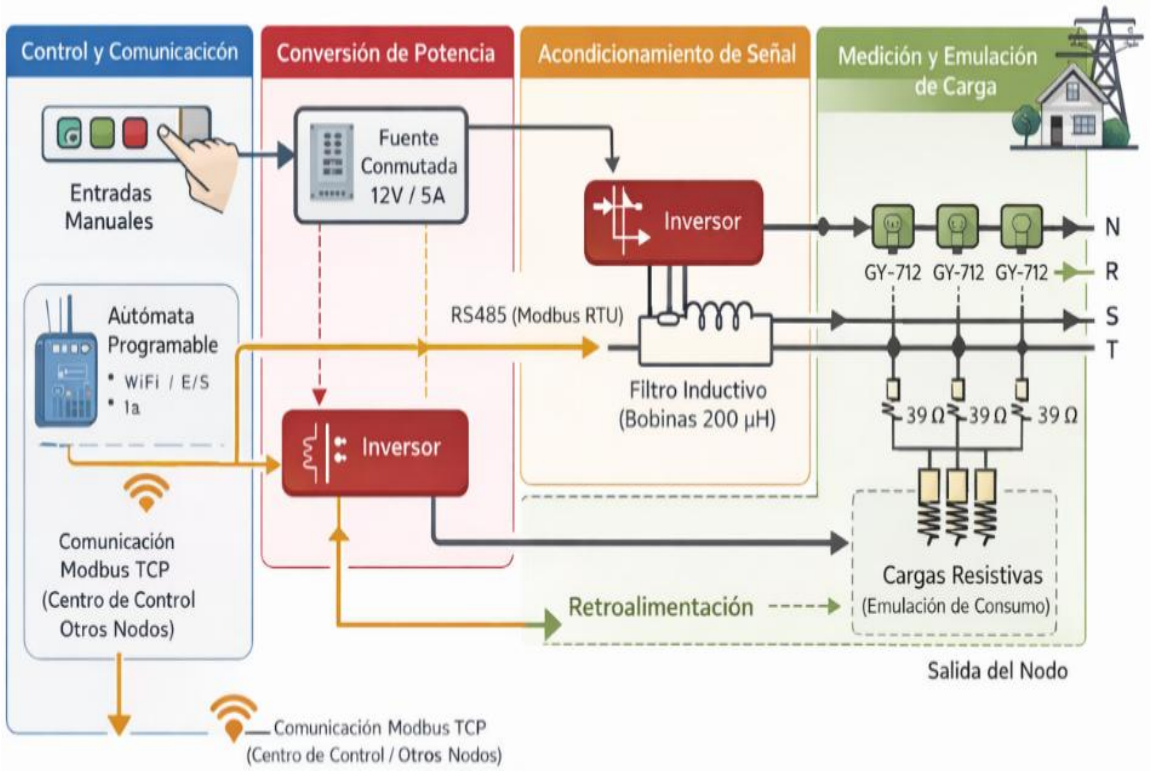
Adicionalmente, el nodo cuenta con capacidades de comunicación que le permiten integrarse dentro de una red más amplia. Mediante el uso de protocolos como Modbus TCP, el sistema puede intercambiar información con otros nodos o con un centro de control, facilitando la coordinación de la operación de la microrred. Esta capacidad es esencial para la sincronización entre nodos, ya que permite alinear variables como la frecuencia, el voltaje y la fase, evitando problemas como corrientes circulantes o inestabilidad del sistema.

Desde el punto de vista constructivo, el nodo se implementa utilizando un conjunto de componentes cuidadosamente seleccionados, entre los que se incluyen el autómata programable, el driver trifásico, la fuente de alimentación de 12 V, sensores de corriente, inductores, resistencias de carga, dispositivos de mando y elementos de conexión y montaje. La disposición física de estos elementos dentro del gabinete se realiza separando la sección de control de la sección de potencia, con el fin de minimizar interferencias electromagnéticas y garantizar un funcionamiento confiable del sistema.

En conjunto, el módulo de nodo constituye una plataforma experimental avanzada que integra principios de electrónica de potencia, control automático y comunicación industrial. Su diseño

permite no solo la emulación de sistemas eléctricos reales, sino también la implementación y validación de estrategias de control en tiempo real, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para la formación en ingeniería eléctrica y el desarrollo de soluciones en el ámbito de las microrredes y sistemas energéticos inteligentes.

Figura 13 *Diagrama del nodo de almacenamiento.*



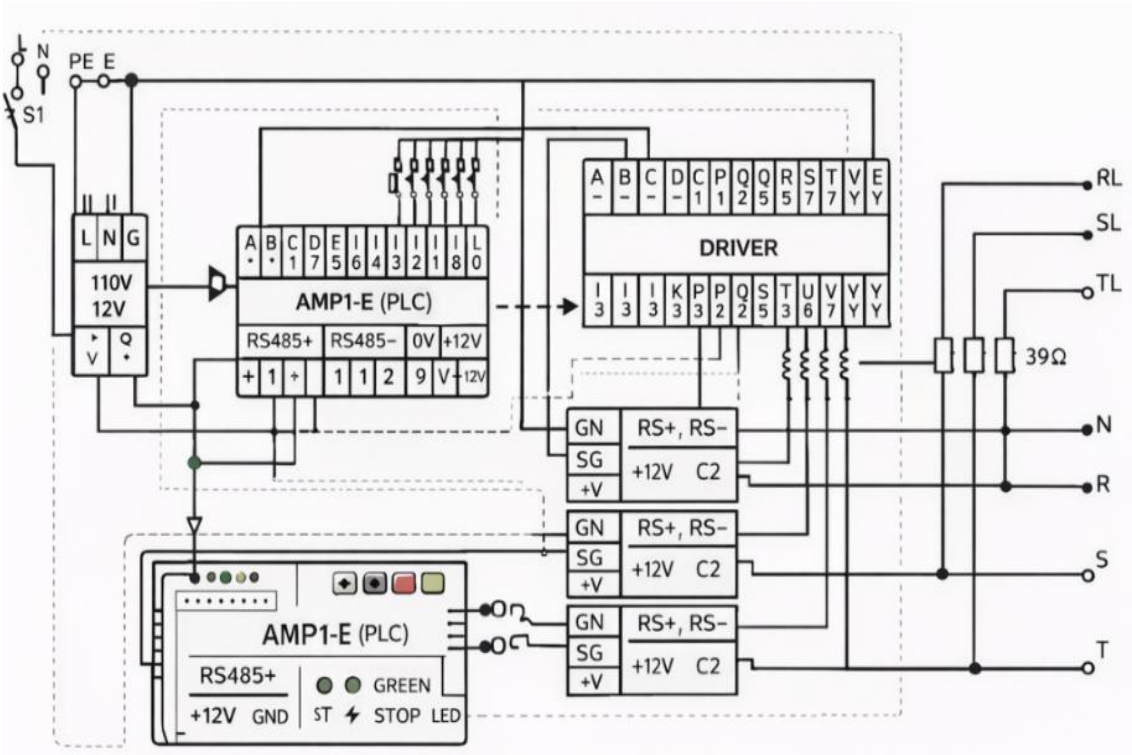
Nota: Adaptado de esquema conceptual de instrumentación y electrónica de potencia, 2026. El sistema describe la integración de un autómata programable con etapas de inversión de potencia, filtrado inductivo y emulación de cargas resistivas trifásicas.

6.6 Diseño Eléctrico y Estructural

El esquema de la Figura 13 muestra la disposición de los elementos principales de un sistema de control basado en un PLC (AMP1-E), incluyendo la alimentación, las líneas de comunicación RS485, el bloque de drivers y las salidas hacia cargas externas.

El objetivo del diagrama es ilustrar cómo se interconectan los módulos de control, potencia y señal para garantizar el funcionamiento coordinado del sistema.

Figura 14 *Esquema eléctrico.*



Fuente. Propia

El circuito parte de una fuente de alimentación de 110 V que se transforma a 12 V para energizar el PLC y los drivers. El PLC AMP1-E dispone de terminales para comunicación RS485 (+/-), alimentación (+12 V, GND) y salidas de control, además de indicadores LED de estado (GREEN, STOP). El bloque DRIVER cuenta con múltiples terminales (A–P) que reciben señales del PLC y las convierten en acciones sobre las cargas conectadas, como relés (RL), lámparas de señalización (SL, TL) y resistencias de protección (39 Ω). Las líneas de comunicación (RS+, RS-, GN, SG) permiten la transmisión de datos entre el PLC y los módulos periféricos, mientras que las conexiones de potencia (N, R, S, T) aseguran la distribución de energía hacia los actuadores.

El diagrama evidencia un diseño modular y seguro, donde el PLC actúa como cerebro del sistema, gestionando tanto la comunicación digital como el control de potencia. La inclusión de resistencias y relés protege los componentes frente a sobrecargas y asegura la correcta conmutación de las cargas. El uso de RS485 como protocolo de comunicación garantiza robustez y estabilidad en entornos industriales, permitiendo la transmisión de datos a largas distancias con

mínima interferencia. En términos prácticos, este esquema refleja una arquitectura típica de sistemas de automatización industrial, donde la separación clara entre control, potencia y señal facilita el mantenimiento, la escalabilidad y la confiabilidad operativa.

6.7 Programación y configuración del sistema de control.

El protocolo Modbus es un lenguaje de comunicación que se usa mucho en la automatización de la industria. El protocolo Modbus funciona bien cuando hay ruido eléctrico. En el sistema, el PLC (Programmable Logic Controller) actúa como maestro. En el sistema, el inversor o el driver actúa como esclavo. La comunicación se hace con Modbus RTU sobre RS-485. La comunicación con Modbus RTU sobre RS-485 mantiene la transmisión de datos en ambientes de la industria con ruido eléctrico.

El PLC se comunica con el inversor mediante un mapa de registros. Ese mapa de registros permite al PLC controlar los parámetros eléctricos básicos. Los registros más importantes son la frecuencia, la amplitud y la fase. El registro de frecuencia (0x0000) sirve para cambiar la velocidad de conmutación del inversor. Con el registro de frecuencia se pueden simular redes de 50 Hz, 60 Hz o frecuencias especiales para pruebas de estabilidad. El registro de amplitud (0x0008) controla el índice de modulación PWM. El registro de amplitud ajusta el voltaje de salida de acuerdo con lo que necesita la red. El registro de fase (0x0010) es importante para sincronizar los nodos. El registro de fase permite a el PLC ajustar el ángulo de fase. El registro de fase ayuda a conectar el nodo a una microrred.

El flujo de datos del sistema se divide en dos etapas: la consulta y la respuesta. En la fase de consulta, el PLC pide datos al inversor. El PLC pide la lectura de corriente. El PLC envía consignas de voltaje para cambiar las condiciones de operación. En la fase de respuesta, el inversor ejecuta la instrucción que recibió y devuelve un código de confirmación o los valores medidos por los sensores del inversor. Esta es la información que el usuario dio: Este intercambio asegura que las órdenes se cumplan con precisión. El sistema mantiene control continuo sobre las variables críticas. La implementación de Modbus en los sistemas PLC-inversor ayuda a que los dispositivos se comuniquen. Además, el protocolo Modbus permite simular condiciones de red y

hacer pruebas de sincronización en microrredes. La configuración correcta de los registros y la estabilidad del canal de comunicación RS-485 son claves para que el protocolo Modbus funcione bien en las aplicaciones de Modbus. En conclusión, el protocolo Modbus es una herramienta útil y fiable para la automatización industrial. El protocolo Modbus brinda flexibilidad al controlar parámetros eléctricos y protege la integridad de los datos en entornos complejos.

6.8 Montaje e integración del prototipo.

El uso de gabinetes de plástico en los sistemas de control trae ventajas y desventajas que el diseñador tiene que considerar. El material no es conductor. El material reduce el riesgo de los cortocircuitos por contacto con el chasis y el material facilita la comunicación por Wifi. Sin embargo, la falta de la “Jaula de Faraday” reduce la protección contra el ruido electromagnético. Por eso, el orden interno de los componentes es importante para evitar bloqueos en el PLC Amp1-F. El driver genera interferencias que pueden bloquear el PLC. Los elementos se distribuyen en el riel DIN. La distribución en el riel DIN es muy importante. Divida el equipo en dos partes distintas. La parte de potencia está a la derecha. En la parte de potencia coloque el driver trifásico Amp1-G, las cuatro bobinas de 220 uH y las tres resistencias de 39 Ω. La parte de control está a la izquierda. En la parte de control conecte la fuente de 12 V y el PLC Amp1-F.

Mantenga la separación física para aislar los componentes que generan el calor y los campos magnéticos de los dispositivos de lógica y de control. Las borneras deben ir en el extremo derecho o en la parte inferior. Esa ubicación de las borneras facilita la organización de las salidas al exterior. La gestión térmica es importante porque el gabinete plástico es un aislante térmico. Las resistencias de 5 W y el driver generan calor. No fijes las resistencias directamente a la placa de fondo; eleva las resistencias con tornillos autoperforantes o con soportes. Así el aire puede circular. En los gabinetes estancos perfora rejillas laterales, superiores e inferiores. Así la ventilación natural funciona mejor

En cuanto al cableado, se debe emplear cable encauchetado exclusivamente para la acometida de entrada de 110V desde el enchufe hasta la fuente de 12V y el piloto. El uso de cable de vehículo 18 AWG debe seguir un código de colores consistente, como rojo para +12V y negro

para GND. Es obligatorio el uso de terminales tubulares en cada punta de cable antes de insertarlos en el PLC o el driver, evitando así cortocircuitos o arcos eléctricos por vibración. Los sensores GY-712-5A deben instalarse cerca de las borneras de salida, pero alejados de la fuente conmutada para prevenir que el ruido afecte la señal analógica.

El sistema de filtrado mediante bobinas requiere especial atención. Las cuatro bobinas de 220 uH deben conectarse en serie con las salidas del driver antes de llegar a las resistencias o borneras de interconexión. Es importante mantener al menos un centímetro de separación entre ellas para evitar acoplamiento inductivo y fijarlas adecuadamente, ya que su peso y la vibración de alta frecuencia pueden comprometer las soldaduras si quedan suspendidas.

El panel frontal debe diseñarse con criterios de simetría y ergonomía. Se recomienda perforar el gabinete con broca de copa de 22 mm, colocando el piloto de 110V en la parte superior como indicador de presencia de red y los cuatro pulsadores en una fila inferior o en matriz 2x2. Para garantizar seguridad, los cables que van hacia la tapa deben tener suficiente longitud para permitir la apertura del gabinete sin tensar las conexiones del PLC.

Finalmente, el diagrama de flujo de conexión sugiere una organización clara: la entrada de 110V alimenta al piloto y a la fuente de 12V; la salida de la fuente se conecta al PLC y al VCC del driver; el driver se enlaza con las bobinas, que a su vez se conectan a los sensores GY-712 y luego a las resistencias o borneras; los sensores se vinculan con las entradas analógicas del PLC; y la comunicación de datos se establece mediante la salida RS485 del PLC hacia la entrada RS485 del driver bajo protocolo Modbus. Como consejo adicional, al usar tornillos autoperforantes en gabinetes plásticos, se debe evitar un apriete excesivo para prevenir fatiga o ruptura del material.

Se incluye un análisis del comportamiento de la corriente en las bobinas de 220 uH que se usan como filtros de línea. Aunque la resistencia de corriente continua, RDC, no impide el paso de corriente, las bobinas tienen una reactancia, XL, que depende directamente de la frecuencia de operación. Esa reactancia produce una caída de tensión, VL, cuando la corriente circula. La caída de tensión sirve para bloquear armónicos que aparecen en frecuencias que están por encima del rango de operación y para mantener la calidad de la señal. Calculo la reactancia inductiva usando la fórmula $XL = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$. Con la frecuencia de 60 Hz y la inductancia de 220 µH (0.0002 H), obtengo la reactancia inductiva $XL = 0.0829\ \Omega$. Luego aplico la Ley de Ohm para la corriente alterna. Si la carga demanda la corriente de 2 A, la caída de tensión será $VL = I \cdot XL. = 0.1658$ V.

El valor es pequeño en las frecuencias fundamentales, y el valor es ideal para no comprometer la potencia entregada.

El comportamiento cambia mucho frente a los armónicos que genera el PWM del driver a 7200 Hz. Por ejemplo, a 7200 Hz la reactancia alcanza 9 Ω. Esa reactancia produce una caída de tensión y permite que la bobina bloquee el ruido. Las bobinas actúan como filtros. La bobina atenúa las componentes que no se quieren y entrega una onda que tiene menos ruido a la resistencia de carga y al resto del sistema. Este análisis confirma que la disposición y fijación de las bobinas afecta la mecánica, la temperatura y la electricidad. La función de las bobinas como filtros de línea garantiza la estabilidad del sistema, reduce interferencias y protege la señal que alimenta al PLC. Las bobinas de 220 uH cumplen una función en la arquitectura del gabinete. Equilibran la eficiencia de energía con la calidad de la señal en condiciones de operación.

6.9 Protocolo de pruebas.

Se analiza el sistema de control del inversor trifásico implementado mediante la programación del microcontrolador, aplicado como módulo de conversión de energía dentro de la microrred eléctrica. El inversor es el elemento de interfaz entre el banco de almacenamiento de energía en corriente continua (DC) compuesto típicamente por baterías electroquímicas y la red de distribución o las cargas en corriente alterna (AC), siendo su función esencial transformar la energía DC almacenada en tensión AC trifásica con frecuencia, amplitud y desfase controlados.

En el contexto de las micro redes eléctricas, el inversor cumple un papel estratégico porque permite gestionar los flujos de potencia activa y reactiva, regular la calidad de la energía entregada a las cargas locales y, en configuraciones avanzadas, sincronizarse con la red de distribución pública para inyectar o absorber energía según las condiciones del sistema.

El fragmento de código titulado Código del inversor trifásico de la figura 15 corresponde a la programación de un sistema de electrónica de potencia orientado a la generación de señales sinusoidales trifásicas. El objetivo es controlar un inversor mediante un microcontrolador, gestionando los desfases de 120° entre fases y modulando la frecuencia de salida en función de parámetros recibidos por comunicación serial.

Figura 15 *Código inversor parte 1.*

```
//Código del inversor trifásico

#include "startup.h"
#include "gpio.h"
#include "timer.h"
#include "serial.h"
#include "math.h"

int contad_1 = 0, contad_2 = 0, contad_3 = 0, contic = 0;

void ondulador(void) {
        if(contad_1 >= 360){                                    //Limitar el conteo del ángulo a 360 grados
                contad_1 = 0;
                contad_2 = 240;                                         //Desfase de 120 grados. (120 = 360 - 240)
                contad_3 = 120;                                         //Desfase de 240 grados. (240 = 360 - 120)
        }
        if(contad_2 >= 360)                                             //Limitar el conteo del ángulo a 350 grados
                contad_2 = 0;
        if(contad_3 >= 360)                                             //Limitar el conteo del ángulo a 350 grados
                contad_3 = 0;
        Gpio_0 = (contad_0 >= 180)      0 : 1;                  //Seleccionar polaridad de la rama fase 1
        Gpio_1 = (contad_1 >= 180)      0 : 1;                  //Seleccionar polaridad de la rama fase 2
        Gpio_2 = (contad_2 >= 180)      0 : 1;                  //Seleccionar polaridad de la rama fase 3
        T0_Ch_1 = T0_mod * math.abs(math.sin(contad_1++ * math.PI() / 180));            //Fase 1 igual valor sinusoidal
        T0_Ch_0 = T0_mod * math.abs(math.sin(contad_2++ * math.PI() / 180));            //Fase 1 igual valor sinusoidal
        T1_Ch_1 = T1_mod * math.abs(math.sin(contad_3++ * math.PI() / 180));            //Fase 1 igual valor sinusoidal
}

void recepcion(void){
        char[] lectura = COM_1.readbytes;                       //Leer el valor recibido
        COM_1.writebytes((char[])"OK");                         //Responder a la escritura
        int frecu = math.strtoint(lectura);                     //Calcular la frecuencia programada
        T0_mod = 1000000 / (frecu * 360);                       //Calcular el período del timer 0
        T1_mod = T0_mod;                                                        //Copiar el período al timer 1
}
```

Fuente. Propia

El programa incluye librerías de inicialización, temporización, comunicación y funciones matemáticas. Se definen contadores para cada fase (contad_1, contad_2, contad_3) que limitan el ángulo a 360°, asegurando la periodicidad de la señal. La función onduladora() genera las tres señales sinusoidales con desfases de 120° y selecciona la polaridad de cada rama mediante salidas GPIO. Los valores sinusoidales se calculan con la función seno, escalados por los parámetros de modulación (T0_mod, T1_mod). La función recepción() procesa datos recibidos por el puerto serial, ajustando la frecuencia de operación del inversor en tiempo real.

El código implementa un esquema básico de modulación sinusoidal trifásica, garantizando la correcta generación de señales desfasadas y la conmutación de las ramas del inversor. La lógica de reinicio de contadores asegura continuidad en el ciclo de 360°, mientras que la comunicación

serial permite modificar dinámicamente la frecuencia, aumentando la flexibilidad del sistema. En términos prácticos, este diseño refleja los principios fundamentales de control en inversores trifásicos: sincronización de fases, modulación de amplitud y frecuencia, y gestión eficiente de las salidas digitales. Su aplicación es esencial en sistemas de automatización industrial, variadores de velocidad y energías renovables, donde la calidad de la señal trifásica determina la eficiencia y estabilidad del sistema.

El fragmento de código de la figura 16 muestra la inicialización y operación básica del sistema embebido orientado al control de un inversor trifásico y la gestión de periféricos. Se definen dos funciones principales: inicio(), encargada de configurar temporizadores, puertos y comunicación serial; y main(), que ejecuta un bucle infinito con tareas periódicas de control, incluyendo la señalización mediante un LED de operación.

Figura 16 *Código inversor parte 2*

```
void inicio (void){
        timer_config(Tim_0, 1000000 / 21600, PWM_MODE); //Configura timer 0 (60Hz * 360 = 21600)
        timer_config(Tim_1, 1000000 / 21600, PWM_MODE); //Configura timer 1 (60Hz * 360 = 21600)
        port_config(Gpio_0, OUTPUT);                            //Configura dirección fase 1
        port_config(Gpio_1, OUTPUT);                            //Configura dirección fase 2
        port_config(Gpio_2, OUTPUT);                            //Configura dirección fase 3
        port_config(Gpio_3, OUTPUT);                            //Configura dirección neutro
        port_config(Gpio_4, OUTPUT);                            //Configura dirección Led
        Gpio_3 = 1;                                                             //Neutro inyecta PWM positivo
        T1_Ch_0 = T1_mod / 2;                                           //Neutro igual al 50% del voltaje
        launch_Tick_Timer(10);                                          //Lanzar muestreador
        timer_service(Tim_0, ondulador);                        //Configurar interrupción
        timer_start(Tim_0);                                                     //Iniciar operación del timer 0
        timer_start(Tim_1);                                                     //Iniciar operación del timer 1
        serial_service(COM_1, recepcion, RECEIVE );     //Configura interrupción serial
        serial_config(COM_1, 9600, n, 8, 1);            //Configura comunicación serial
}

void main(void){
        inicio();
        while(1){
                while(Tick_time == 0);
                launch_Tick_Timer(10);                                  //Ejecutar cada 10 milisegundos
                if(contic++ >= 100)
                        contic = 0;
                if(contic == 0)                                                 //Destellar led de operación
                        Gpio_4 = 1;
                else
                        Gpio_4 = 0;
        }
}
```

Fuente. Propia

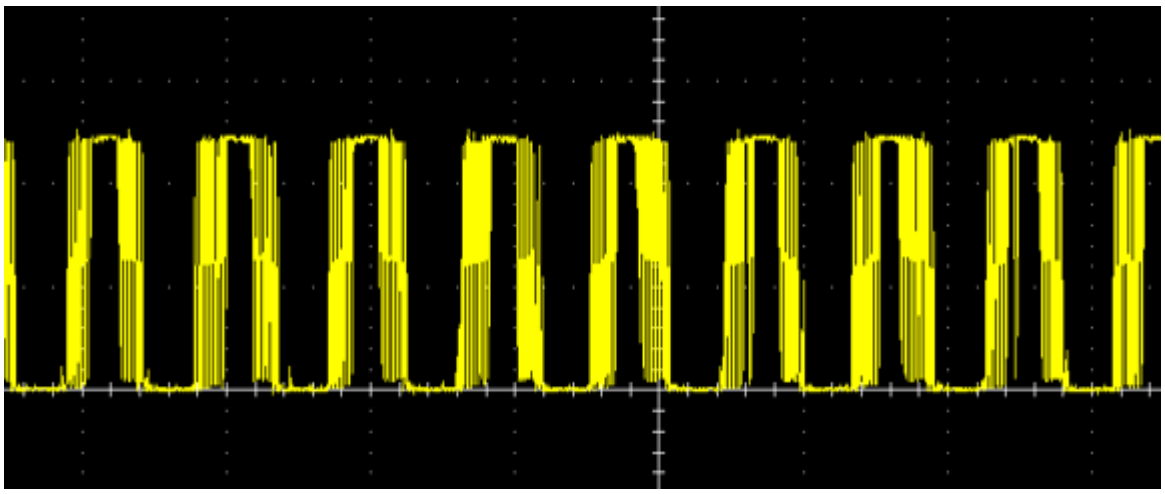
En la función inicio(), se configuran los temporizadores Tim_0 y Tim_1 en modo PWM con una frecuencia de referencia de 60 Hz (21600 pasos por ciclo), se establecen los puertos GPIO como salidas para las tres fases, el neutro y el LED, y se inicializa el neutro con un ciclo de trabajo del 50%. Además, se lanza un muestreador cada 10 ms, se asocia la interrupción del

temporizador con la función ondulador(), y se configura la comunicación serial a 9600 baudios con 8 bits de datos y 1 bit de parada. En la función main(), tras la inicialización, se ejecuta un bucle infinito que espera el tick de 10 ms, reinicia el temporizador y controla el LED de operación: cada 100 ciclos el LED destella, indicando el correcto funcionamiento del sistema.

El código refleja una arquitectura típica de sistemas embebidos, donde la inicialización asegura la correcta sincronización de temporizadores y periféricos, y el bucle principal mantiene tareas periódicas de supervisión. La configuración PWM permite generar señales moduladas para el inversor trifásico, mientras que la comunicación serial garantiza la interacción con el usuario o con otros módulos de control. El destello del LED cumple una función de diagnóstico, confirmando que el sistema está activo y sincronizado. En términos prácticos, este diseño asegura confiabilidad, escalabilidad y facilidad de mantenimiento, características esenciales en aplicaciones de automatización industrial y control de potencia.

La figura 17 corresponde a la medición de tensión realizada entre uno de los terminales de fase del inversor (línea) y el punto de neutro del sistema. Esta medición es la representación más directa de la tensión de fase del inversor, es decir, la tensión que experimentaría una carga conectada entre la línea y el neutro.

Figura 17 *Señal Línea Neutro*



Fuente. Propia

La señal Línea Neutro presenta una forma de onda PWM con clara modulación sinusoidal en la envolvente. Se observan pulsos rectangulares de amplitud constante (igual al nivel de bus DC) con anchos de pulso variables: los pulsos son más anchos en las proximidades de los máximos de la envolvente sinusoidal (90° y 270°) y más estrechos en los cruces por cero (0°, 180° y 360°).

La señal es unipolar: todos los pulsos son de polaridad positiva durante el semiciclo positivo y el nivel cae a cero en las transiciones entre pulsos. La periodicidad de la señal es regular y consistente a lo largo de toda la captura, lo que indica un funcionamiento estable del algoritmo de control. La frecuencia de conmutación (frecuencia de los pulsos individuales) es considerablemente mayor que la frecuencia fundamental de 60 Hz, lo que es una característica inherente a la modulación SPWM. En la señal se aprecian pequeñas irregularidades en los flancos de subida y bajada de los pulsos, manifestadas como oscilaciones o espigas, que son consecuencia de los efectos inductivos y capacitivos parásitos del circuito de potencia y del driver de los transistores.

La forma de onda observada es completamente consistente con la implementación de SPWM descrita en el código. La instrucción T0_Ch_1 = T0_mod * math.abs(math.sin(contad_1++ * PI / 180)) calcula en cada interrupción el ciclo de trabajo del PWM proporcional al valor absoluto del seno del ángulo actual. Esto produce exactamente el patrón de variación de ancho de pulso que se observa en la gráfica: pulsos anchos cerca de los máximos y pulsos estrechos cerca de los cruces por cero.

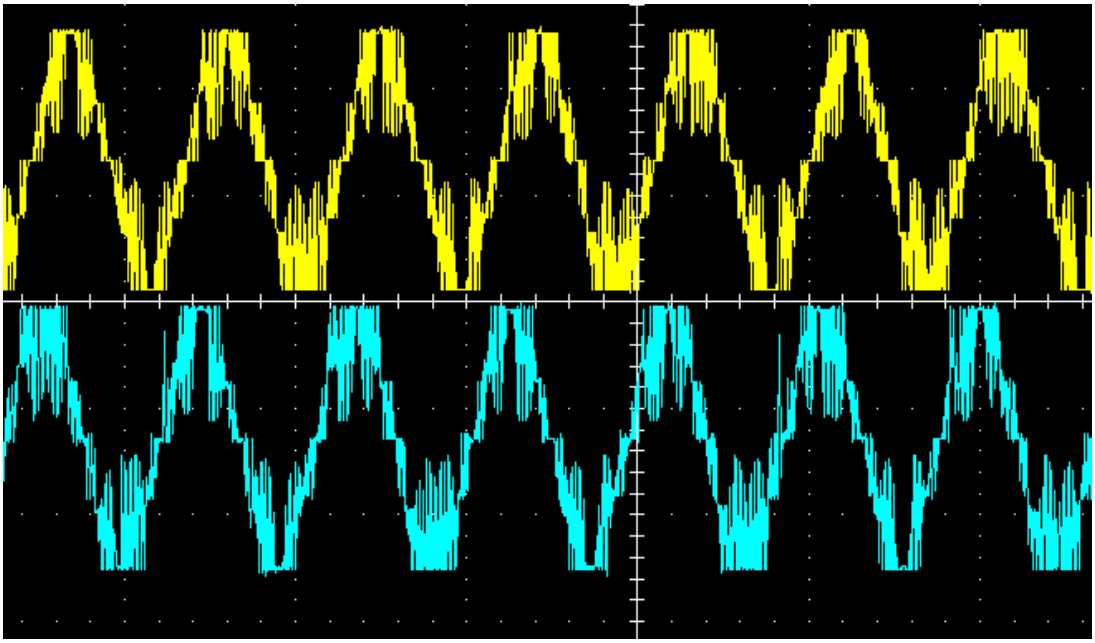
¿La naturaleza unipolar de la señal está determinada por el control de polaridad mediante la instrucción Gpio_1 = (contad_1 >= 180) ? 0 : 1. En el semiciclo positivo (0°–180°), el GPIO activa el transistor superior de la rama, y los pulsos PWM modulan la tensión entre el nivel de bus y cero. En el semiciclo negativo (180°–360°), el GPIO conmuta el transistor inferior y la tensión medida respecto al neutro invertirá su polaridad respecto al bus.

La calidad de la señal es adecuada para el propósito del inversor, aunque la presencia de oscilaciones en los flancos indica que el diseño del circuito de potencia podría beneficiarse de snubbers RC en los transistores de potencia o de optimización de los tiempos de subida y bajada del driver.

La figura 18 presenta simultáneamente dos señales en la misma pantalla del osciloscopio, correspondientes a la diferencia de tensión entre dos fases del inversor trifásico. La señal amarilla

(canal superior) muestra la tensión entre fases con su perfil escalonado característico, mientras que la señal cian (canal inferior) muestra la misma medición en un punto diferente del circuito o con un desplazamiento de referencia distinto.

Figura 18 *Tensión Fase Fase.*



Fuente. Propia

La señal Fase–Fase (tensión de línea) presenta una forma de onda PWM con mayor complejidad respecto a la señal Línea–Neutro, lo cual es esperado dado que resulta de la resta vectorial de dos señales SPWM desfasadas 120° entre sí. Se observa una envolvente sinusoidal de mayor amplitud y pulsos PWM que alternan entre niveles positivos y negativos, característica de la tensión de línea en sistemas trifásicos. La señal amarilla muestra una forma de onda bipolar con pulsos de ancho variable, donde los pulsos positivos y negativos se intercalan siguiendo el perfil de la diferencia entre dos senoides desfasadas 120°.

La señal cian presenta una morfología similar pero con desfase visible, correspondiente posiblemente a la tensión entre las otras dos fases del sistema. Se identifican zonas de transición complejas donde los pulsos cambian rápidamente de polaridad, correspondientes a los cruces por cero de la diferencia de fases.

Estas transiciones son más abruptas que las observadas en la señal Línea–Neutro, lo que es consistente con el comportamiento matemático de la diferencia de dos señales SPWM.

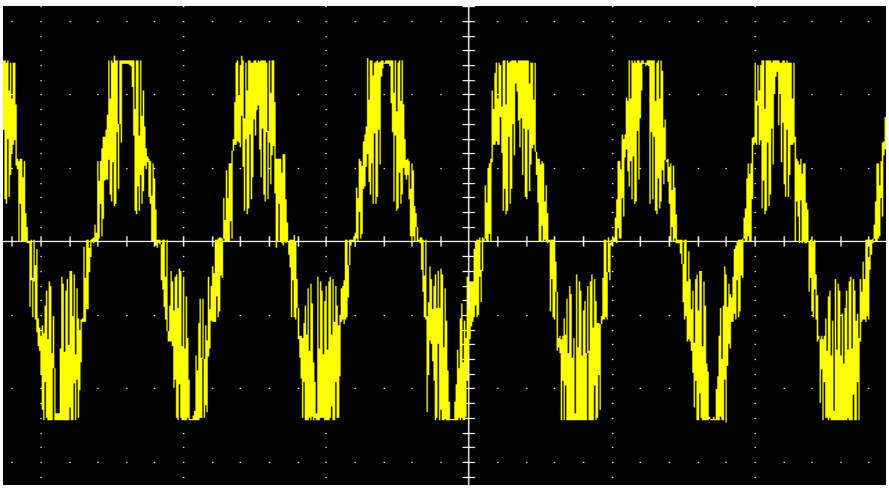
La tensión de línea en un sistema trifásico equilibrado se define matemáticamente como la diferencia entre dos tensiones de fase desfasadas 120°: $V_{AB} = V_A - V_B = V_m \times \sin(\omega t) - V_m \times \sin(\omega t - 120°)$.

Esta operación vectorial produce una señal sinusoidal de amplitud $\sqrt{3} \times V_m$ desfasada 30° respecto a la tensión de fase, siendo V_m la amplitud de la tensión de fase.

En el contexto del inversor controlado por SPWM, la tensión de línea medida por el osciloscopio es la diferencia punto a punto de las dos señales PWM de fase. El resultado no es una señal SPWM simple, sino una señal con estados de tensión en tres niveles: $+V_{bus}$, 0 y $-V_{bus}$, lo que le confiere la característica forma escalonada observada. Esta modulación multinivel es una de las ventajas de los inversores trifásicos frente a los monofásicos, ya que reduce el contenido armónico total de la tensión de línea.

El desfase entre los dos canales (amarillo y cian) visibles en la gráfica confirma que el algoritmo de control del inversor está generando correctamente las tres señales con sus respectivos desfases de 120°. La inicialización $contad_2 = 240$ y $contad_3 = 120$ al reiniciar el contador produce exactamente el desfase observado entre los canales.

Figura 19 *Señal de fase desfasada*



Fuente. Propia

La figura 19 muestra dos trazas captadas simultáneamente en la pantalla del osciloscopio, ambas en color amarillo y posiblemente capturadas con el mismo canal, pero en diferentes condiciones de acoplamiento, o bien correspondientes a dos fases distintas del sistema con el osciloscopio configurado en modo dual. Esta gráfica permite observar de manera directa el desfase temporal entre señales del inversor.

Las dos trazas de esta gráfica presentan una forma de onda SPWM con envolvente sinusoidal claramente visible. La envolvente de cada traza sigue el perfil del valor absoluto del seno, con máximos pronunciados y cruces por cero en los puntos esperados para una señal de 60 Hz. La amplitud máxima de los pulsos es consistente con el nivel de bus de continua del sistema. El desfase entre las dos trazas es claramente perceptible en la gráfica: los máximos de la envolvente de la segunda traza están desplazados temporalmente respecto a los máximos de la primera, con un desplazamiento que equivale a aproximadamente 1/3 del período visible, lo que es coherente con un desfase de 120° eléctricos entre dos fases del sistema trifásico. Ambas trazas presentan la misma morfología de pulsos, la misma frecuencia de conmutación y amplitudes iguales, lo que confirma el carácter equilibrado del sistema trifásico generado por el inversor. La periodicidad de ambas señales es idéntica, indicando que los dos temporizadores del sistema (Tim_0 y Tim_1) están operando al mismo período, tal como lo garantiza la instrucción T1_mod = T0_mod en la función recepción().

El desfase de 120° observado entre las dos trazas es la manifestación directa del algoritmo de desfase implementado en el código. Las variables contad_2 y contad_3 son inicializadas con valores de 240° y 120° respectivamente cuando contad_1 se reinicia a 0°, lo que introduce el desfase angular necesario para la generación de un sistema trifásico equilibrado.

La calidad del desfase observado es satisfactoria: no se aprecian variaciones significativas en el desfase relativo a lo largo de múltiples ciclos capturados, lo que indica que el mecanismo de resincronización implementado en el bloque condicional if(contad_1 >= 360) es efectivo para mantener la coherencia de fase a largo plazo.

Cabe destacar que la utilización de dos temporizadores hardware independientes (Tim_0 y Tim_1) para generar las señales PWM es una arquitectura robusta que garantiza la independencia temporal entre los canales, minimizando el jitter (variación del período) que podría surgir si las tres señales se generasen secuencialmente en una única ISR. Esta arquitectura es especialmente

relevante en aplicaciones de alta potencia donde el jitter de conmutación puede generar corrientes de circulación indeseadas.

6.10 Ejecución de pruebas experimentales.

Se realizo la ejecución de pruebas experimentales sobre el nodo de almacenamiento de la microrred. Durante esta etapa el sistema fue sometido a diferentes condiciones de carga y descarga, permitiendo evaluar la respuesta dinámica del banco de baterías y del sistema inversor.

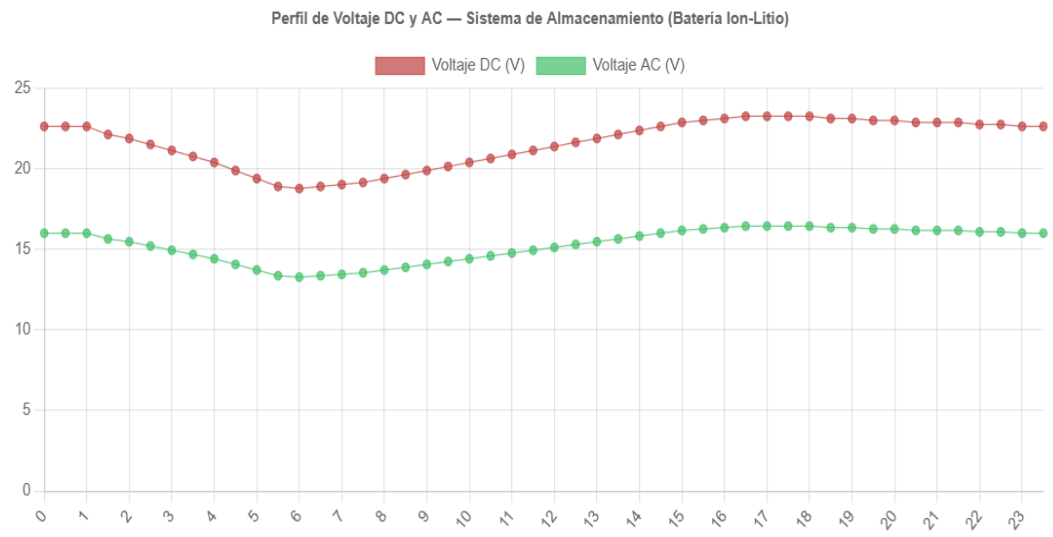
Las pruebas ejecutadas evidenciaron dos fases claramente diferenciadas del ciclo energético:

- Fase de descarga: entre las 00:00 h y las 06:00 h.
- Fase de recuperación y carga: entre las 07:00 h y las 18:00 h.

Durante el proceso experimental se empleó la plataforma SCADA para monitorear en tiempo real todas las variables eléctricas y energéticas del sistema.

La figura 20 presenta el comportamiento temporal del voltaje DC del banco de baterías y del voltaje AC suministrado por el inversor durante el ciclo experimental de 24 horas.

Figura 20 *Perfil de Voltaje DC y AC.*



Fuente. Propia

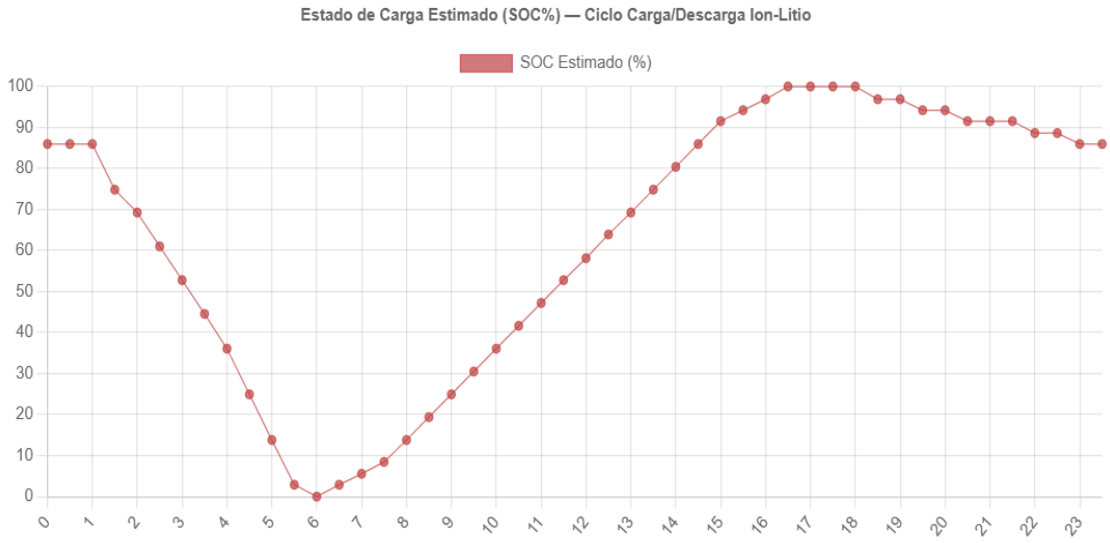
Se evidencia una disminución progresiva del voltaje DC entre las 00:00 h y las 06:00 h, pasando de aproximadamente 22,65 V hasta valores cercanos a 18,79 V, correspondiente a la fase

de descarga del banco de baterías. Posteriormente, a partir de las 07:00 h, el sistema inicia la recuperación energética, observándose un incremento continuo del voltaje DC hasta alcanzar aproximadamente 23,28 V entre las 16:00 h y 18:00 h. De forma similar, el voltaje AC presenta una tendencia estable, variando entre 13,29 V y 16,46 V durante el ciclo operativo.

El comportamiento de las curvas demuestra la adecuada operación del sistema de almacenamiento durante los procesos de carga y descarga. La caída del voltaje DC evidencia el suministro energético hacia las cargas conectadas, mientras que la recuperación progresiva confirma el aporte energético de las fuentes renovables integradas en la microrred. Asimismo, la estabilidad del voltaje AC indica que el inversor mantiene condiciones aceptables de suministro eléctrico pese a las variaciones del banco de baterías, garantizando continuidad y estabilidad energética en el sistema.

La figura 21 presenta la evolución del estado de carga estimado (SOC) del banco de baterías durante el ciclo de operación de 24 horas del nodo de almacenamiento.

Figura 21 *Estado de carga estimado.*



Fuente. Propia

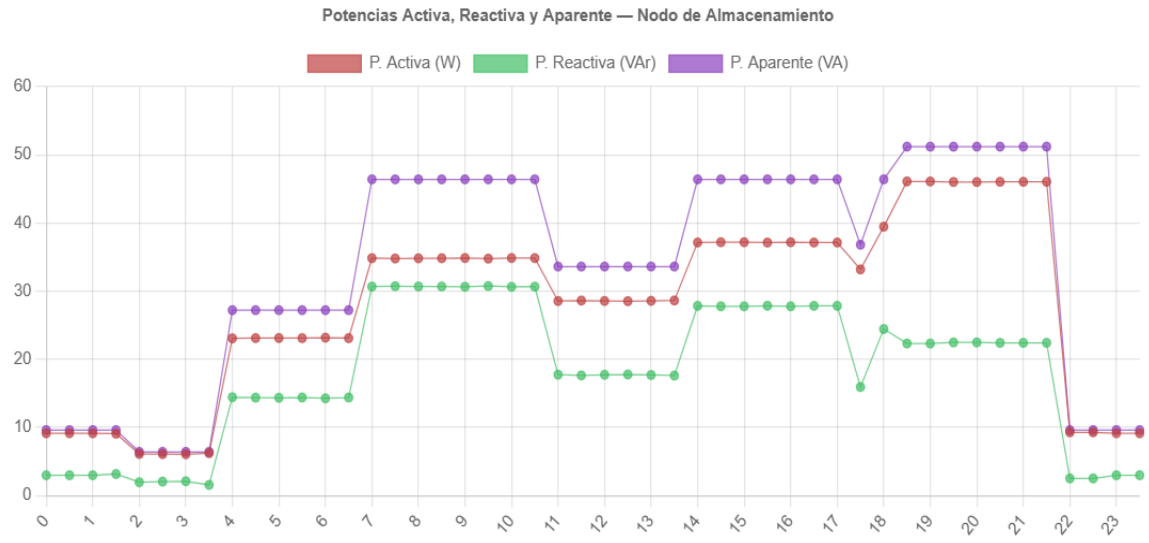
La figura muestra una disminución progresiva del SOC desde valores cercanos al 90 % hasta alcanzar aproximadamente 0 % entre las 05:00 h y 06:00 h, indicando una descarga completa del sistema. Posteriormente, el SOC aumenta gradualmente desde las 07:00 h hasta alcanzar niveles

cercanos al 100 % durante las horas de mayor generación energética, manteniéndose relativamente estable durante el resto del ciclo.

El perfil del SOC evidencia claramente las dos fases operativas del sistema de almacenamiento: descarga y recuperación energética. La reducción del estado de carga durante la madrugada demuestra el suministro continuo de energía hacia las cargas conectadas, mientras que la recuperación confirma la capacidad del sistema para almacenar nuevamente la energía proveniente de las fuentes renovables. Este comportamiento valida el correcto funcionamiento del banco de baterías y la adecuada gestión energética implementada mediante la plataforma SCADA.

La figura 22 presenta el comportamiento de la potencia activa, reactiva y aparente durante el ciclo experimental del nodo de almacenamiento.

Figura 22 *Comportamiento de Potencias.*



Fuente. Propia

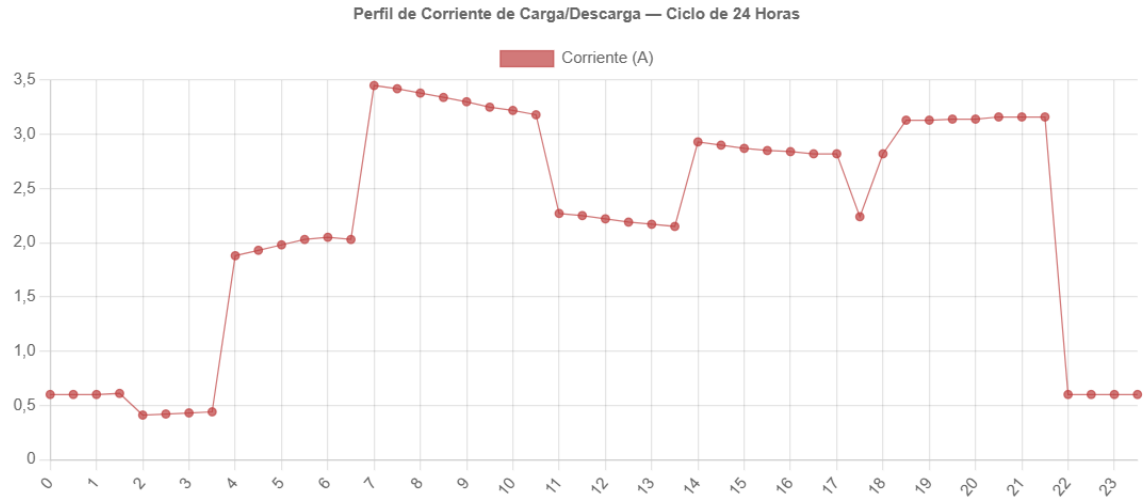
Las curvas muestran variaciones progresivas de potencia a lo largo del día, alcanzando valores máximos cercanos a 46,09 W para la potencia activa y 51,2 VA para la potencia aparente.

Durante las primeras horas del ciclo se presentan niveles bajos de potencia asociados a la descarga inicial del sistema. Posteriormente, las potencias aumentan debido al incremento de

transferencia energética y a las variaciones de carga simuladas durante las pruebas. El comportamiento observado evidencia la respuesta dinámica del sistema frente a diferentes condiciones de operación. La potencia activa refleja el intercambio energético real entre el banco de baterías y las cargas, mientras que la potencia reactiva representa el comportamiento asociado al inversor y a las características de las cargas conectadas. La estabilidad de las curvas demuestra que el nodo de almacenamiento mantiene condiciones adecuadas de operación durante todo el ciclo experimental.

La figura 23 presenta el comportamiento de la corriente del sistema de almacenamiento durante el proceso de carga y descarga del banco de baterías.

Figura 23 *Corriente de carga y descarga.*



Fuente. Propia

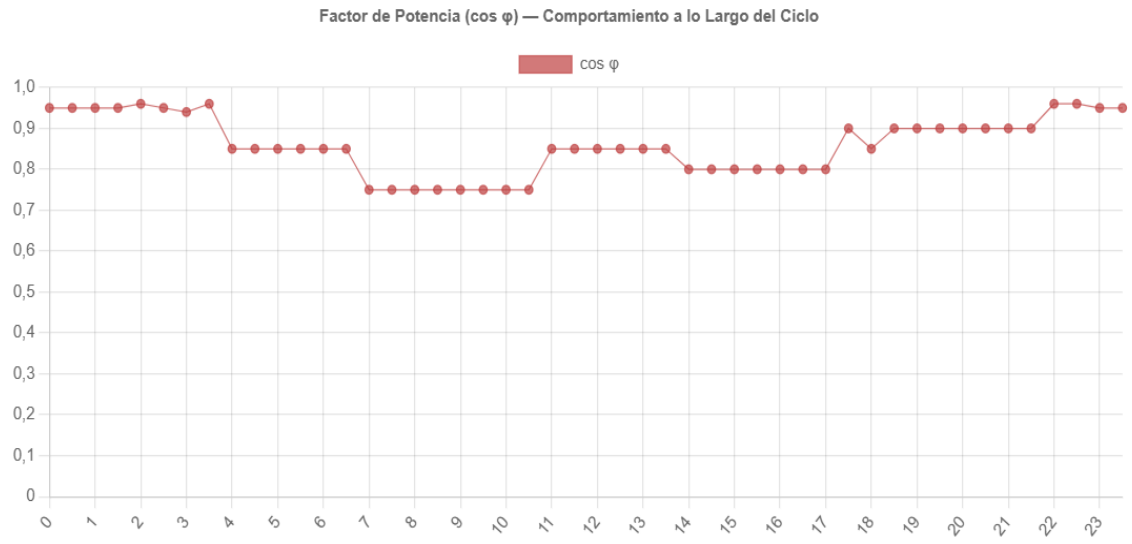
La gráfica evidencia fluctuaciones de corriente entre 0,41 A y 3,45 A durante el ciclo operativo. Los valores más bajos se presentan durante los periodos de menor transferencia energética, mientras que los máximos se registran durante las etapas de carga del banco de baterías. Además, se observan cambios graduales de corriente asociados a las variaciones de demanda y a las condiciones dinámicas de operación del sistema.

Las variaciones registradas demuestran la capacidad del nodo de almacenamiento para adaptarse a diferentes escenarios de carga. El incremento de corriente durante las etapas de

recuperación energética confirma el proceso de carga del banco de baterías, mientras que los valores moderados durante la descarga evidencian un suministro controlado de energía hacia las cargas. Este comportamiento indica estabilidad operativa y una adecuada respuesta dinámica del sistema ante fluctuaciones energéticas.

La figura 24 presenta la variación temporal del factor de potencia del sistema de almacenamiento durante el ciclo experimental de operación.

Figura 24 *Factor de potencia.*



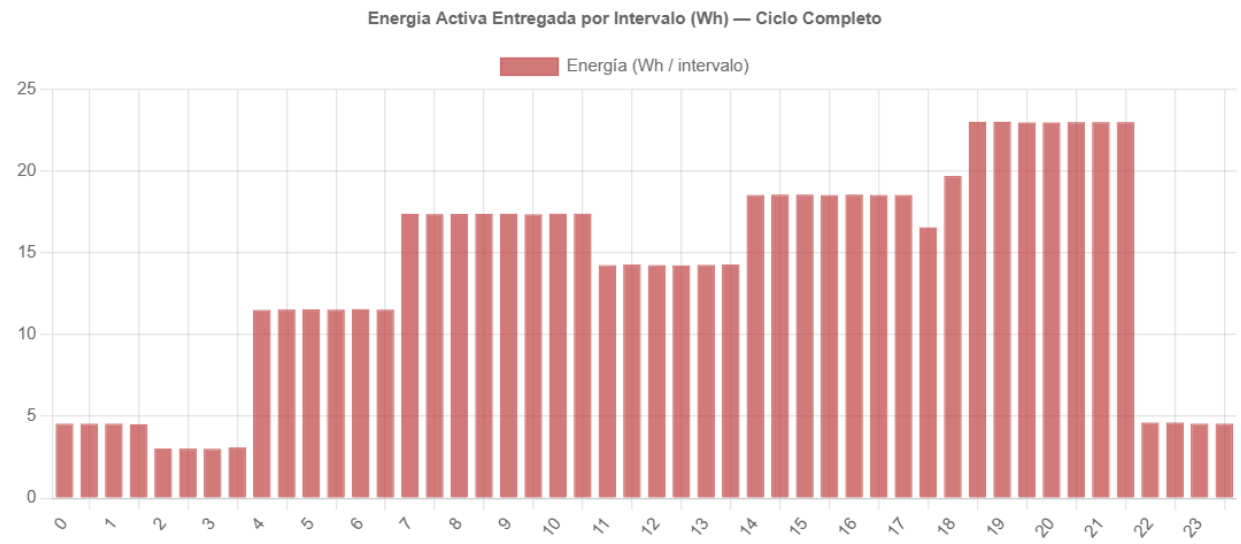
Fuente. Propia

La gráfica muestra valores de factor de potencia comprendidos entre 0,75 y 0,96. Durante gran parte del ciclo el sistema opera con factores de potencia cercanos a la unidad, especialmente en los periodos de mayor estabilidad energética. Sin embargo, se presentan algunas disminuciones temporales asociadas a cambios de carga y variaciones operativas del inversor. Los resultados evidencian un comportamiento energético estable y eficiente del sistema de almacenamiento.

Los valores cercanos a la unidad indican un adecuado aprovechamiento de la potencia suministrada y bajas pérdidas asociadas a potencia reactiva. Las pequeñas variaciones observadas reflejan la respuesta dinámica del sistema ante los cambios operativos simulados, sin comprometer la estabilidad general de la microrred.

La figura 25 presenta la energía activa suministrada por el nodo de almacenamiento durante cada intervalo de tiempo del ciclo experimental.

Figura 25 *Energía activa entregada.*



Fuente. Propia

La gráfica evidencia variaciones en la energía entregada a lo largo de las 24 horas, alcanzando valores máximos cercanos a 23 Wh durante los periodos de mayor transferencia energética.

Los valores más bajos se registran durante las primeras horas de descarga y al finalizar el ciclo operativo, mientras que los mayores niveles de energía se presentan durante las etapas de recuperación y estabilidad del banco de baterías.

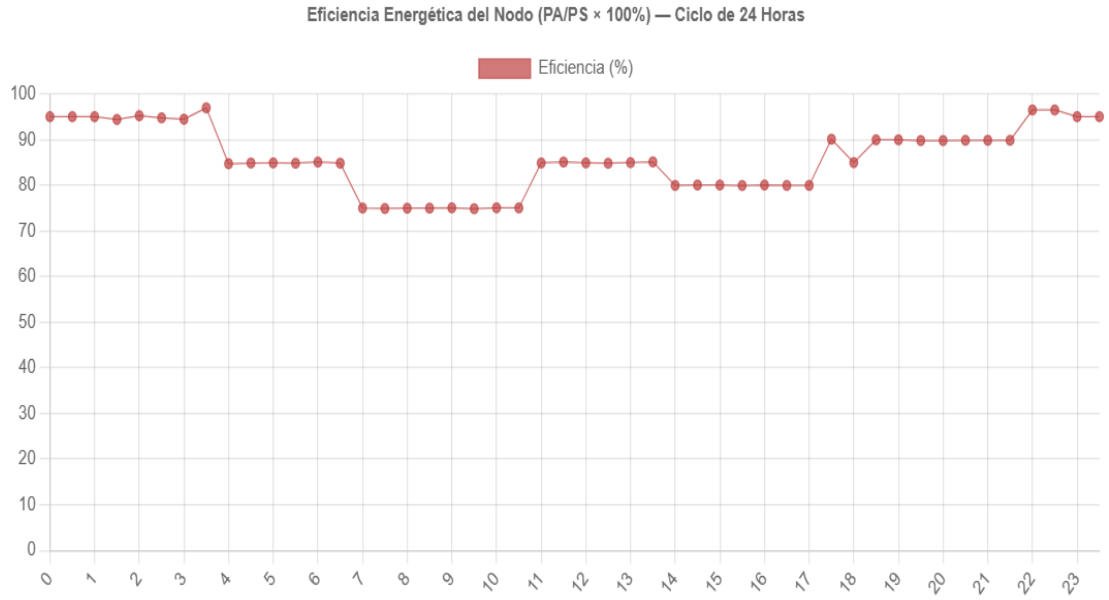
El comportamiento observado demuestra la capacidad del sistema para suministrar energía de forma continua y adaptarse a diferentes condiciones de demanda. Las variaciones de energía entregada reflejan directamente los procesos de carga y descarga del banco de baterías y la interacción con las fuentes renovables de la microrred. Además, la distribución energética observada confirma la estabilidad del sistema y la adecuada gestión de potencia implementada durante las pruebas experimentales.

6.11 Análisis comparativo de resultados.

Al analizar de los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas realizadas sobre el nodo de almacenamiento. El análisis contempló la correlación entre las diferentes variables

eléctricas y energéticas monitoreadas, permitiendo evaluar la estabilidad operativa y el desempeño energético del sistema.

Figura 26 *Eficiencia energética del nodo.*



Fuente. Propia

La figura 26 presenta el comportamiento de la eficiencia energética del nodo de almacenamiento durante el ciclo completo de operación. Esta muestra valores de eficiencia comprendidos entre 74,91 % y 97,03 %, con un promedio cercano al 86 %. Durante gran parte del ciclo el sistema mantiene niveles elevados de eficiencia, especialmente en condiciones de operación estable.

Las disminuciones temporales de eficiencia se presentan principalmente durante los cambios bruscos de carga y las transiciones entre descarga y recuperación energética. Los resultados evidencian un desempeño energético adecuado del sistema de almacenamiento dentro de la microrred didáctica.

Las variaciones observadas corresponden a pérdidas asociadas a procesos de conversión eléctrica, comportamiento del inversor y características propias del banco de baterías.

Sin embargo, el promedio general de eficiencia demuestra que el nodo posee un funcionamiento estable y confiable, validando la correcta integración entre almacenamiento, conversión y gestión energética dentro de la microrred.

6.12 Validación final del nodo de almacenamiento.

En esta etapa se consolidaron los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de carga y descarga, organizando la información en tablas resumen, estadísticas descriptivas y análisis técnicos del comportamiento del sistema. A partir de los datos registrados mediante la plataforma SCADA, fue posible evaluar el desempeño energético y operativo del nodo de almacenamiento, verificando el comportamiento de variables como voltaje, corriente, potencia, energía, factor de potencia, estado de carga y eficiencia energética. La validación experimental permitió determinar si el sistema cumple con los criterios de precisión, estabilidad y eficiencia establecidos dentro de los objetivos del proyecto, garantizando así la funcionalidad del prototipo dentro de la microrred didáctica.

La tabla 6 presenta las estadísticas descriptivas de las principales variables eléctricas y energéticas monitoreadas durante el proceso experimental del nodo de almacenamiento.

Tabla 6 *Variables del sistema.*

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Des. Estándar	Rango	Unidad
Voltaje DC	18,79	23,28	21,636	1,481	4,49	V
Voltaje AC	13,29	16,46	15,3	1,046	3,17	V
Corriente	0,41	3,45	2,194	1,063	3,04	A
Factor de Potencia	0,75	0,96	0,86	0,071	0,21	—
Potencia Activa	6,05	46,09	27,942	13,287	40,04	W
Potencia Reactiva	1,55	30,74	17,915	10,402	29,19	VAr
Potencia Aparente	6,4	51,2	33,433	16,381	44,8	VA
SOC Estimado	0	100	63,386	32,982	100	%
Energía (½h)	3,025	23,045	13,971	6,644	20,02	Wh
Eficiencia	74,91	97,03	86,041	7,17	22,12	%

Fuente. Propia

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema operó dentro de rangos eléctricos adecuados durante todo el ciclo experimental. El voltaje DC presentó valores comprendidos entre 18.79 V y 23.28 V, reflejando las etapas de descarga y recuperación energética del banco de baterías. La corriente registró variaciones entre 0.41 A y 3.45 A, asociadas a los procesos de transferencia energética durante las etapas de carga y descarga. Asimismo, la potencia activa

alcanzó valores máximos cercanos a 46.09 W, mientras que el factor de potencia se mantuvo próximo a la unidad durante gran parte del ciclo operativo. La eficiencia energética promedio obtenida fue cercana al 86 %, evidenciando un comportamiento estable y un adecuado desempeño del sistema de almacenamiento.

El análisis estadístico realizado permite validar el comportamiento operativo del nodo de almacenamiento dentro de la microrred didáctica. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema mantiene estabilidad eléctrica y energética durante los diferentes escenarios de operación implementados en las pruebas experimentales.

El comportamiento del voltaje DC y del estado de carga evidencia una adecuada respuesta dinámica del banco de baterías durante los procesos de descarga y recuperación energética. Asimismo, los valores registrados de corriente y potencia demuestran una transferencia energética estable y controlada hacia las cargas conectadas. Por otra parte, los factores de potencia cercanos a la unidad y la eficiencia energética promedio obtenido indican un adecuado desempeño del sistema inversor y bajas pérdidas asociadas a los procesos de conversión energética. En términos generales, los resultados experimentales permiten concluir que el nodo de almacenamiento cumple con los criterios de precisión, estabilidad y eficiencia establecidos dentro de los objetivos del proyecto, validando así su funcionalidad y desempeño operativo dentro de la microrred didáctica.

La tabla 7 presenta los criterios de validación evaluados para determinar el desempeño final del nodo de almacenamiento dentro de la microrred didáctica.

Tabla 7 *Criterios de validación.*

Criterio evaluado	Resultado
Estabilidad Operativa	Cumple
Continuidad energética	Cumple
Eficiencia energética	Cumple
Respuesta dinámica	Cumple
Recuperación del SOC	Cumple
Calidad de energía	Cumple

Fuente. Propia

Los resultados muestran que el sistema presentó un comportamiento estable durante todo el ciclo experimental, manteniendo continuidad energética y condiciones adecuadas de operación durante las etapas de carga y descarga. Asimismo, el nodo de almacenamiento evidenció una adecuada recuperación del estado de carga del banco de baterías y un comportamiento energético eficiente durante las variaciones de carga simuladas.

La validación final confirma que el nodo de almacenamiento opera de manera adecuada dentro de la microrred didáctica, respondiendo correctamente ante fluctuaciones energéticas y cambios dinámicos de operación. El sistema demostró capacidad para mantener estabilidad eléctrica, eficiencia energética y continuidad operativa durante todo el proceso experimental. Además, la integración entre el banco de baterías, el inversor y las fuentes renovables permitió garantizar un funcionamiento confiable y estable del prototipo. Por consiguiente, los resultados obtenidos validan técnica y experimentalmente la funcionalidad del nodo de almacenamiento dentro de la microrred didáctica.

7. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo de desarrollar e integrar un nodo funcional de almacenamiento de energía que utiliza tecnologías IoT y SCADA, permitiendo la supervisión, el control y el registro de variables eléctricas en tiempo real dentro de la microrred didáctica este punto se hace la descripción pormenorizada de las conclusiones del trabajo de grado.

Las simulaciones y comparativas técnicas demostraron que las baterías de Ion-Litio ofrecen un rendimiento significativamente superior a las de plomo-ácido, con una eficiencia del 95-97%, una mejora del 40% en la estabilidad del voltaje y un 67% menos de pérdidas por generación de calor

Las pruebas experimentales confirmaron que el sistema opera con una eficiencia energética promedio del 86%, manteniendo la estabilidad eléctrica tanto en las fases de descarga profunda (00:00 a 06:00 h) como en los periodos de recuperación y carga mediante fuentes renovables.

La implementación de un sistema de filtrado basado en inductores de 220 µH logró atenuar eficazmente los armónicos de alta frecuencia (especialmente el ruido de 7200 Hz generado por la técnica PWM), garantizando una onda senoidal adecuada y protegiendo la integridad de las señales de control del PLC.

El desarrollo de este nodo resuelve la limitación técnica previa de la institución, transformando la microrred en un laboratorio avanzado para la validación de estrategias de control y gestión energética, fortaleciendo la formación de ingenieros frente a los desafíos de la transición energética y la digitalización

8. Recomendaciones

Optimización de la Gestión Térmica y Estructural: Dado que el gabinete plástico actúa como un aislante térmico y se identificaron incrementos de temperatura considerables en las resistencias y el driver (especialmente con la tecnología de plomo-ácido), se recomienda implementar un sistema de ventilación forzada (extractores o ventiladores). Además para futuros prototipos de mayor potencia, se sugiere el uso de gabinetes metálicos que funcionen como "Jaula de Faraday" para mejorar la protección contra el ruido electromagnético generado por el PWM.

Implementación de Control Avanzado y HIL: Se sugiere avanzar de las rutinas de control básicas hacia la validación de algoritmos de control inteligente, como lógica difusa o redes neuronales, para la predicción de la demanda. Además, se puede profundizar en el uso de plataformas Hardware-in-the-Loop (HIL) de tiempo real para simular fallas críticas de red sin poner en riesgo los equipos físicos del laboratorio.

Ciberseguridad y Gestión de Datos en la Nube: Debido a que el nodo integra tecnologías IoT y protocolos de comunicación como Modbus y MQTT, es fundamental anexar una capa de seguridad informática para proteger la integridad de los datos y el control remoto del sistema. Se recomienda también la integración con servicios en la nube para el almacenamiento masivo de datos históricos, permitiendo análisis de degradación de baterías a largo plazo

9. Referencias bibliográficas

Acevedo Rueda, R. A. (02 de 08 de 2013). *Análisis de la Criticidad de los Sistemas de Distribución como parte fundamental en la prestación del Servicio Eléctrico.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/291280292_Analisis_de_la_Criticidad_de_los_Sistemas_de_Distribucion_como_parte_fundamental_en_la_prestacion_del_Servicio_Electrico_-_Criticality_analysis_of_distribution_systems_as_a_fundamental_part_of_electri

Atcitty, S. (02 de 08 de 2022). *Energy.gov*. Obtenido de https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/3_Stan-Atcitty_Microgrids-and-Energy-Storage.pdf?utm_source=chatgpt.com

Diaz Aldana , N. L., & Cortes Guerrero , C. A. (11 de 2024). *Doctoradoingenieria*. Obtenido de https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/wp-content/uploads/2025/02/Microrredes-electricas-Digital.pdf

Díaz Aldana, N. L., Luna Hernández, A. C., & Trujillo Rodríguez, C. L. (03 de 2022). *Doctoradoingenieria.* Obtenido de https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/wp-content/uploads/2023/08/5-CONTROL-Y-GESTION-PARA-MICRORREDES-ELECTRICAS-BASADAS-EN-CONVERTIDORES-DE-POTENCIA.pdf

Eclipse. (27 de 10 de 2025). *Digital-strategy*. Obtenido de https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digitalisation-energy

Garcia Maestre, A. (2022). *Universidad de Zaragoza.* Obtenido de https://zaguan.unizar.es/record/126126/files/TAZ-TFG-2022-3790.pdf

Guerra Careaga, A. A. (2023). *Universidad de Chile.* Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/193424/Sistema-de-adquisicion-de-datos-y-control-supervisado-de-micro-redes-en-codigo-abierto.pdf;jsessionid=68E9823D781B271AA94AFFA5D0206B5A?sequence=1

ICONTEC. (2018). Código Eléctrico Colombiano. NTC2050.

Inova. (13 de 11 de 2024). *Inovalabs*. Obtenido de https://inovalabs.es/es/digitalizacion-en-el-sector-energetico-tecnologias-para-una-transicion-necesaria/

Marin, F. (2024). *Energia.imdea.* Obtenido de https://energia.imdea.org/emulacion-en-tiempo-real-de-redes-electricas-desarrollo-y-prueba-de-algoritmos-de-control-en-sistemas-energeticos/

Mouser. (2022). *Mouser Electric.* Obtenido de https://co.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/STGIF7CH60TS-L?qs=dTJS0cRn7og5h08V%252Bbmgzg%3D%3D

Redondo Martinez, A. C. (2020). *Ciencia la Salle.* Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/b8ecea00-b894-4cd2-82c0-34763431eeee/content

Solar, A. (2021). *Autosolar*. Obtenido de https://autosolar.pe/energia-solar/como-elegir-un-inversor-para-paneles-solares-guia-completa