CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE NODO DE CARGA VARIABLE COMERCIAL PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO CON INTEGRACIÓN A UNA APLICACIÓN IoT-SCADA DE SUPERVISIÓN

DIEGO CARMONA CARMONA
LUIS FERNANDO LÓPEZ LÓPEZ
STIVEN HUMBERTO PÉREZ CANO

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE NODO DE CARGA VARIABLE COMERCIAL PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO CON INTEGRACIÓN A UNA APLICACIÓN IoT-SCADA DE SUPERVISIÓN

DIEGO CARMONA CARMONA
LUIS FERNANDO LÓPEZ LÓPEZ
STIVEN HUMBERTO PÉREZ CANO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista

Asesor técnico
Jose Ricardo Velasco
PhD en educación

Asesor metodológico
Bayron Álvarez
PhD en estudios organizacionales

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

Contenido

Introducción 14

1. Planteamiento del problema 16

1.1 Descripción 16

1.2 Formulación del Problema 17

2. Justificación 18

3. Objetivos 20

3.1 Objetivo General 20

3.2 Objetivos Específicos 20

4. Referentes Teóricos 21

4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia 21

4.2 Electrónica de Potencia 22

4.3 Instrumentación y adquisición de datos 23

4.4 Diseño y construcción de módulo didáctico para laboratorio de ingeniería 23

4.5 Simulación y modelado de sistemas eléctricos 24

4.6 Internet de las Cosas (IoT) 25

4.7 Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) 26

4.7 Comunicaciones industriales 27

4.8 Automatización y sistemas embebidos 28

4.9 Gestión de proyectos de ingeniería e investigación aplicada 29

5. Metodología 31

5.1 Tipo de Proyecto 31

5.2 Método de Desarrollo del Proyecto 31

5.2.1 Fase 1: Diseño del nodo de carga variable 32

5.2.2 Fase 2: Simulación del nodo de carga variable 33

5.2.3 Fase 3: Implementación del prototipo físico 34
5.2.4 Fase 4: Validación experimental del sistema 34
5.3 Instrumentos de Recolección de Información 35
5.3.1. Fuentes Primarias 35
5.3.2. Fuentes Secundarias 35
6. Resultados 36
6.1 Principio Operativo del Prototipo 36
6.2 Integración del Entorno MATLAB 37
6.3 Estructura General del Sistema 38
6.4 Alcance Técnico y Operativo 39
6.5 Etapas de Desarrollo Técnico 39
6.6 Impacto Técnico del Prototipo 71
6.7 Resultados de la propuesta 72
6.8 Resultados Técnicos y de Desarrollo del Prototipo 72
6.9 Resultados Académicos y Formativos 73
7. Conclusiones 75
8. Recomendaciones 77
Referencias Bibliográficas 78
Anexos 81

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos del Emulador 65

Lista de Figuras

Figura 1. Flujo de potencia en una microrred con nodo de carga variable 21
Figura 2. Esquema general de un convertidor de potencia integrado en una micro red 22
Figura 3. Esquema para adquisición de datos en microrred 23
Figura 4. Modelado y simulación de sistemas. 25
Figura 5. El mundo del IoT. 26
Figura 6. Control de Supervisión y Adquisición de Datos con ESCADA. 26
Figura 7. Ejemplo de un diagrama de red de comunicación eléctrica. 27
Figura 8. Control autónomo del nodo de carga variable mediante un microcontrolador conectado a sensores y al sistema IoT–SCADA). 29
Figura 9. Estructura general del sistema 38
Figura 10. Aforo de carga 40
Figura 11. Potencia activa total 41
Figura 12. Potencia reactiva total 41
Figura 13. Potencia aparente total 42
Figura 14. Impedancias y reactancias 43
Figura 15. Comparación potencia activa 44
Figura 16. Comparación potencia reactiva 44
Figura 17. Comparación potencia aparente 45
Figura 18. Curva de potencia activa calculada del nodo de carga 45
Figura 19. Curva de potencia reactiva calculada del nodo de carga 46
Figura 20. Curva de potencia aparente calculada del nodo de carga 46
Figura 21. Diagrama en bloques del nodo 47
Figura 22. Diagrama esquemático del tablero de nodo 48
Figura 23. Panel frontal 52
Figura 24. Instalación de bobinas 53
Figura 25. Cableado del prototipo 54
Figura 26. Vista final del montaje 54
Figura 27. Simulación de voltaje fase- neutro 63
Figura 28. Simulación fase-desfase 64

Figura 29. Simulación fase-fase 65
Figura 30. Curva de potencia activa 67
Figura 31. Curva de potencia reactiva 67
Figura 32. Curva de potencia aparente 67
Figura 33 Curva de factor de potencia 68

Lista de Anexos

Anexo 1. Código Matlab para importar datos realizar cálculos eléctricos y generar gráficos de potencias activas, reactivas y aparentes. 81
Anexo 2. Validación de parámetros eléctricos 84
Anexo 3. Código del inversor trifásico 87

Resumen

CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE NODO DE CARGA VARIABLE COMERCIAL PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE INVESTIGACIÓN EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO CON INTEGRACIÓN A UNA APLICACIÓN IoT-SCADA DE SUPERVISIÓN

DIEGO CARMONA CARMONA
LUIS FERNANDO LÓPEZ LÓPEZ
STIVEN HUMBERTO PÉREZ CANO

El presente trabajo de grado tiene como objetivo el diseño, simulación e implementación de un prototipo de nodo de carga variable comercial para su integración en la microrred didáctica de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo, incorporando una plataforma IoT-SCADA para la supervisión y control en tiempo real. El proyecto surge ante la necesidad de fortalecer los espacios experimentales de formación e investigación relacionados con microrredes eléctricas, automatización y sistemas eléctricos inteligentes.

El desarrollo del sistema contempla el modelado eléctrico del nodo de carga mediante herramientas de simulación en MATLAB, permitiendo analizar el comportamiento de variables como potencia activa, reactiva y aparente bajo diferentes condiciones de operación. Para la validación del modelo se realizó un aforo de cargas representativo de un entorno comercial durante un periodo de 24 horas, considerando diferentes tipos de cargas eléctricas y variaciones de demanda.

Posteriormente, se plantea la construcción física del prototipo mediante sistemas de control, instrumentación y adquisición de datos integrados a una plataforma IoT-SCADA, permitiendo la visualización y supervisión remota de variables eléctricas en tiempo real. Además, el proyecto contribuye al fortalecimiento académico y tecnológico de los laboratorios de ingeniería, facilitando el aprendizaje práctico en áreas como electrónica de potencia, automatización, comunicaciones industriales y gestión energética.

Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la viabilidad técnica del nodo de carga variable y su potencial como herramienta didáctica e investigativa para el estudio de microrredes eléctricas y sistemas energéticos inteligentes.

Palabras claves: Microrred eléctrica, Nodo de carga variable, IoT , SCADA, MATLAB, Automatización industrial, Electrónica de potencia, Supervisión en tiempo real, Sistemas embebidos, Gestión energética.

Abstract

This degree project aims to design, simulate, and implement a commercial variable load node prototype for its integration into the research and educational microgrid at Institución Universitaria Pascual Bravo, incorporating an IoT-SCADA platform for real-time monitoring and control. The project arises from the need to strengthen experimental and research environments related to electrical microgrids, automation, and intelligent power systems.

The system development includes the electrical modeling of the load node using MATLAB simulation tools, allowing the analysis of variables such as active, reactive, and apparent power under different operating conditions. To validate the model, a load survey representing a commercial environment was carried out over a 24-hour period, considering different electrical loads and demand variations.

Subsequently, the physical implementation of the prototype is proposed through control, instrumentation, and data acquisition systems integrated with an IoT-SCADA platform, enabling remote supervision and real-time visualization of electrical variables. In addition, the project contributes to strengthening the academic and technological infrastructure of the engineering laboratories, promoting practical learning in areas such as power electronics, automation, industrial communications, and energy management.

Finally, the obtained results demonstrate the technical feasibility of the variable load node and its potential as an educational and research tool for the study of electrical microgrids and intelligent energy systems.

Keywords: Electrical microgrid, Variable load node , IoT , SCADA , MATLAB , Industrial automation , Power electronics , Real-time monitoring , Embedded systems , Energy management.

Glosario

Automatización industrial: Aplicación de tecnologías de control y supervisión para operar procesos industriales de manera automática.

DAQ (Data Acquisition): Sistema encargado de adquirir y procesar señales provenientes de sensores y dispositivos de medición.

Factor de potencia: Relación entre la potencia activa y la potencia aparente de un sistema eléctrico.

Generación distribuida: Producción de energía eléctrica mediante pequeñas fuentes cercanas al punto de consumo.

IoT (Internet of Things): Tecnología que permite la conexión e intercambio de información entre dispositivos mediante redes de comunicación.

MATLAB: Herramienta computacional empleada para el modelado, simulación y análisis de sistemas eléctricos y de control.

Microrred eléctrica: Sistema eléctrico conformado por cargas, generación distribuida y sistemas de control que puede operar conectado o aislado de la red principal.

MQTT: Protocolo de comunicación utilizado en aplicaciones IoT para transmitir datos de manera eficiente.

Nodo de carga variable: Módulo eléctrico capaz de modificar la demanda de potencia de manera controlada para simular diferentes condiciones de consumo.

PLC (Controlador Lógico Programable): Dispositivo electrónico utilizado para automatizar procesos industriales mediante programación lógica.

Potencia activa: Potencia eléctrica realmente consumida por una carga para realizar trabajo útil, expresada en watts (W).

Potencia aparente: Relación total entre la potencia activa y reactiva de un sistema eléctrico, expresada en VA.

Potencia reactiva: Potencia asociada a campos magnéticos y eléctricos presentes en equipos inductivos o capacitivos, expresada en VAR.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): Sistema utilizado para supervisar, controlar y adquirir datos de procesos industriales en tiempo real.

Sensores Hall: Dispositivos utilizados para medir corriente eléctrica mediante el efecto Hall.

Sistema embebido: Sistema electrónico diseñado para realizar tareas específicas de control, monitoreo o procesamiento de datos.

Introducción

La transición hacia sistemas eléctricos más eficientes, sostenibles e inteligentes es uno de los retos tecnológicos más grandes del siglo XXI especialmente en lo que se refiere a reducir las emisiones contaminantes (Kabeyi & Olanrewaju, 2023; Alotaibi et al., 2020). Las microrredes eléctricas se han fortalecido como una solución estratégica para la incorporación de fuentes de energía renovables, sistemas de almacenamiento y métodos de control automatizado. Esto posibilita un manejo más sostenible, fiable y flexible de la energía (Hirsch, Parag & Guerrero, 2018).

Estas tecnologías mejoran la manera en que se utilizan los recursos energéticos y son un elemento fundamental para capacitar a profesionales en ingeniería eléctrica, sobre todo en lo relacionado con generación distribuida, control y automatización.

En la Institución Universitaria Pascual Bravo, en el presente no existe un laboratorio que cuente con modelos didácticos de microrredes totalmente equipados para llevar a cabo experimentos auténticos, simulaciones complejas y estudios de comportamiento eléctrico en tiempo real. Esta falta limita la habilidad de los alumnos y profesores para implementar conceptos teóricos en situaciones prácticas, además de obstaculizar el progreso de proyectos de investigación enfocados en la innovación tecnológica dentro del sector energético.

La incorporación de herramientas digitales modernas, como las plataformas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e IoT (Internet de las Cosas), esenciales para la supervisión y el control de sistemas eléctricos inteligentes, se ve obstaculizada también por la falta de un entorno apropiado para pruebas.

En respuesta a esta exigencia de formación e institucional, la propuesta actual plantea diseñar, simular, construir e integrar un prototipo de nodo de carga variable comercial; este se incorporará a la microrred didáctica investigativa del centro educativo. Este nodo posibilitará que se lleven a cabo investigaciones sobre el flujo de potencia activa y reactiva, la verificación de tácticas de control y supervisión remota a través de una interfaz IoT-SCADA, así como la representación de situaciones reales en el consumo eléctrico.

El sistema será desarrollado mediante un enfoque combinado: modelación y simulación en MATLAB, además de la implementación física del prototipo. Esto asegurará una

correspondencia entre lo que se observa en el plano teórico y lo que se experimenta (MDPI, 2017).

Este proyecto, al proporcionar un recurso didáctico versátil, modular y escalable, ayudará de manera directa a robustecer la infraestructura de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería. Asimismo, posibilitará que los alumnos participantes obtengan habilidades prácticas en control digital, comunicaciones IoT, automatización industrial, instrumentación y electrónica de potencia. Esto contribuirá a proporcionar una educación completa y contemporánea ante las demandas del sector eléctrico actual.

Este proyecto tiene como objetivo, en respuesta a esta necesidad educativa e institucional, crear, simular, construir e implementar un prototipo de nodo de carga variable comercial que se integrará a la microrred de investigación didáctica de la institución. El nodo se fundamentará en un modelo de carga de potencia constante (modelo tipo P), el cual es frecuentemente empleado en investigaciones de flujo energético para ilustrar la conducta de las cargas comerciales en sistemas eléctricos de distribución (Mina-Casaran & Echeverry, 2021).

Así, el proyecto se transforma en un instrumento de investigación y aprendizaje aplicado que conecta la teoría con la práctica, fomenta la innovación tecnológica y respalda los procedimientos institucionales de modernización académica relacionados tanto con la sostenibilidad como con la transición energética.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

Para la transición energética a nivel mundial, es necesario desarrollar redes eléctricas que sean más flexibles, eficientes y sostenibles, las cuales tengan la capacidad de combinar sistemas de control avanzados, generación distribuida y almacenamiento energético. En este contexto, las microrredes eléctricas se han consolidado como una solución tecnológica importante para incrementar la capacidad de resistencia, la eficacia y la sostenibilidad de los sistemas energéticos contemporáneos (Hirsch y otros, 2018) (Lidula & Rajapakse, 2011).

Los laboratorios experimentales de microrredes, en el campo de la formación en ingeniería eléctrica, posibilitan la validación de modelos de simulación, el análisis de flujos de potencia, el estudio de las estrategias de control y el desarrollo práctico de habilidades en sistemas eléctricos inteligentes (Kotsampopoulos y otros, 2016). No obstante, en la Institución Universitaria Pascual Bravo no se cuenta con un laboratorio didáctico que incorpore una microrred experimental que cuente con módulos de generación, almacenamiento y cargas controlables. Esta restricción disminuye las posibilidades de que los alumnos y profesores lleven a cabo experimentos reales, verifiquen modelos teóricos y desarrollen proyectos de investigación aplicada en campos vinculados con control de sistemas eléctricos inteligentes, generación distribuida y automatización energética. (Lidula & Rajapakse, 2011).

La falta de infraestructura experimental restringe el avance de prácticas académicas vinculadas con la integración de cargas controlables, la supervisión en tiempo real de variables eléctricas, el análisis de flujos de potencia y la implementación de estrategias para el control. Además, complica la inclusión de tecnologías emergentes como son los sistemas SCADA y el Internet de las cosas (IoT), que se emplean con frecuencia en los modernos sistemas eléctricos para gestionar la energía de manera inteligente (Akpolat y otros, 2021).

En este marco, la falta de plataformas experimentales que posibiliten el estudio del comportamiento de cargas eléctricas en una microrred restringe la evolución de investigaciones vinculadas a la gestión de la demanda energética, a cómo se relacionan el consumo eléctrico y la generación distribuida, además de a cómo se validan las tácticas de control y supervisión en tiempo real. La disponibilidad de módulos didácticos que simulen nodos de carga variables

posibilitaría la recreación de las condiciones reales de operación dentro de la microrred y facilitaría el estudio del funcionamiento del sistema frente a variaciones en la demanda eléctrica.

Por lo mencionado, es esencial crear soluciones experimentales que fortalezcan la infraestructura de laboratorio para investigar microrredes en la Institución Universitaria Pascual Bravo. Específicamente, el diseño y la implementación de un nodo de carga variable que se integre a una plataforma de supervisión IoT-SCADA podría ayudar a extender las capacidades experimentales del laboratorio. Esto haría posible examinar cómo se comportan las cargas eléctricas, confirmar modelos de simulación y crear prácticas académicas enfocadas en investigar sistemas eléctricos inteligentes.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo simular y construir un prototipo de nodo de carga variable que pueda integrarse a la microrred didáctica y de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo, empleando herramientas de simulación eléctrica y plataformas IoT–SCADA para su supervisión, control y análisis en tiempo real?

2. Justificación

El desarrollo de este proyecto se respalda por diversas razones esenciales que abarcan el ámbito académico, institucional, técnico, social e investigativo. Se presentan a continuación los principales argumentos:

Se justifica dada su importancia técnica y de la transición energética puesto que a nivel mundial, el tránsito hacia sistemas de energía más sostenibles y descentralizados requiere que se desarrollen soluciones como las microrredes, que hacen posible la integración de fuentes renovables, almacenamiento y cargas controladas. Esto mejora la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema eléctrico (Elvira et al., 2018).

La implementación en el laboratorio de la institución universitaria Pascual Bravo de un módulo didáctico de un nodo de carga variable comercial permite simular, analizar y controlar comportamientos de carga reales, lo cual es de gran ayuda con dichos objetivos técnicos.

Es el ámbito académico, la capacidad de los alumnos para enlazar la teoría con la práctica, optimizar sus habilidades en IoT-SCADA, generación distribuida, control y gestión de redes eléctricas modernas se ve favorecida de manera notable al incluir plataformas de microredes en los programas de ingeniería, según investigaciones recientes (Bano et al., 2024).

El proyecto contribuirá a consolidar el laboratorio de la Institución Universitaria Pascual Bravo, al proporcionarle un recurso práctico que posibilitará a los alumnos y profesores realizar experimentos con cargas variables, supervisión en tiempo real y control de microredes. Esto mejorará la calidad de la enseñanza y la investigación aplicada.

Además, se justifica por el beneficio que aporta a la comunidad educativa y la población de la institución; los beneficiarios abarcan a estudiantes de pregrado (de ingeniería eléctrica y áreas relacionadas), profesores y grupos de investigación pertenecientes a la institución. La integración del prototipo físico a la microrred didáctica fomentará una cultura de innovación, aprendizaje activo y habilidades prácticas. Además, la institución misma se verá fortalecida al contar con un laboratorio de microrredes, lo cual puede atraer proyectos de investigación, colaboraciones con la industria y visibilidad académica.

Según Restrepo-Zambrano et al. (2016) los ambientes de laboratorio modular para microrredes posibilitan la experimentación con diferentes situaciones operativas (modo conectado, modo isla,

cambios en la carga, generación renovable) y el chequeo de tácticas de control, supervisión y comunicación. (Restrepo-Zambrano et al., 2016)

Este proyecto, específicamente, posibilitará el diseño, la simulación y la construcción de un nodo de carga variable que se incorporará en el ambiente didáctico-experimental. Esto permitirá llevar a cabo análisis de datos, crear entornos de prueba, controlar con IoT–SCADA y establecer estrategias de supervisión en tiempo real. Esto lo convierte en una herramienta valiosa tanto para la docencia como para la investigación.

En cuanto a la viabilidad y escalabilidad, la puesta en marcha de un módulo específico (nodo de carga variable comercial) es una solución factible, en términos técnicos, económicos y de tiempo, que la edificación desde cero de una microrred completa. La propuesta permite un enfoque escalonado: inicialmente el prototipo y después su integración y progreso, lo que hace más sencillo que sea asimilado a nivel institucional. El módulo, a la vez, es lo suficientemente flexible para crecer en el futuro (almacenamiento y generación distribuida) y para producir resultados que puedan ser aplicados en otros entornos. Asimismo, el diseño y la construcción del prototipo físico posibilitan que los alumnos afronten desafíos auténticos de instrumentación, instalación, validación e integración IoT-SCADA.

Por último, el proyecto es una contribución al ambiente socioeconómico de la comunidad, dado que los profesionales que estén en formación con esta experiencia estarán más preparados para trabajar en campos como la generación de energía, las microrredes y el análisis de sistemas de potencia. gestión de energía y automatización industrial, que está en consonancia con las exigencias actuales del país y del mercado laboral en lo que respecta a la energía sostenible. Esto reafirma la relevancia del proyecto a escala regional.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar, simular e implementar un prototipo de nodo de carga variable comercial para su integración en la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, empleando plataforma IoT-SCADA.

3.2 Objetivos Específicos

Diseñar el modelo conceptual y eléctrico del nodo de carga variable comercial para su integración en la microrred didáctica de la institución.

Simular en MATLAB el comportamiento eléctrico del nodo de carga variable bajo diferentes condiciones operativas dentro de la microrred didáctica.

Implementar el prototipo físico del nodo de carga variable integrado a una plataforma IoT-SCADA para la supervisión y control en tiempo real de las variables eléctricas del sistema.

Validar experimentalmente el funcionamiento del nodo de carga variable mediante pruebas virtuales y físicas dentro de la microrred didáctica.

4. Referentes Teóricos

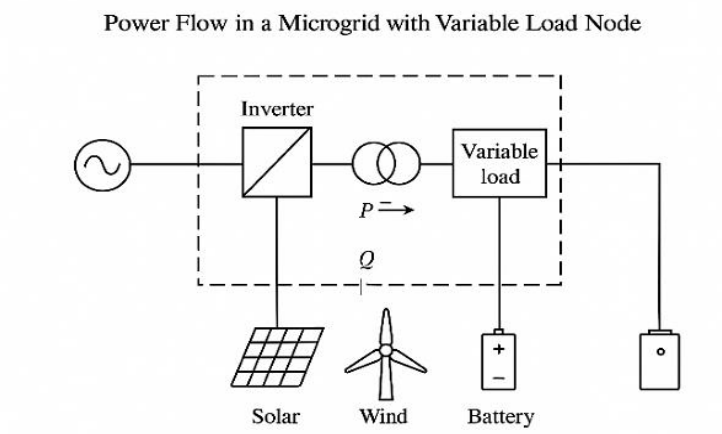
4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos por los elementos responsables de la producción, transmisión, distribución y uso de energía eléctrica. El estudio incluye el análisis de los principios eléctricos básicos, los flujos de potencia entre las fuentes y las cargas, así como la dinámica de los elementos que componen el sistema.

El análisis de potencia es particularmente importante en el contexto de las microrredes eléctricas, ya que estas incluyen fuentes **renovables** distribuidas (turbinas eólicas y paneles solares), sistemas de almacenamiento (baterías) y cargas controladas (fijas o variables), todos ellos conectados mediante convertidores electrónicos de potencia. En estos sistemas, el flujo de potencia tiene que mantenerse balanceado entre la generación, el almacenamiento y la demanda para asegurar la estabilidad, la calidad de la energía y la confiabilidad de la red (Linus Lawrenz, 2018).

Los parámetros eléctricos del sistema, como la frecuencia, el factor de potencia, la tensión RMS y las pérdidas por efecto Joule, se ven afectados directamente por el comportamiento de las cargas en una microrred, especialmente aquellas de tipo industrial o comercial. Por lo tanto, es fundamental entender los flujos de potencia reactiva y activa para crear estrategias de supervisión y control que optimicen el funcionamiento del sistema (Kundur, 1994).

Figura 1. *Flujo de potencia en una microrred con nodo de carga variable*



Fuente. Kundur (1994) y Lawrenz (2018).

Entender los sistemas eléctricos de potencia dentro de este proyecto hace posible el análisis del efecto que tiene el nodo con carga variable sobre la estabilidad energética de la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El flujo de potencia se puede modelar en tiempo real y el desempeño del sistema frente a cambios en la carga, modos de operación (isla o conectado) y condiciones de generación distribuida se puede evaluar utilizando simulaciones en entornos como MATLAB

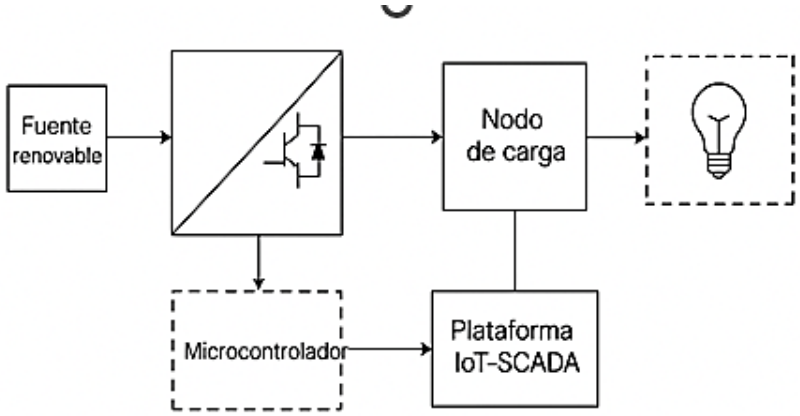
4.2 Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia se encarga del control y conversión eficiente de la energía eléctrica mediante el uso de dispositivos semiconductores como IGBT, MOSFET y tiristores. Su función principal es adaptar los niveles de tensión y corriente a las necesidades de distintas aplicaciones (Frede Blaabjerg, 2018).

En las microrredes eléctricas, estos convertidores actúan como interfaces entre las fuentes renovables, los sistemas de almacenamiento y las cargas, permitiendo regular la potencia activa y reactiva, estabilizar la tensión del sistema y garantizar una operación confiable (Rashid, 2017).

En el proyecto del **nodo de carga variable comercial**, la electrónica de potencia permite simular cargas dinámicas mediante controladores y técnicas PWM, posibilitando el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones de demanda. Además, su integración con plataformas IoT–SCADA facilita la supervisión y control en tiempo real, fortaleciendo la enseñanza práctica y la investigación aplicada.

Figura 2. *Esquema general de un convertidor de potencia integrado en una micro red*



Fuente. Imagen de Blaabjeg.

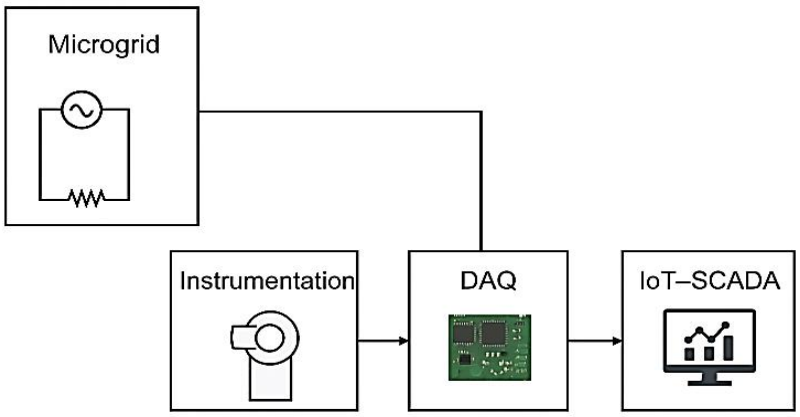
4.3 Instrumentación y adquisición de datos

La instrumentación y adquisición de datos constituyen la base para el monitoreo y control de variables eléctricas en sistemas de potencia. Su objetivo es medir magnitudes como corriente, tensión, potencia y frecuencia, mediante sensores y transductores que convierten las señales analógicas en digitales para su procesamiento (Ernest O. Doebelin, 2017).

En el contexto de las microrredes, la correcta selección e integración de dispositivos de medición —como sensores Hall, transformadores de corriente y módulos de adquisición (DAQ)— permite evaluar el rendimiento energético y detectar fallos o desequilibrios en tiempo real (Prabir Mitra).

Dentro del proyecto del nodo de carga variable comercial, estos sistemas facilitan la supervisión continua del comportamiento eléctrico del módulo, integrándose con plataformas IoT–SCADA para la visualización y registro de datos, lo que fortalece los procesos didácticos y de investigación aplicada.

Figura 3. *Esquema para adquisición de datos en microrred*



Fuente. Imagen de Google.

4.4 Diseño y construcción de módulo didáctico para laboratorio de ingeniería

El propósito del módulo didáctico es proporcionar la posibilidad de experimentar en la práctica con cargas variables en una microrred eléctrica educativa, lo cual posibilita el desarrollo de habilidades en áreas como control, instrumentación, gestión energética y electrónica de potencia.

El diseño del módulo se basa en la modularidad, flexibilidad operativa y los principios de seguridad eléctrica, lo que asegura su conexión segura con otros componentes de laboratorios y su aplicación pedagógica en prácticas de ingeniería.

Este sistema educativo promueve un aprendizaje activo que se fundamenta en la observación directa de fenómenos eléctricos y la experimentación, lo cual favorece el entendimiento de los flujos de potencia, la modulación de cargas y la interacción entre sistemas eléctricos reales y dispositivos electrónicos.

Además, el módulo tiene más potencial de aplicación al integrarse con plataformas IoT-SCADA, lo que posibilita el análisis remoto de datos, la validación de estrategias de control y la automatización de pruebas (Juan Carlos Gómez, 2022).

4.5 Simulación y modelado de sistemas eléctricos

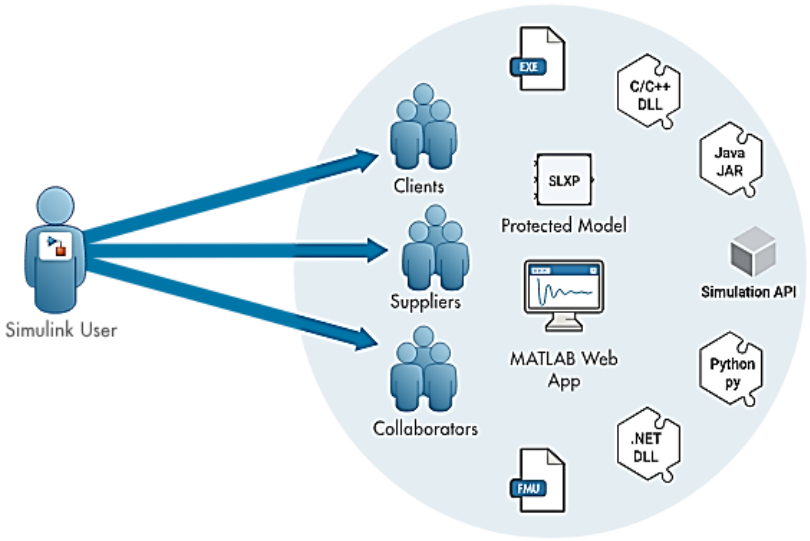
El modelado y la simulación de sistemas eléctricos posibilitan el estudio del comportamiento dinámico de los componentes que integran una red de potencia antes de su puesta en marcha física. La evaluación del rendimiento de circuitos, dispositivos electrónicos y estrategias de control bajo distintas condiciones operativas se puede llevar a cabo con herramientas como MATLAB, PSCAD o PowerWorld.

La simulación juega un papel crucial en el ámbito de las microrredes didácticas, ya que permite validar los parámetros eléctricos del nodo de carga variable comercial, entre ellos la estabilidad del sistema, la respuesta transitoria a cambios de carga y los flujos de potencia activa y reactiva.

Estas representaciones informáticas hacen que entender fenómenos eléctricos complejos sea más sencillo y disminuyen los riesgos vinculados a las pruebas experimentales (MathWorks, 2025).

Asimismo, el empleo de modelos dinámicos y controladores digitales incorporados en el ambiente Simulink posibilita la simulación de la interacción entre las cargas, los sensores y los convertidores de potencia. Esto optimiza la calibración y el diseño del sistema antes de que se integre en el laboratorio educativo de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

Figura 4. *Modelado y simulación de sistemas.*



Fuente. Imagen de Google.

4.6 Internet de las Cosas (IoT)

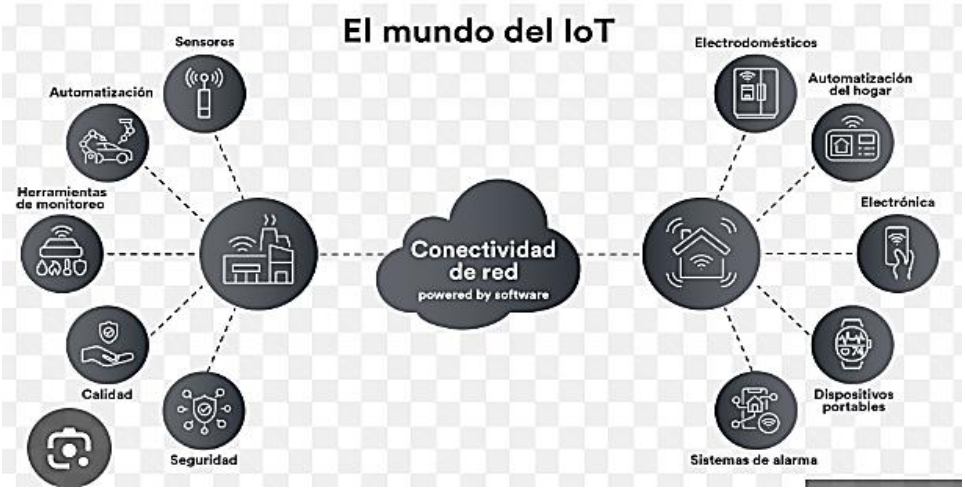
El Internet de las Cosas (IoT) hace posible que los dispositivos físicos se conecten entre sí por medio de redes digitales, lo cual posibilita la recolección, el envío y el análisis de datos en tiempo real. La IoT, en el marco de las microrredes eléctricas, optimiza la supervisión y el control a distancia de las variables eléctricas. Esto permite una mejor detección de fallos y una toma de decisiones fundamentada en datos, así como una mejora de la eficiencia operacional. (L. Iera, 2010).

La implementación de tecnologías IoT en este proyecto posibilitará la comunicación entre el nodo comercial de carga variable y la plataforma SCADA, por medio de protocolos de comunicación (por ejemplo Modbus TCP/IP o MQTT), microcontroladores y sensores.

Esto hace posible que la información eléctrica se visualice en tiempo real, que los parámetros se ajusten de manera remota y que la carga sea gestionada de forma independiente dentro de la microrred didáctica (Zanella y otros, 2014).

La incorporación de la IoT en contextos educativos, más allá de su valor técnico, promueve habilidades relacionadas con el análisis de datos, la conectividad y la automatización; estos son elementos esenciales para formar ingenieros eléctricos en la época digital.

Figura 5. *El mundo del IoT.*

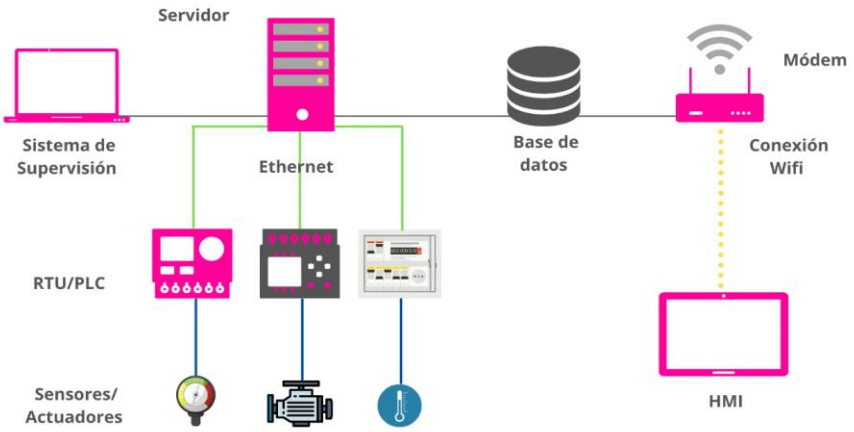


Fuente. Genetec.

4.7 Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)

Las plataformas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) son sistemas que posibilitan el monitoreo y la regulación en tiempo real de procesos industriales e infraestructuras críticas, como por ejemplo las redes eléctricas y microrredes. Por lo general, un sistema SCADA está compuesto por: un sistema de comunicación, una estación maestra con la interfaz de operador (HMI), sensores o transductores y RTU/IED (Unidades Terminales Remotas / Dispositivos Electrónicos Inteligentes).

Figura 6. *Control de Supervisión y Adquisición de Datos con ESCADA.*



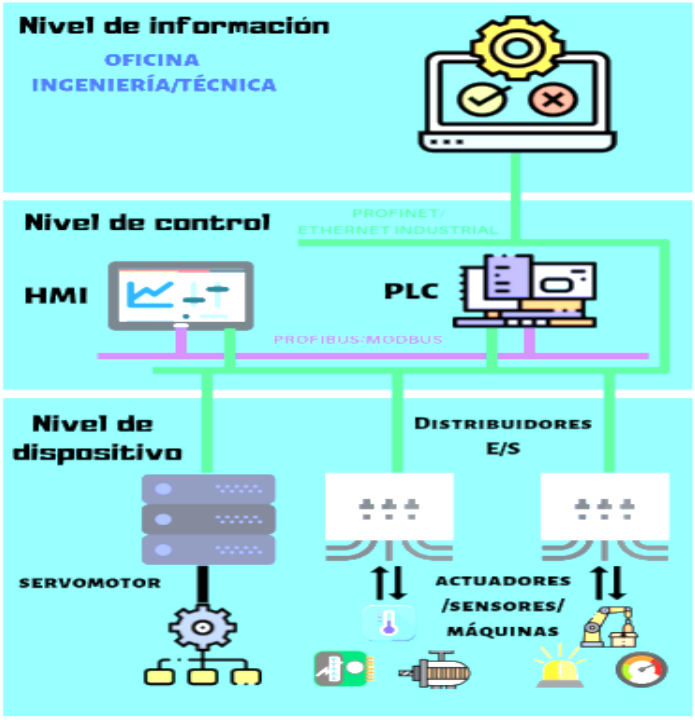
Fuente. Nunsys Group.

La incorporación de IoT–SCADA en el marco de una microrred educativa permite la recopilación ininterrumpida de datos (potencia, tensión, corriente), el control a distancia del nodo con carga variable y el registro histórico para análisis e investigación. Para poner en práctica SCADA de manera eficaz y segura, es necesario tener en cuenta también las normas de comunicación (como la IEC 61850) y las mejores prácticas de ciberseguridad (A, 2009) (Güngör, 2009).

4.7 Comunicaciones industriales

Las comunicaciones industriales posibilitan que los dispositivos, controladores y sistemas de supervisión se interconecten entre sí de manera fiable en contextos automatizados. En una microrred didáctica, estas comunicaciones aseguran la transmisión constante de información entre controladores embebidos, sensores, nodos de carga e interfaces SCADA o IoT.

Figura 7. *Ejemplo de un diagrama de red de comunicación eléctrica.*



Fuente. Centro de formación técnica para la industria

Protocolos como TCP/IP, Modbus y MQTT tienen un uso extenso.

- Modbus destaca por su simplicidad y compatibilidad con PLCs e instrumentos industriales.
- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) se usa en aplicaciones IoT por su eficiencia en el envío de datos a través de redes con ancho de banda limitado.
- TCP/IP, por su parte, proporciona la base para integrar todos los dispositivos en una infraestructura de red estandarizada.
-

La latencia, la fiabilidad y la seguridad de la red dependen directamente del diseño de una arquitectura de comunicación apropiada; estos elementos son fundamentales para conservar la estabilidad operativa del sistema eléctrico.

4.8 Automatización y sistemas embebidos

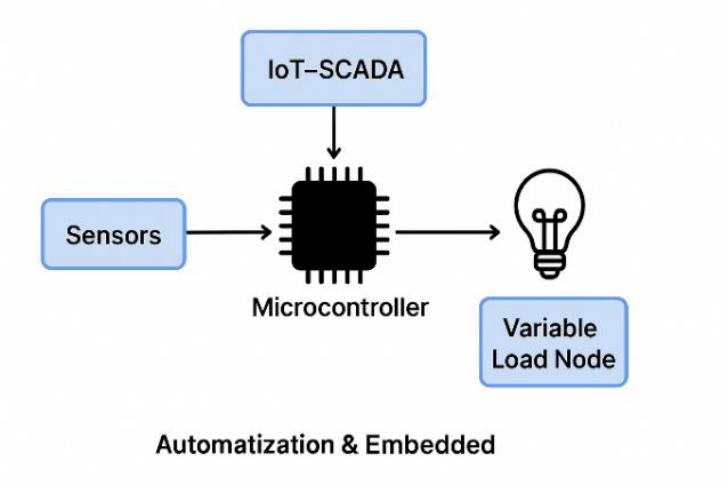
La automatización en sistemas eléctricos posibilita que los procedimientos se lleven a cabo de manera autónoma y eficaz, lo cual disminuye el involucramiento humano y mejora la exactitud operativa. La integración de sistemas embebidos, como PLCs, microcontroladores Arduino o ESP32, permite la supervisión en tiempo real de variables como voltaje, corriente, potencia y factor de carga, lo que habilita el control local del nodo con carga variable.

Los sistemas embebidos funcionan como unidades de procesamiento especializadas que pueden ejecutar algoritmos de comunicación y control utilizando protocolos como TCP/IP, MQTT o Modbus, asegurando así la interoperabilidad con plataformas IoT-SCADA.

Su programación, como por ejemplo en ambientes como Arduino IDE o TIA Portal, facilita la creación de lógicas de operación autónoma que mejoran el rendimiento del sistema frente a fluctuaciones de carga o alteraciones en la demanda de energía.

Así, el uso de sistemas embebidos y automatización en el nodo de carga variable ayuda a que los estudiantes aprendan de manera práctica sobre control, comunicación e instrumentación industrial. Esto refuerza sus habilidades para crear tecnologías que se aplican a la transición energética (ESPRESSIF, 2020).

Figura 8. *Control autónomo del nodo de carga variable mediante un microcontrolador conectado a sensores y al sistema IoT–SCADA).*



Fuente. Imagen de chat GPT

4.9 Gestión de proyectos de ingeniería e investigación aplicada

Administrar proyectos de ingeniería significa implementar métodos, herramientas y principios enfocados en planificar, coordinar, llevar a cabo y supervisar los recursos necesarios para lograr metas técnicas específicas. En el marco de la investigación aplicada, esta gestión combina métodos científicos y tecnológicos con prácticas de administración de proyectos, garantizando que los resultados sean factibles, transferibles al ámbito industrial o académico y reproducibles (Kerzner, 2017).

La planificación de proyectos tecnológicos, por ejemplo la creación y diseño de un nodo de carga variable que esté integrado en una microrred didáctica, necesita un enfoque estructurado que contemple fases de inicio, diseño, implementación, seguimiento y cierre. Cada etapa debe estar en consonancia con los lineamientos de la institución y con metodologías estandarizadas, como el PMBOK (Project Management Body of Knowledge), o enfoques ágiles, como Scrum o Kanban, que se ajusten a la naturaleza experimental de los proyectos ingenieriles (Institute, 2021).

Asimismo, incorporar métodos de investigación aplicada asegura que los resultados del proyecto no solamente tengan utilidad, sino que también aporten al saber técnico y científico. Para hacer seguimiento del progreso y optimizar los recursos, el uso de instrumentos de gestión

como cronogramas, diagramas de Gantt y matrices de riesgos resulta útil (Timothy J. Kloppenborg, 2019).

En el marco de este proyecto, una gestión apropiada garantiza que el desarrollo del prototipo del nodo de carga variable se ajuste a los plazos, requerimientos técnicos y estándares de seguridad; además de producir documentación que respalde la validación del diseño y sus usos en la educación.

5. Metodología

5.1 Tipo de Proyecto

Este trabajo es un proyecto de desarrollo experimental, pues su objetivo central es diseñar, simular, implementar y validar un prototipo funcional de nodo de carga variable comercial que sea capaz de incorporarse a la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo usando una plataforma para supervisión IoT-SCADA. El uso de saberes científicos y tecnológicos para crear soluciones útiles, prototipos o sistemas funcionales que posibiliten analizar su funcionamiento en situaciones reales o controladas es lo que distingue a los proyectos de desarrollo experimental. En el campo de la ingeniería eléctrica, este tipo de proyectos normalmente implica diseñar modelos, simular el sistema y desarrollar prototipos experimentales, los cuales se validan más tarde por medio de pruebas técnicas (Borky & Bradley, 2018).

En el ámbito de las microrredes eléctricas, la creación de plataformas experimentales en laboratorio es un procedimiento que se emplea mucho para la investigación y la educación académica. Según Vijay y Doolla (2017), estas plataformas posibilitan el estudio de la conducta de sistemas energéticos en diversas condiciones operativas, la validación de modelos simulados y el análisis de fenómenos eléctricos reales. Además, la puesta en marcha de sistemas de supervisión que se basan en tecnologías SCADA e IoT permite obtener información en tiempo real y examinar el rendimiento del sistema eléctrico a través de herramientas digitales para el control y monitoreo (Vargas-Salgado y otros, 2019).

En esta situación, el proyecto se considera un desarrollo experimental porque su resultado final es la implementación y validación de un prototipo funcional. Este último mejorará la infraestructura educativa del laboratorio de microrredes de la institución y respaldará las tareas de investigación aplicada y formación en sistemas eléctricos inteligentes.

5.2 Método de Desarrollo del Proyecto

El método de desarrollo del proyecto se articula mediante una perspectiva secuencial de ingeniería, que incorpora fases de modelado y simulación, diseño conceptual, implementación física y validación experimental del sistema.

Este enfoque metodológico es habitual en proyectos de ingeniería eléctrica que buscan desarrollar prototipos y plataformas experimentales, porque posibilita asegurar la coherencia entre el modelo teórico del sistema, los resultados logrados a través de simulación y el desempeño real del prototipo creado (Peterson, 2019). Así, el proceso metodológico hace posible detectar eventuales desviaciones entre la implementación física y el modelo, lo que permite efectuar correcciones previas a la validación final del sistema.

Según varios estudios, la integración de plataformas de experimentación física con herramientas de simulación como MATLAB es una estrategia efectiva para examinar el funcionamiento de los sistemas energéticos distribuidos y evaluar distintas tácticas de supervisión y control en el contexto de las microrredes eléctricas (Restrepo-Zambrano et al., 2016)

A partir de lo mencionado anteriormente, el desarrollo metodológico del proyecto en cuestión se divide en cuatro etapas sucesivas, cada una vinculada con uno de los objetivos particulares del estudio: en primer lugar, el diseño del nodo de carga variable; luego, la simulación del sistema; después, la creación del prototipo físico y su integración a la plataforma IoT-SCADA; y por último, la verificación experimental del sistema dentro de la microrred didáctica.

5.2.1 Fase 1: Diseño del nodo de carga variable

En esta etapa, que está vinculada con el objetivo específico 1, se lleva a cabo la definición conceptual y eléctrica del nodo de carga variable comercial que se incorporará a la microrred didáctica. El objetivo es definir la estructura del sistema, los parámetros eléctricos de operación y los elementos requeridos para su posterior implementación.

Las siguientes son las actividades que se llevan a cabo en esta etapa:

Análisis de requerimientos del sistema

Se determinan las condiciones de funcionamiento del nodo en la microrred didáctica, tomando en cuenta variables eléctricas como la potencia activa, la reactiva, la corriente y el voltaje. Se examinan, además, las exigencias de supervisión, control y comunicación que son imprescindibles para la integración con la plataforma IoT-SCADA.

Definición del modelo conceptual del nodo

Se define la estructura general del sistema, determinando los subsistemas fundamentales que constituyen el nodo de carga variable, como son el sistema de control, el sistema de potencia y el sistema de adquisición de datos.

Diseño del modelo eléctrico del nodo

Se define el circuito eléctrico del nodo de carga variable, estableciendo los circuitos de potencia, los elementos de control y las partes de medición requeridas para la supervisión de las variables eléctricas.

Selección de componentes y arquitectura del sistema

Se eligen los elementos electrónicos, eléctricos y de comunicación que integrarán el prototipo, como módulos de comunicación, sensores, componentes de protección eléctrica y dispositivos de control.

5.2.2 Fase 2: Simulación del nodo de carga variable

En esta etapa, la cual está vinculada al objetivo específico 2, se elabora un modelo de simulación del nodo de carga variable mediante el ambiente MATLAB. El fin es estudiar su funcionamiento eléctrico en distintas circunstancias operativas dentro de la microrred didáctica.

Las actividades principales son:

Desarrollo del modelo de simulación

En el ambiente MATLAB/Simulink se lleva a cabo la implementación del modelo matemático y eléctrico del nodo de carga variable, mediante bloques funcionales que den cuenta de los diversos componentes del sistema eléctrico.

Configuración de parámetros eléctricos

Se establecen las características de funcionamiento del sistema, como los perfiles de potencia, los niveles de tensión, las corrientes operativas y las propiedades de las cargas eléctricas que se simularán.

Simulación de escenarios operativos

Se llevan a cabo diversas simulaciones para mostrar cambios en las condiciones de carga dentro de la microrred, con el objetivo de ver cómo se comporta el nodo ante fluctuaciones en la demanda eléctrica.

Análisis de resultados de simulación

Se examinan las variables eléctricas que se recopilan durante las simulaciones, considerando cómo se comporta el nodo en cuanto a la estabilidad, la reacción frente a cambios de carga y su compatibilidad con el funcionamiento de la microrred didáctica.

5.2.3 Fase 3: Implementación del prototipo físico

La creación del prototipo físico del nodo de carga variable y su integración con una plataforma IoT-SCADA para el monitoreo y control en tiempo real de las variables eléctricas del sistema es la etapa vinculada al objetivo específico 3.

Las actividades desarrolladas incluyen:

Construcción del circuito de potencia

Se lleva a cabo la instalación física de los circuitos eléctricos que integran el nodo de carga variable, empleando los componentes que se eligieron anteriormente en la etapa de diseño.

Implementación del sistema de control

Se establecen los aparatos de control y adquisición de datos que posibilitarán la supervisión de las variables eléctricas del sistema y el manejo del funcionamiento del nodo de carga.

Integración con la plataforma IoT-SCADA

La comunicación se establece entre la plataforma de supervisión IoT-SCADA y el prototipo físico, lo que posibilita tanto la visualización en tiempo real de las variables como la transmisión de datos eléctricos.

Configuración del sistema de supervisión

Las interfaces de monitoreo se implementan en la plataforma SCADA, lo que posibilita observar variables como el estado operativo del nodo, la potencia, la corriente, la tensión y el factor de potencia.

5.2.4 Fase 4: Validación experimental del sistema

El último paso vinculado con la meta concreta 4 del proyecto es la verificación experimental de cómo trabaja el nodo de carga variable en la microrred didáctica, a través de pruebas tanto físicas como virtuales que posibiliten medir su rendimiento.

Las actividades desarrolladas son:

Definición de escenarios de prueba

Se crean diversas condiciones de operación para que se pueda evaluar el desempeño del nodo bajo oscilaciones de carga típicas de entornos comerciales.

Ejecución de pruebas experimentales

Se llevan a cabo ensayos con el prototipo físico incorporado en la microrred didáctica, mientras se registran las variables eléctricas del sistema durante su funcionamiento en diferentes condiciones.

Comparación entre resultados simulados y experimentales

Con el objetivo de confirmar la consistencia entre el modelo teórico y la conducta real del sistema, se contrastan los resultados que se obtuvieron en la simulación con los datos experimentales del prototipo.

Evaluación del desempeño del nodo en la microrred

Se examina el desempeño del nodo de carga variable en cuanto a su estabilidad, respuesta frente a variaciones de carga y compatibilidad con la operación de la microrred didáctica.

5.3 Instrumentos de Recolección de Información

5.3.1. Fuentes Primarias

Registros experimentales obtenidos durante pruebas realizadas en la microrred didáctica, así como los datos generados en el entorno MATLAB durante las simulaciones de nodos de carga variable. También se consideran las anotaciones del proceso de montaje, las bitácoras de pruebas físicas, los registros de comunicación entre el PLC y la plataforma IoT,

5.3.2. Fuentes Secundarias

En las secundarias se consultaron libros y artículos científicos relacionados con control industrial, microrredes eléctricas y comunicación IoT, así como las normas IEC e IEEE aplicables al diseño eléctrico y a los sistemas de automatización. También manuales técnicos de los equipos y del software utilizado (como MATLAB y Node-RED), y la documentación técnica de los componentes electrónicos y de comunicación que conforman el sistema.

6. Resultados

La creación, simulación, diseño e integración de un prototipo funcional de nodo de carga variable comercial es la propuesta que se presenta en este proyecto. Este prototipo está destinado a ser parte de la microrred didáctica de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El propósito de este desarrollo es reproducir en ambientes comerciales situaciones reales de consumo eléctrico y posibilitar el monitoreo y la supervisión en tiempo real a través de una plataforma IoT- SCADA, combinando tecnologías de automatización, electrónica de potencia e instrumentación.

El nodo de carga variable funcionará como un elemento experimental en el laboratorio de microrredes, lo que permitirá a alumnos y maestros observar de manera práctica las interacciones eléctricas relacionadas con la fluctuación de demanda y la respuesta dinámica de un sistema interconectado.

6.1 Principio Operativo del Prototipo

El funcionamiento del nodo de carga variable comercial se fundamenta en la modulación controlada de cargas resistivas mediante un sistema de conmutación electrónica, cuyo control está a cargo de un autómata programable.

El sistema permitirá variar la potencia demandada de manera manual, según los parámetros definidos desde una interfaz IoT–SCADA.

El proceso funcional puede describirse de la siguiente manera:

1. Entrada de alimentación eléctrica:

El nodo recibe energía desde una fuente de laboratorio (típicamente 120 VAC).

2. Módulo de carga variable:

Este módulo incluye una serie de resistencias de potencia que se pueden cambiar usando relés o transistores MOSFET/IGBT, lo que hace posible el cambio en la magnitud de la carga conectada.

Cada elemento resistivo simboliza una "fase de carga" (por ejemplo, 100 W, 200 W o 300 W), la cual puede activarse o desactivarse de forma independiente, produciendo diversas combinaciones de demanda eléctrica.

3. Sistema de medición e instrumentación:

Se utilizan sensores de tensión y corriente de tipo Hall, además de un módulo de adquisición de datos (DAQ) que transmite la información al controlador. Estos sensores posibilitan la medición en tiempo real de variables, tales como:

- o Corriente RMS
- o Tensión RMS
- o Potencia activa y reactiva
- o Factor de potencia

4. Unidad de control embebido:

El controlador lleva a cabo las rutinas de control que establecen el estado de las cargas y procesa la información recabada por los sensores. Asimismo, gestiona la comunicación con el sistema IoT-SCADA, lo que posibilita manejar el nodo a distancia.

El firmware tendrá funciones elementales de protección para las variables de corriente y tensión.

5. Interfaz IoT–SCADA:

Mediante protocolos de comunicación como MQTT, el controlador se conectará con una aplicación IoT-SCADA que ha sido creada en una plataforma.

6. Esta interfaz permitirá:

- o Visualizar variables eléctricas en tiempo real.
- o Enviar comandos de control (activar/desactivar cargas).

7. Supervisión y análisis:

Los usuarios podrán, a través de la aplicación IoT-SCADA, ajustar los parámetros de carga y examinar cómo reacciona el nodo ante cambios en la demanda. Esto hará posible la reproducción de circunstancias comunes en ambientes comerciales, como oscilaciones del consumo o reacciones ante variaciones de tensión.

6.2 Integración del Entorno MATLAB

El comportamiento del nodo será diseñado, modelado y simulado en MATLAB antes de su implementación física. Esta etapa es fundamental para el desarrollo técnico del proyecto.

Esta simulación posibilitará la validación del diseño de control y eléctrico del prototipo, lo cual disminuirá los riesgos y mejorará el uso de recursos antes de la instalación real.

6.3 Estructura General del Sistema

Figura 9. *Estructura general del sistema*

Bloque	Componentes principales	Función
Fuente de alimentación y protección	Interruptores, fusibles, transformador aislado, borneras, protecciones térmicas	Alimentar el nodo y garantizar la seguridad durante las pruebas
Carga variable	Resistencias de potencia, relés, disipadores, ventiladores	Modificar la potencia demandada en niveles configurables
Control e instrumentación	Microcontrolador/PLC, sensores de corriente y tensión, conversores ADC	Medir variables eléctricas y ejecutar acciones de control
Comunicación y supervisión IoT móvil	Módulo Wi-Fi o Ethernet, interfaz gráfica SCADA	Supervisar el sistema y permitir control remoto
Simulación y validación (MATLAB)	Modelo digital del nodo, scripts de análisis y control	Evaluar el comportamiento del sistema antes de la implementación física

Las tres fases fundamentales en las que se incorpora el uso de MATLAB al proyecto son:

1. Modelado eléctrico del nodo de carga:

Se desarrollará un modelo que muestre las resistencias de potencia y los componentes de conmutación (MOSFET o relés electrónicos) dispuestos para modificar la carga.

El modelo abarcará parámetros eléctricos como la corriente, la tensión, la potencia activa y reactiva, además de las pérdidas causadas por el efecto Joule.

2. Diseño y validación del sistema de control:

Se simulará la operación del microcontrolador real en el entorno Simulink mediante la implementación de bloques lógicos y de control PWM.

Así, se podrán observar la estabilidad, los tiempos de conmutación y la respuesta a los cambios en la demanda.

3. Análisis dinámico y exportación de resultados:

Se simularán distintos contextos de operación, como cambios repentinos en la demanda o cargas parciales, para observar así variables importantes (potencia total, voltaje RMS, corriente RMS y factor de potencia).

6.4 Alcance Técnico y Operativo

El prototipo para desarrollar no busca reemplazar un sistema industrial completo, sino reproducir de manera segura y controlada las condiciones de una carga comercial típica dentro de una microrred.

El sistema permitirá trabajar con:

- Tensión nominal: 120 VAC.
- Corriente máxima: 5 A (aprox.).
- Control de carga: pasos de 100 W a 300 W por canal.
- Comunicación: Wi-Fi / Ethernet, protocolo MQTT.
- Interfaz SCADA: visualización de variables y control remoto.
- Simulación: modelo validado en MATLAB.

6.5 Etapas de Desarrollo Técnico

El desarrollo del prototipo se llevará a cabo en cuatro etapas principales, que serán planificadas de manera gradual y contarán con entregas parciales que se podrán verificar:

1. Fase 1 – Diseño y simulación (Semanas 1 a 4):

En esta fase del proyecto se realiza el modelado y la simulación del nodo de carga variable comercial. Para ello se emplea la herramienta MATLAB Online, la cual permitió procesar y analizar los datos obtenidos del aforo de cargas con el fin de caracterizar el comportamiento energético del nodo durante un periodo de 24 horas.

Como parte del proceso de modelado se realizó un aforo de cargas considerando un escenario representativo de un centro comercial. En este análisis se contemplaron aproximadamente veinte tipos de cargas eléctricas, entre las que se incluyen sistemas de iluminación, motores, bombas, equipos de refrigeración, sistemas de aire acondicionado, escaleras eléctricas y otros dispositivos típicos presentes en este tipo de instalaciones.

El aforo se desarrolla para un periodo de 24 horas con intervalos de medición de 30 minutos, obteniendo así un total de 48 intervalos de tiempo. Para cada intervalo se registraron las siguientes variables eléctricas:

- Tensión del sistema (V).
- Corriente de línea (A).
- Factor de potencia (fp).
- Nombre de la carga.
- Hora de medición.

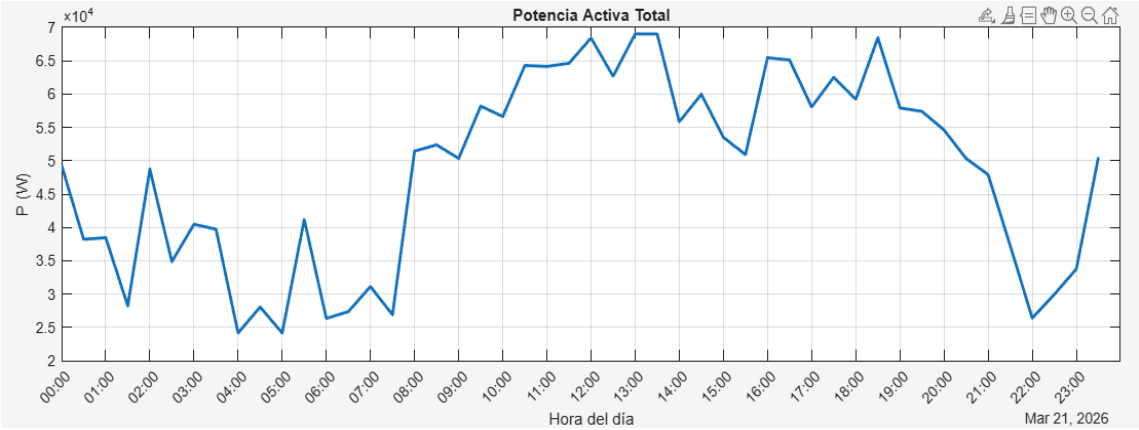
Figura 10. *Aforo de carga*

Intervalo	Hora	Nombre de la carga	Categoría	Fases	Voltaje (V)	Corriente (A)	FP	Estado
1	00:00	Iluminación pasillo norte	Iluminación	1	220.3	3.8	0.96	Encendida
1	00:00	Iluminación pasillo sur	Iluminación	1	220.5	3.2	0.96	Encendida
1	00:00	Iluminación locales nivel 1	Iluminación	1	220.8	0.0	0.95	Apagada
1	00:00	Iluminación locales nivel 2	Iluminación	1	221.1	0.0	0.95	Apagada
1	00:00	Iluminación exterior y parqueadero	Iluminación	1	221.3	15.2	0.95	Encendida
1	00:00	Escalera eléctrica 1	Motor	3	443.0	0.0	0.87	Apagada
1	00:00	Escalera eléctrica 2	Motor	3	443.4	0.0	0.87	Apagada
1	00:00	Ascensor público	Motor	3	443.7	1.3	0.85	Encendida
1	00:00	Ascensor de carga	Motor	3	444.0	0.0	0.83	Apagada
1	00:00	Bomba hidroneumática	Bomba	3	444.2	0.8	0.84	Encendida
1	00:00	Bomba de aguas residuales	Bomba	3	444.3	0.7	0.81	Encendida
1	00:00	Aire acondicionado plaza central 1	Aire acondicionado	3	444.4	0.0	0.90	Apagada
1	00:00	Aire acondicionado plaza central 2	Aire acondicionado	3	444.4	0.0	0.90	Apagada
1	00:00	Aire acondicionado administración	Aire acondicionado	3	444.3	0.0	0.91	Apagada
1	00:00	Refrigerador supermercado 1	Refrigeración	3	444.2	7.6	0.89	Encendida
1	00:00	Refrigerador supermercado 2	Refrigeración	3	444.0	7.3	0.89	Encendida
1	00:00	Cámara de congelación	Refrigeración	3	443.7	11.1	0.88	Encendida
1	00:00	Ventilación parqueadero	Ventilación	3	443.4	1.7	0.85	Encendida
1	00:00	Extractor baños	Ventilación	1	221.5	0.0	0.86	Apagada
1	00:00	Sistemas TI y CCTV	Servicios	1	221.3	14.0	0.93	Encendida

Fuente. Aforo de cargas archivo Excel

El procesamiento de los datos y la generación de las curvas de carga fueron implementados mediante en MATLAB, el cual permite automatizar el cálculo de las potencias y la visualización de los resultados a partir del archivo de datos del aforo. Ver anexo A

Figura 11. *Potencia activa total*

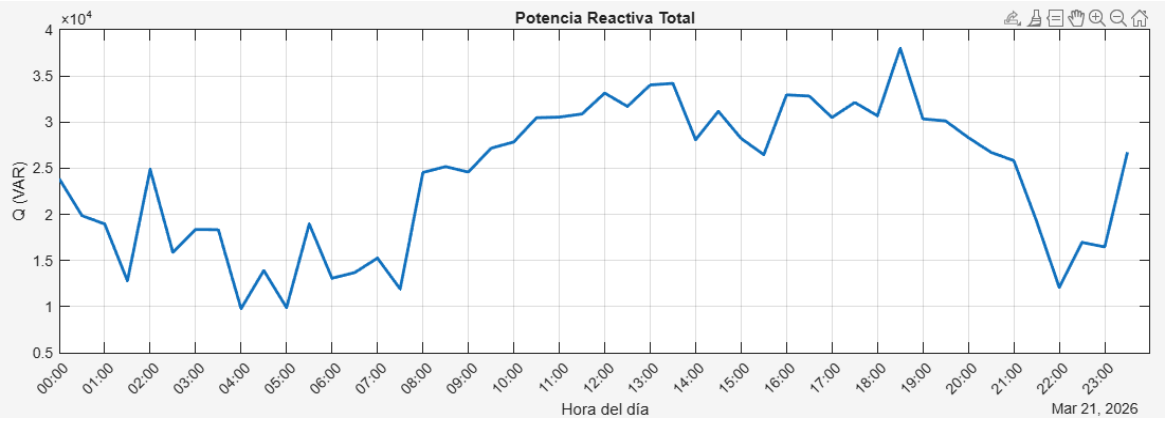


Fuente. Matlab Online.

Las curvas obtenidas permiten identificar diferentes periodos de operación del centro comercial, tales como:

- Periodos de baja demanda durante la madrugada, cuando solo permanecen en funcionamiento cargas esenciales.
- Incremento de la demanda durante las primeras horas del día debido al inicio de las actividades comerciales.
- Periodos de máxima demanda durante las horas de mayor actividad.
- Reducción de la demanda en horas de la noche debido al cierre de los establecimientos.

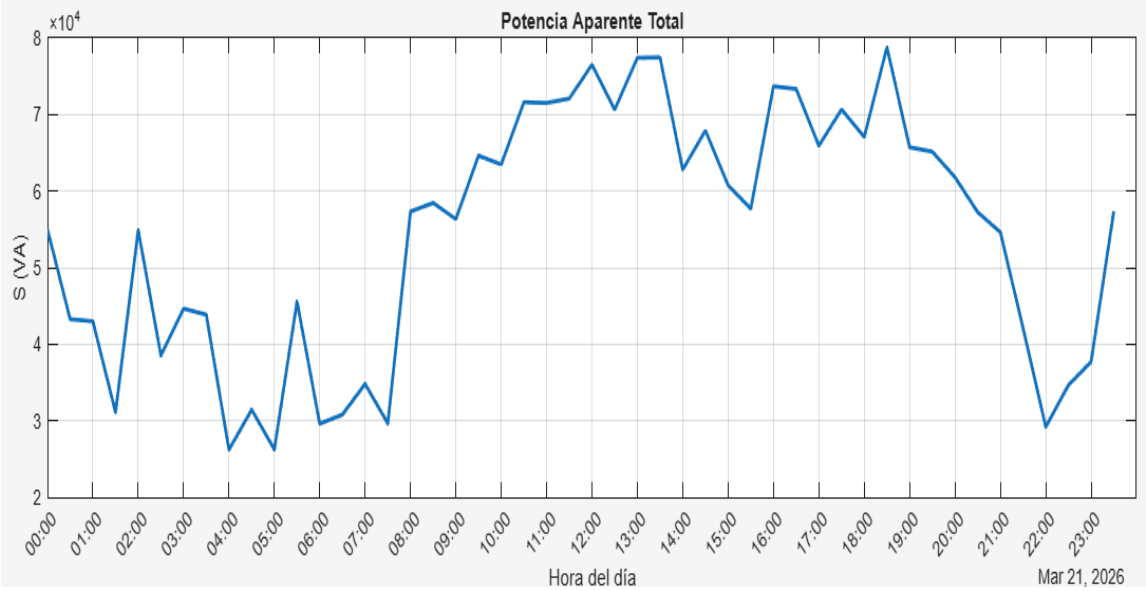
Figura 12. *Potencia reactiva total*



Fuente. Matlab Online

Con los valores calculados se procede a generar las gráficas correspondientes a las potencias activa, reactiva y aparente del nodo. En estas gráficas se representa la variación de la demanda eléctrica a lo largo del día, utilizando el eje X para representar el tiempo en horas y el eje Y para representar el valor de potencia.

Figura 13. *Potencia aparente total*



Fuente. Matlab Online

Análisis de comportamiento ante variaciones de carga.

El análisis de comportamiento ante variaciones de carga se realiza utilizando las siguientes fórmulas, aplicables a los circuitos de corriente alterna, las que relacionan la impedancia, la resistencia eléctrica y la reactancia.

$$R = \frac{V^2 P}{P^2 + Q^2} \qquad P = \frac{V^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

$$X = \frac{V^2 Q}{P^2 + Q^2} \qquad Q = \frac{V^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$

$$Z = R + jX \qquad S = \frac{V^2}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Figura 14. *Impedancias y reactancias*

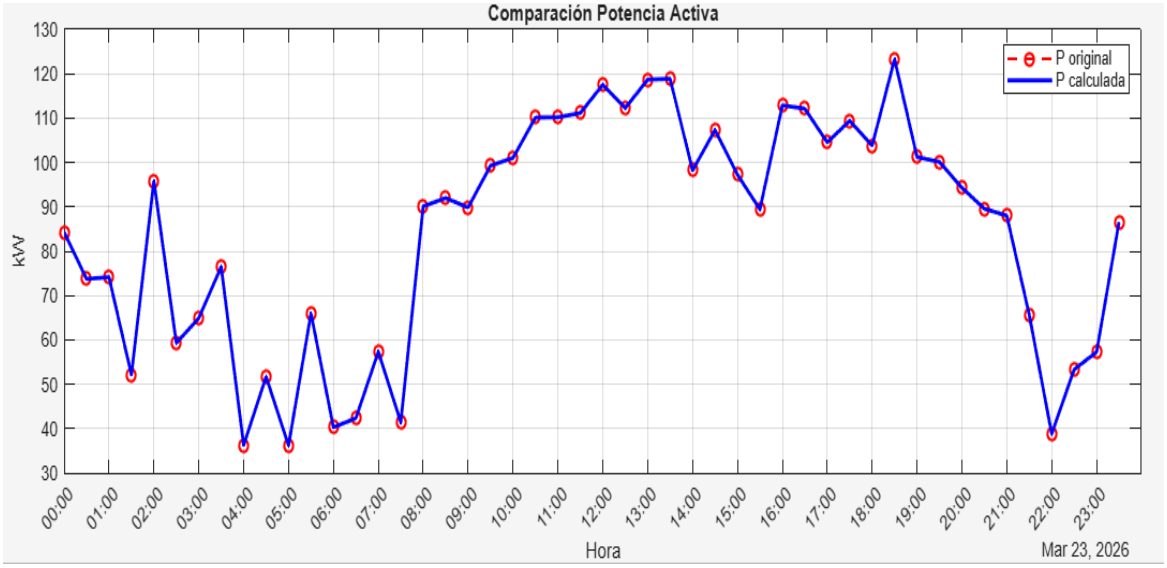
Hora	Voltaje (V)	Potencia activa total (kW)	Potencia reactiva total (kVAr)	R (Ω)	X (Ω)	Z=R+Jx (Ω)	Potencia activa calculada (kW)	Potencia reactiva calculada (kVar)	Potencia aparente calculada (kVA)	Potencia aparente total (kVA)
00:00	208	84.31	42.32	0.410	0.206	0.40988815920436 + j0.205728067291952	84.311	42.317	94.335	94.585
00:30	208	73.76	39.80	0.454	0.245	0.454293683696902 + j0.245137102005096	73.75763	39.79966	83.81051	84.1023
01:00	208	74.17	37.83	0.46	0.236	0.462855180735254 + j0.236091257386192	74.174	38	83.266	83.422
01:30	208	52.16	24.62	0.678	0.320	0.678282877711983 + j0.320202097337783	52.1603	24.6237	57.68036	57.8054
02:00	208	95.84	50.40	0.35	0.186	0.353617766028703 + j0.185960395652299	95.842	50	108.286	108.605
02:30	208	59.34	29.21	0.587	0.289	0.586882149407767 + j0.288932441014276	59.33658	29.21244	66.13771	66.42533
03:00	208	64.92	30.74	0.54	0.258	0.54437940817413 + j0.25774057802193	64.921	31	71.830	72.087
03:30	208	76.51	36.42	0.461	0.219	0.461001885643036 + j0.219458055195597	76.50927	36.42192	84.7362	84.87486
04:00	208	36.31	16.14	0.99	0.442	0.994847205407956 + j0.442282434571617	36.311	16.143	39.738	39.950
04:30	208	51.71	26.94	0.658	0.343	0.658059855729325 + j0.342762801454692	51.71443	26.93643	58.30913	58.4648
05:00	208	36.23	16.25	0.99	0.446	0.994043096511221 + j0.445979617566424	36.230	16.255	39.710	39.926
05:30	208	66.00	31.54	0.534	0.255	0.533604591254783 + j0.255009691616004	66.00417	31.5434	73.1542	73.4267
06:00	208	40.33	20.89	0.85	0.438	0.845851631820116 + j0.438164823660966	40.327	20.890	45.417	45.649
06:30	208	42.39	22.16	0.802	0.419	0.801607519715133 + j0.418974362211219	42.39109	22.15645	47.83213	48.07088
07:00	208	57.37	29.23	0.60	0.305	0.598763616531957 + j0.305052667534109	57.366	29.226	64.382	64.577
07:30	208	41.46	20.12	0.845	0.410	0.844566127741622 + j0.409822065929017	41.46323	20.11985	46.08696	46.39178
08:00	208	90.12	45.70	0.38	0.194	0.381881967370527 + j0.193660344787392	90.116	45.700	101.042	101.476
08:30	208	91.98	46.98	0.373	0.191	0.373035030296214 + j0.190527432554926	91.98319	46.98036	103.2863	103.7175
09:00	208	89.86	46.34	0.38	0.196	0.380341217369714 + j0.196133722032067	89.856	46.337	101.100	101.492
09:30	208	99.29	49.72	0.348	0.174	0.348370328249555 + j0.174472460251968	99.28619	49.72497	111.042	111.5631
10:00	208	101.02	52.52	0.34	0.175	0.337130219648673 + j0.175282914729444	101.022	52.524	113.860	114.334
10:30	208	110.13	55.93	0.312	0.159	0.312300708506283 + j0.158604521240517	110.1287	55.9298	123.5171	124.134
11:00	208	110.17	56.11	0.31	0.159	0.311801266343872 + j0.158807108124783	110.175	56.114	123.642	124.254
11:30	208	111.14	56.79	0.309	0.158	0.308674601738952 + j0.157715811690651	111.1446	56.78879	124.8122	125.4326
12:00	208	117.51	60.73	0.29	0.150	0.290570494719678 + j0.150153144534801	117.513	60.725	132.276	132.918
12:30	208	112.27	59.78	0.300	0.160	0.300235963484271 + j0.159864545262533	112.2697	59.77944	127.193	127.7177
13:00	208	118.66	62.21	0.29	0.150	0.285993632685241 + j0.149927373396068	118.665	62.208	133.982	134.584
13:30	208	118.86	62.56	0.285	0.150	0.285032725479396 + j0.150026246710138	118.8576	62.56038	134.3165	134.894
14:00	208	98.21	51.97	0.34	0.182	0.344158293960014 + j0.182103226508687	98.213	51.967	111.114	111.491
14:30	208	107.31	58.59	0.311	0.170	0.310591357980583 + j0.169561562512402	107.3121	58.58507	122.2624	122.6832
15:00	208	97.25	53.48	0.34	0.188	0.341570626307135 + j0.187850471553853	97.248	53.483	110.985	111.316
15:30	208	89.44	49.12	0.372	0.204	0.371638970251863 + j0.204106225642401	89.43735	49.1195	102.0381	102.4379
16:00	208	112.86	60.41	0.30	0.159	0.297972063603694 + j0.15948457937878	112.863	60.408	128.012	128.542
16:30	208	112.13	60.19	0.300	0.161	0.299536157881712 + j0.160782213602264	112.1296	60.18786	127.262	127.8111
17:00	208	104.53	57.70	0.32	0.175	0.317238115352109 + j0.175104239172924	104.530	57.697	119.397	119.833
17:30	208	109.38	59.59	0.305	0.166	0.304994460684607 + j0.166164484177372	109.3843	59.59385	124.5647	125.0679
18:00	208	103.82	56.39	0.32	0.176	0.320234930055015 + j0.175769677942262	103.823	56.986	118.434	118.915
18:30	208	123.27	72.24	0.261	0.153	0.261251911136394 + j0.153086070911849	123.2747	72.23543	142.8797	143.5877
19:00	208	101.23	56.03	0.33	0.181	0.327175676210237 + j0.181086126085753	101.225	56.026	115.696	116.135
19:30	208	100.13	55.50	0.331	0.183	0.330547889991098 + j0.183203846391268	100.1279	55.49519	114.4784	114.9047
20:00	208	94.29	51.64	0.35	0.193	0.352960982951038 + j0.193325730111491	94.288	51.644	107.505	107.876
20:30	208	89.59	49.88	0.369	0.205	0.368622632901875 + j0.205245630999323	89.59177	49.88386	102.5431	102.8633
21:00	208	88.01	49.38	0.374	0.210	0.373865911345267 + j0.209787064728233	88.009	49.385	100.918	101.166
21:30	208	65.69	35.64	0.509	0.276	0.508853055393958 + j0.276068306808867	65.68801	35.63775	74.73262	74.94696
22:00	208	38.85	19.39	0.891	0.445	0.891449453987649 + j0.444928493483654	38.853	19.392	43.424	43.644
22:30	208	53.37	32.31	0.593	0.359	0.593215224336984 + j0.359130752165945	53.37071	32.31047	62.38909	62.70255
23:00	208	57.28	29.66	0.596	0.308	0.595581170506156 + j0.308388474666932	57.283	29.661	64.507	64.685
23:30	208	86.57	47.54	0.384	0.211	0.383978266944587 + j0.210858480749623	86.56792	47.53805	98.76169	98.99911

Fuente. Tabla de impedancias y reactancias archivo Excel.

Validación de parámetros eléctricos.

Con el fin de validar el modelo eléctrico del nodo de carga, se realiza el cálculo de las potencias activa, reactiva y aparente a partir de la impedancia equivalente obtenida en cada intervalo del aforo. Para ello, se emplearon las relaciones eléctricas que permiten expresar dichas potencias en función del voltaje y de los parámetros resistivos y reactivos del sistema.

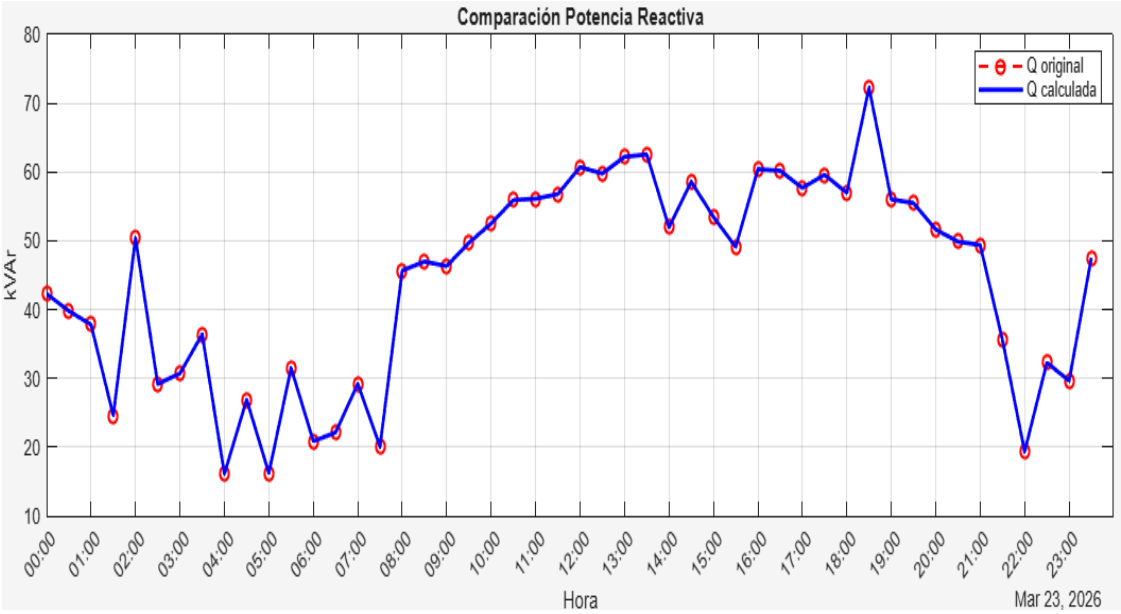
Figura 15. *Comparación potencia activa*



Fuente. Matlab Online

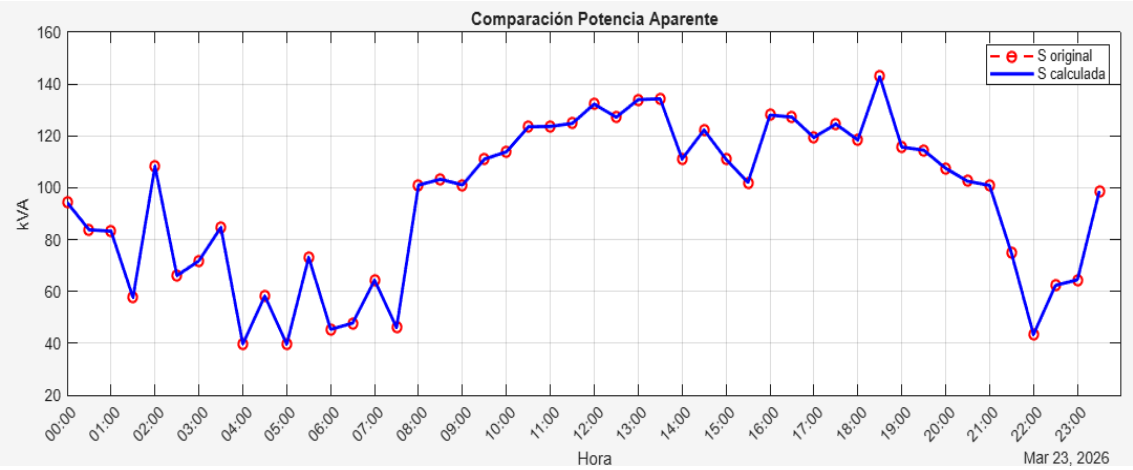
Posteriormente, los valores calculados se comparan con las potencias originales registradas en el aforo de carga, tanto en entorno Excel como en MATLAB, con el objetivo de verificar la consistencia del modelo desarrollado.

Figura 16. *Comparación potencia reactiva*



Fuente. Matlab Online

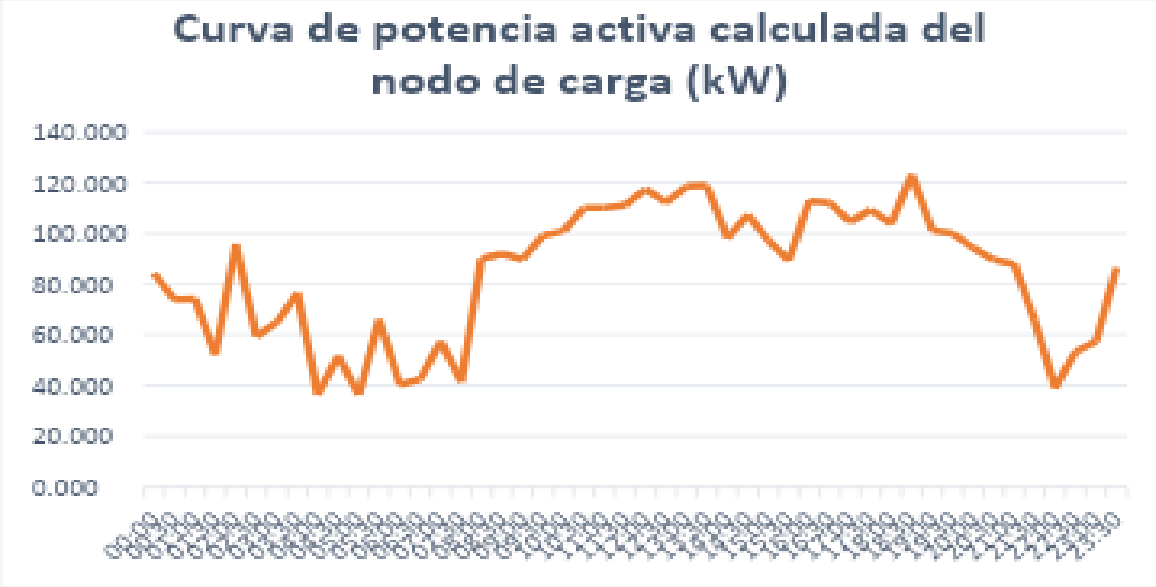
Figura 17. *Comparación potencia aparente*



Fuente. Matlab Online

Como resultado, se obtuvo una superposición prácticamente total entre las curvas de potencia original y calculada, evidenciando una alta concordancia en la tendencia, así como en los puntos de máxima y mínima demanda. Ver anexo B.

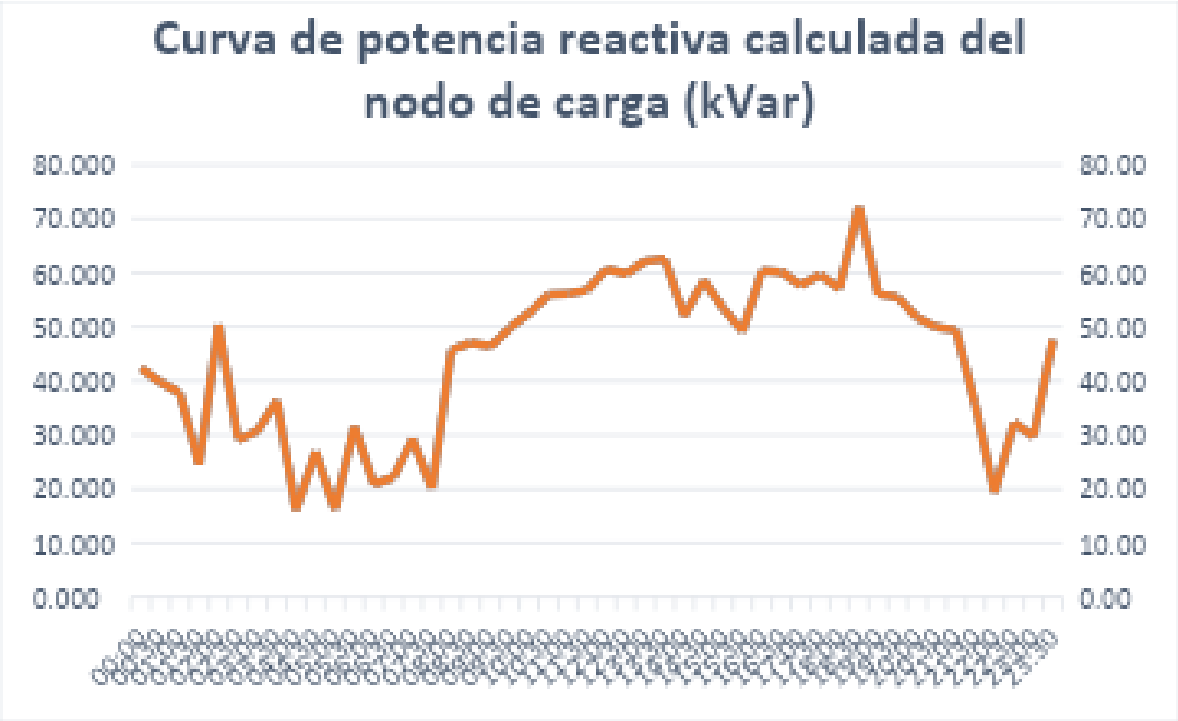
Figura 18. *Curva de potencia activa calculada del nodo de carga*



Fuente. Excel

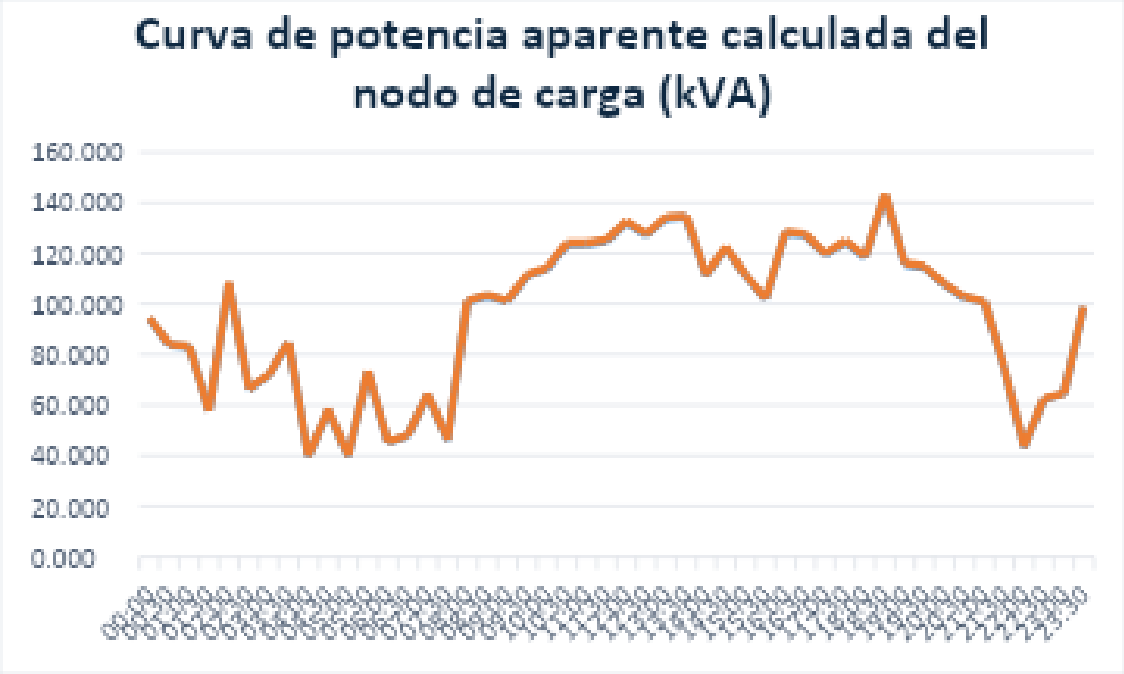
Adicionalmente, el análisis del error entre los valores calculados y medidos arrojó diferencias mínimas, lo que confirma la precisión del modelo basado en la impedancia equivalente del nodo.

Figura 19. *Curva de potencia reactiva calculada del nodo de carga*



Fuente. Excel

Figura 20. *Curva de potencia aparente calculada del nodo de carga*

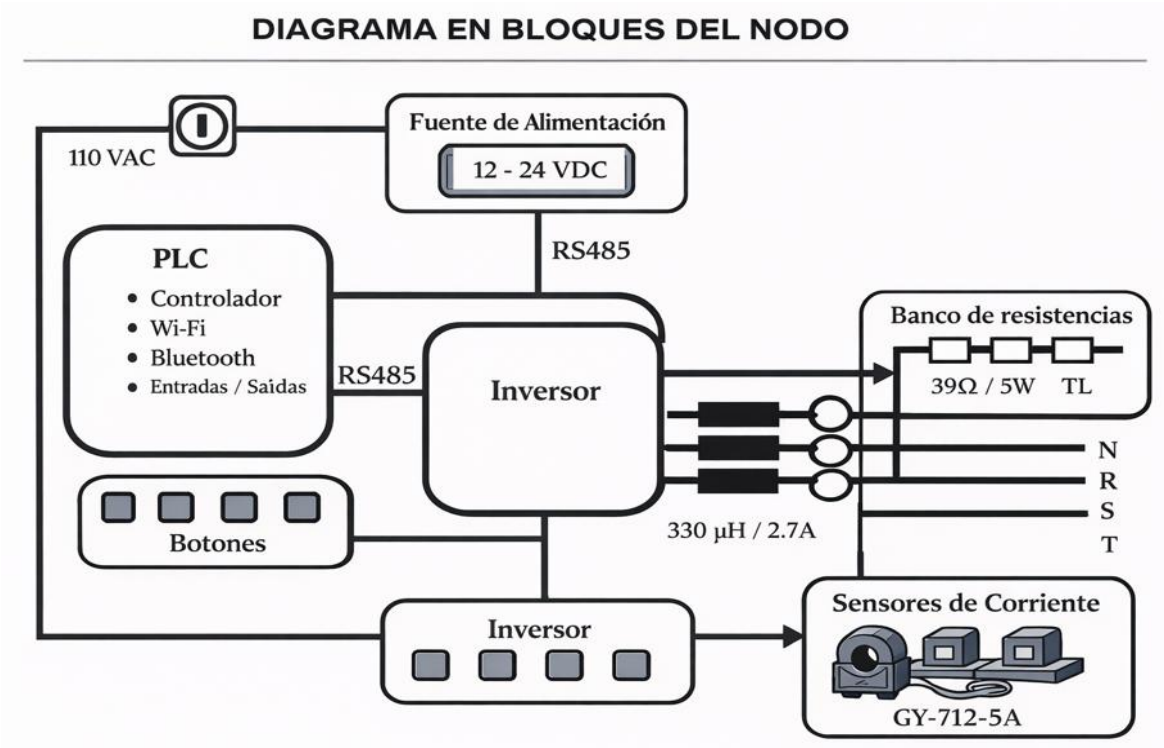


Fuente. Excel

2. Fase 2 – Construcción del módulo físico (Semanas 5 a 8):

Ensamble del sistema de cargas resistivas.

Figura 21. *Diagrama en bloques del nodo*



Fuente. Diseño propio

Descripción del diagrama de bloques del nodo de microrred. El nodo de carga variable construido para la microrred didáctica funciona como un sistema integrado en el que interactúan diferentes elementos de control, potencia y medición, permitiendo simular el comportamiento real de una carga dentro de una red eléctrica.

El elemento principal del sistema es el autómata programable (PLC), el cual actúa como el cerebro del nodo. Este dispositivo se encarga de recibir las órdenes de operación, ya sea de forma manual o desde el sistema de supervisión, y con base en esto controla el comportamiento del sistema. Además, el PLC se comunica con el driver mediante protocolo Modbus RTU sobre RS485, enviando las consignas necesarias para definir cómo debe operar el nodo.

El driver trifásico programable (Amp1-G) es el encargado de la etapa de potencia. Este recibe las señales del PLC y genera la salida eléctrica con las características definidas, como la

frecuencia, amplitud y fase. Gracias a esto, es posible simular diferentes condiciones de operación dentro de la microrred, como variaciones de carga o cambios en la red.

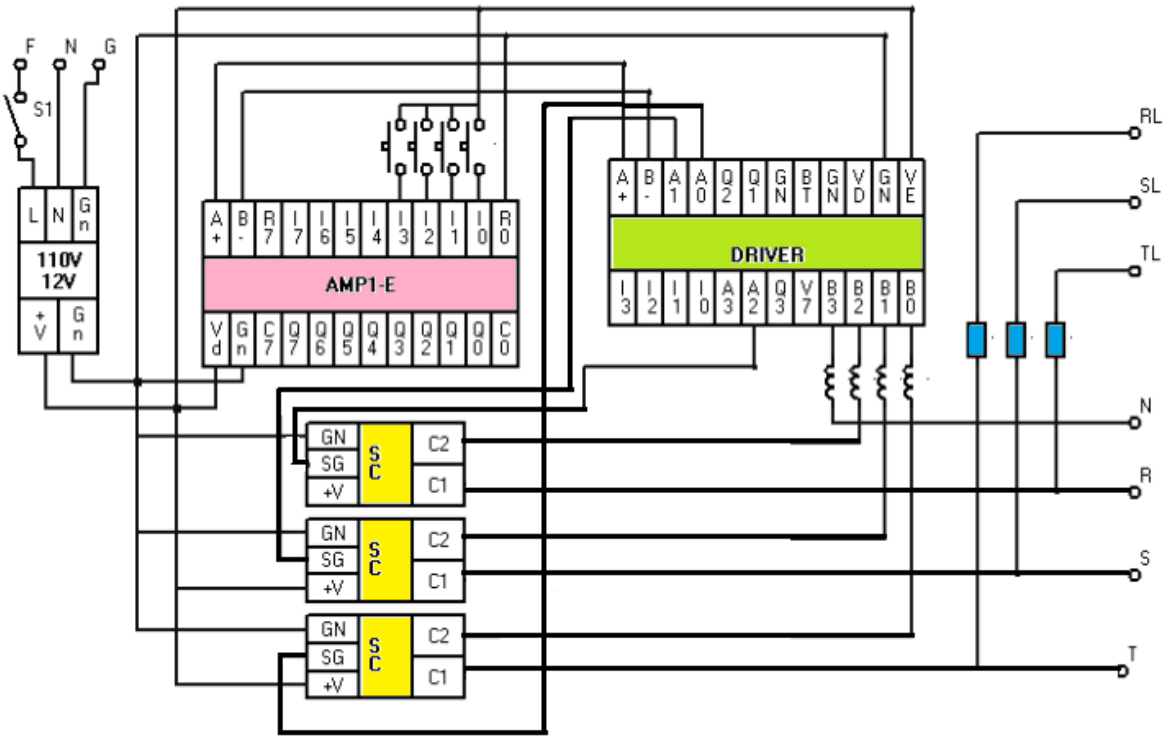
Para garantizar una señal más estable, la salida del driver pasa por un sistema de filtrado compuesto por bobinas de 220 µH, las cuales reducen el ruido generado por la conmutación del inversor. Esto permite obtener una señal más cercana a una forma senoidal, adecuada para las pruebas del sistema.

Posteriormente, la energía llega al banco de resistencias de carga (39r / 5W), que representan el consumo eléctrico dentro del nodo. Estas resistencias permiten simular diferentes niveles de demanda, dependiendo de cómo sean controladas desde el sistema.

En cuanto a la medición, el sistema cuenta con sensores de corriente GY-712-5A, los cuales están ubicados en la salida del nodo. Estos sensores permiten medir la corriente que circula hacia la carga y envían esta información al PLC.

Montaje de sensores, controladores y protecciones.

Figura 22 *Diagrama esquemático del tablero de nodo*



Fuente. Diseño propio

Con estos datos, el PLC puede supervisar el estado del sistema en tiempo real, detectar posibles anomalías y ajustar la operación del nodo si es necesario, cerrando así el lazo de control.

Adicionalmente, todo el sistema de control y potencia es alimentado por una fuente conmutada de 12V / 5A, la cual garantiza un suministro estable para el correcto funcionamiento del PLC y el driver.

Finalmente, el nodo puede integrarse con un sistema de supervisión mediante comunicación Modbus TCP, lo que permite visualizar variables eléctricas y realizar control remoto, facilitando el análisis del comportamiento del sistema dentro de la microrred.

El módulo de nodo desarrollado funciona como un entorno de pruebas que permite representar el comportamiento de una microrred eléctrica a pequeña escala. En este sistema interactúan elementos de control, potencia y medición, los cuales trabajan de manera conjunta para simular diferentes condiciones de operación.

El elemento principal del sistema es el PLC (Autómata Programable), el cual se encarga de coordinar el funcionamiento general del nodo. Este dispositivo recibe las órdenes de operación, ya sea de forma local mediante pulsadores o de manera remota a través de comunicación Modbus TCP vía WiFi, permitiendo la integración con otros nodos o con un sistema de supervisión. Adicionalmente, el PLC envía las consignas de operación al driver mediante Modbus RTU, definiendo así el comportamiento eléctrico del sistema.

En la etapa de potencia se encuentra el driver trifásico (inversor), el cual es el encargado de generar la señal eléctrica de salida. A partir de las instrucciones enviadas por el PLC, este equipo puede modificar parámetros como la frecuencia, la amplitud y la fase, permitiendo simular diferentes escenarios, como variaciones de carga o perturbaciones en la red. A diferencia de un inversor convencional, este está enfocado en la experimentación, por lo que permite trabajar tanto con señales senoidales como con formas de onda no ideales.

Para el correcto funcionamiento del sistema de control, se utiliza una fuente conmutada de 12V / 5A, la cual suministra energía tanto al PLC como al driver, garantizando una alimentación estable para los componentes electrónicos.

Una vez generada la señal por el driver, esta pasa por un conjunto de bobinas de 220 μH, las cuales cumplen la función de filtrar la señal. Esto es necesario debido a que el inversor trabaja

con conmutación (PWM), lo que introduce componentes de alta frecuencia. Las bobinas ayudan a suavizar la señal, acercándola a una forma de onda más limpia y adecuada para la simulación.

Posteriormente, la corriente circula a través del sistema de medición, compuesto por sensores de corriente GY-712-5A. Estos sensores permiten monitorear la corriente en cada fase y enviar esta información al PLC. Con estos datos, el sistema puede evaluar el comportamiento del nodo, calcular variables eléctricas y verificar que la operación se mantenga dentro de condiciones seguras.

Finalmente, la energía llega al módulo de carga resistiva, el cual está compuesto por resistencias que representan el consumo dentro de la microrred. Estas cargas permiten someter el sistema a diferentes niveles de demanda, evaluando la capacidad del nodo para mantener condiciones estables de operación.

Diseño estructural y verificación de seguridad eléctrica y lista de componentes del nodo

Para la construcción del nodo de microrred se emplearon los siguientes elementos, organizados según su función dentro del sistema:

Elementos de control

- 1 autómata programable Amp1-F
- 4 pulsadores industriales de 22 mm
- 1 piloto indicador 110 V

Elementos de potencia

- 1 driver trifásico programable Amp1-G
- 4 bobinas de 220 μH / 2.7 A
- 3 resistencias de 39 Ω / 5 W

Medición y monitoreo

- 3 sensores de corriente GY-712-5A

Alimentación

- 1 Fuente conmutada 12 V / 5 A
- 1 cable encauchetado 3x18 AWG (2 metros)
- 1 enchufe con polo a tierra 110 V

Cableado y conexión

- Cable tipo vehículo 18 AWG (3 metros)

- Terminales tubulares calibre 18–22 AWG
- Bornera de conexión (10 posiciones)

Elementos mecánicos y de montaje

- 1 gabinete plástico para montaje
- Riel DIN metálico
- Canaleta ranurada para organización de cables
- Tornillos autoperforantes para fijación

Durante el montaje del nodo de microrred es importante tener en cuenta ciertos aspectos técnicos que permiten garantizar un funcionamiento adecuado del sistema, especialmente considerando que se trabaja en un gabinete plástico.

El uso de un gabinete plástico presenta ventajas importantes, como el aislamiento eléctrico y la facilidad para la comunicación inalámbrica. Sin embargo, al no contar con apantallamiento electromagnético, es necesario organizar adecuadamente los componentes para evitar interferencias, principalmente entre el driver y el PLC.

Organización interna del tablero

Se recomienda dividir el tablero en dos zonas principales:

- Zona de control: donde se ubican la fuente de alimentación y el PLC Amp1-F.
- Zona de potencia: donde se instalan el driver Amp1-G, las bobinas y las resistencias.

Esta separación ayuda a reducir el impacto del ruido eléctrico generado por la etapa de potencia sobre el sistema de control.

Las borneras deben ubicarse en un punto accesible (parte inferior o lateral), facilitando la conexión de entradas y salidas.

Consideraciones térmicas

Los elementos de potencia, especialmente el driver y las resistencias, generan calor durante su operación. Por esta razón:

- Las resistencias no deben fijarse directamente sobre la superficie del gabinete; se recomienda dejarlas ligeramente separadas para permitir circulación de aire.
- En caso de ser necesario, se pueden realizar pequeñas aberturas en el gabinete para mejorar la ventilación natural.

Cableado y conexiones

Para el cableado del sistema se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Utilizar el cable encauchetado únicamente para la alimentación de 110 V.
- Mantener un código de colores en el cableado (por ejemplo: rojo para positivo, negro para tierra).
- Emplear terminales tubulares en todas las conexiones hacia el PLC y el driver, garantizando mayor seguridad y evitando falsos contactos.

Los sensores GY-712-5A deben ubicarse cerca de las salidas del sistema, pero alejados de la fuente, para evitar interferencias en la medición.

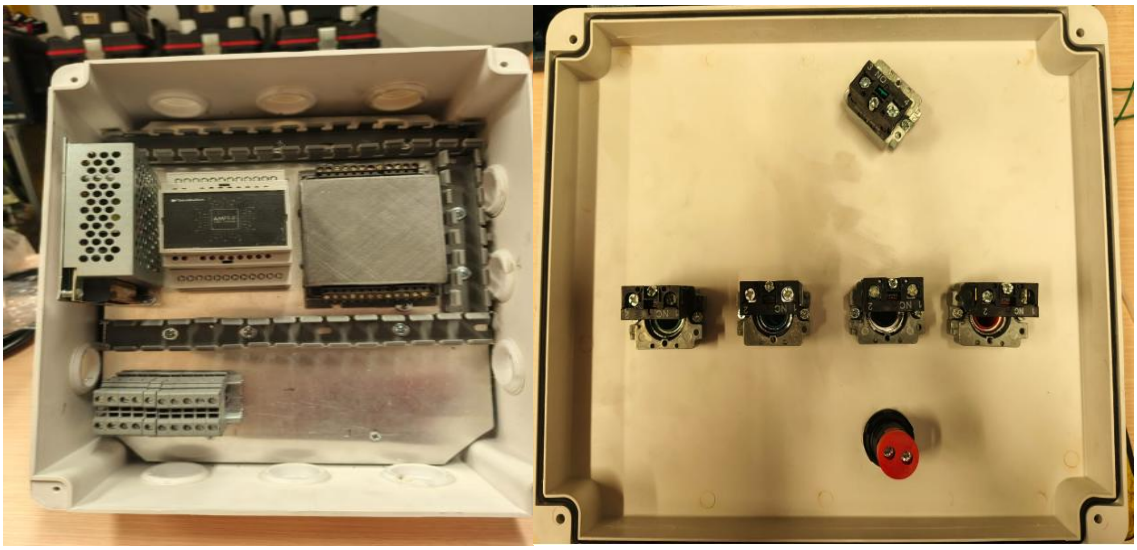
Instalación de las bobinas

Las bobinas de 220 µH deben conectarse en serie con la salida del driver antes de las cargas.

Además:

- No deben colocarse muy juntas entre sí (se recomienda dejar separación).
- Deben fijarse correctamente para evitar vibraciones que puedan afectar las conexiones.

Figura 23. *Panel frontal*



Fuente: Imágenes propias

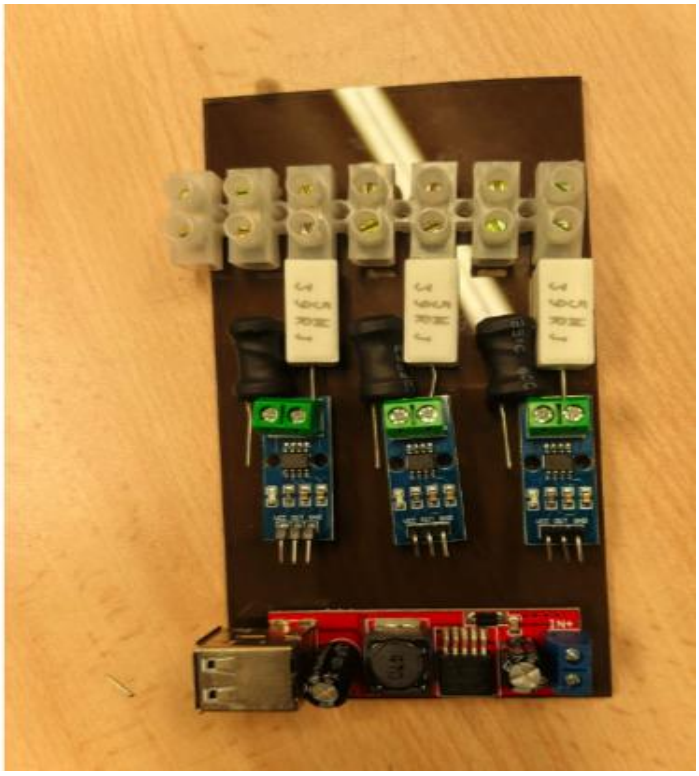
Panel frontal

Para los elementos visibles del tablero:

- El piloto de 110 V debe ubicarse en la parte superior como indicador de energía.

- Los pulsadores pueden organizarse en línea o en matriz, según el diseño del tablero.
- Se debe dejar holgura en los cables que van a la tapa para facilitar su apertura sin afectar las conexiones.

Figura 24. *Instalación de bobinas*



Fuente: Imágenes propias

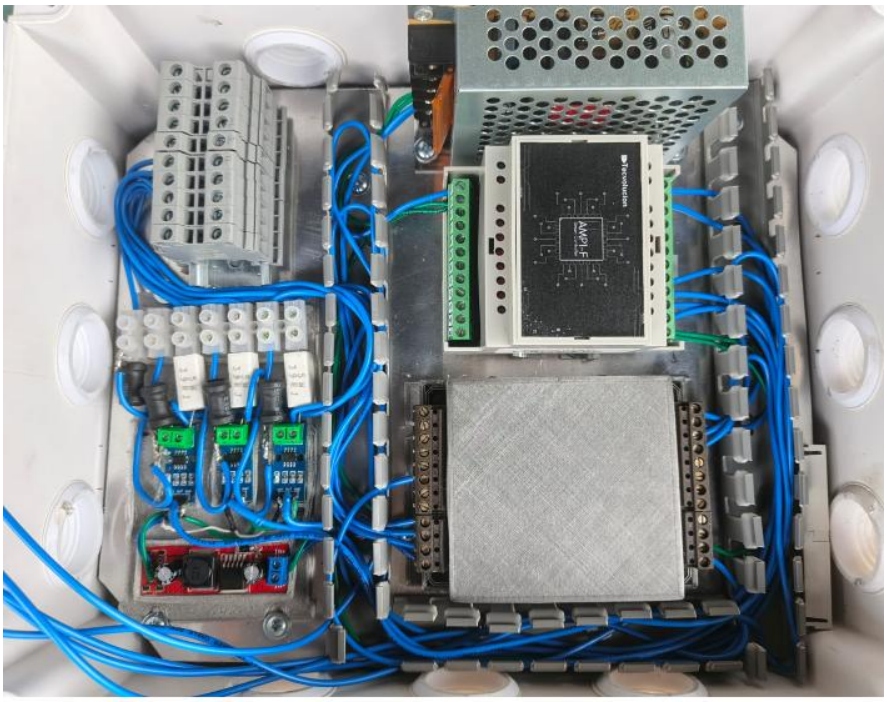
Secuencia general de conexión

El flujo de conexión del sistema se puede resumir de la siguiente manera:

- Entrada: alimentación de 110 V hacia la fuente y el piloto.
- Control: la fuente alimenta el PLC y el driver.
- Potencia: el driver entrega señal hacia bobinas, sensores y cargas.
- Medición: los sensores envían información al PLC.
- Comunicación: el PLC se comunica con el driver mediante RS485.

Manaje inicial

Figura 25. *Cableado del prototipo*



Fuente: Imágenes propias

Figura 26. *Vista final del montaje*





Fuente: Imágenes propias

3. Fase 3 – Integración IoT–SCADA (Semanas 9 a 12):

Configuración de comunicación entre el controlador y la plataforma móvil.

Operación el bus modbus para el control de operaciones del simulador de red

En esta fase del proyecto se desarrolla la integración entre el sistema de control y el emulador de red, utilizando el protocolo Modbus como medio de comunicación principal. En este caso, el PLC actúa como dispositivo maestro y el driver trifásico como esclavo, estableciendo el intercambio de datos mediante Modbus RTU sobre RS-485, lo cual permite una comunicación estable incluso en presencia de ruido eléctrico.

Por medio de esta comunicación, el autómata envía diferentes consignas de operación al driver, escribiendo en registros específicos que permiten modificar variables como la frecuencia, la amplitud y el ángulo de fase de la señal generada. Esto hace posible simular distintos escenarios dentro de la microrred, como variaciones en la frecuencia o cambios en el nivel de tensión. De igual forma, el sistema trabaja con un flujo de información en ambos sentidos, donde el PLC no solo envía comandos, sino que también recibe respuestas del driver con confirmaciones o datos medidos, permitiendo así supervisar el comportamiento del nodo y ajustar su operación en tiempo real.

Comunicaciones Modbus RTU Maestro / Gateway

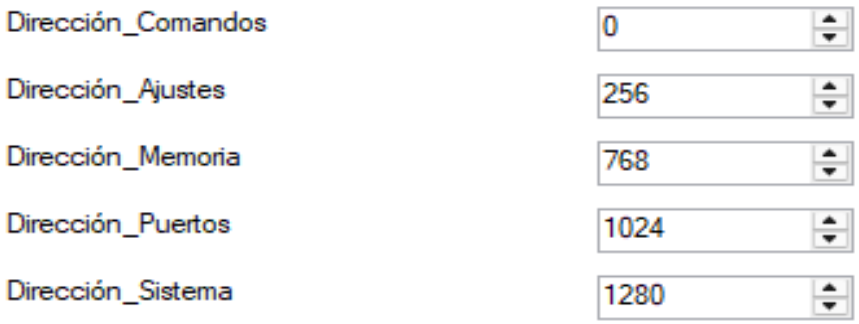
En este sistema, el autómata programable AMP1-F opera bajo el protocolo Modbus RTU actuando como maestro dentro de una red RS-485. Esta configuración permite establecer comunicación directa con dispositivos de campo mediante la lectura y escritura de registros internos, lo cual es fundamental para el control del nodo de la microrred.

La comunicación se realiza con parámetros estándar, como una velocidad de 9600 baudios, 8 bits de datos, sin paridad y un bit de parada, lo que asegura estabilidad en la transmisión de datos. A través de funciones específicas del protocolo, el PLC puede consultar variables de operación o enviar consignas a los equipos conectados, permitiendo así el monitoreo y control en tiempo real del sistema.

La trama de lectura de 4 registros internos ubicados en la dirección 8 del dispositivo RTU número 1 y su respuesta posible son (“SS” es la suma de verificación):

Requerimiento: **01 03 00 08 00 04 SS SS**, Respuesta: **01 03 08 00 00 00 00 00 00 00 SS SS**

Para el AMP1-F la dirección en el bus de Modbus-RTU es 0, sus registros internos se distribuyen en direcciones como las de la imagen siguiente:



Comunicación MODBUS-MGD con el Web Broker. Para la integración con entornos IoT, el sistema implementa el uso de Modbus-Mgd, el cual funciona sobre redes TCP/IP mediante conexión WiFi. En este caso, el PLC se conecta a un broker que actúa como intermediario entre los diferentes dispositivos, permitiendo la comunicación entre múltiples clientes dentro de la red.

Cada autómata se identifica mediante un alias único, lo que facilita su reconocimiento dentro del sistema. Las tramas de comunicación corresponden a estructuras Modbus-TCP que son enviadas de forma segura hacia el broker, permitiendo realizar operaciones de lectura y escritura de datos. Esta arquitectura permite una mayor escalabilidad del sistema, facilitando la integración de varios nodos dentro de la microrred.

La comunicación Modbus-Mgd es la misma Modbus-TCP pero con tramas encriptadas hasta el bróker. Las tramas de consulta tienen la estructura siguiente:

00 01: contador incremental para evitar reenvíos en repetidores
01 19: alias del AMP1-F con el cual se realiza la comunicación
00 06: cantidad de datos de la trama RTU
00 03: primeros dos bytes de la trama RTU, identidad del AMP1-F = 0 y función de lectura
00 00: dirección interna de datos en el AMP1-F (comandos)
00 02: cantidad de datos a leer (cada dato se compone de dos bytes)
00 01: contador incremental de la respuesta de lectura del AMP1-F
01 19: alias del AMP1-F con el cual se realiza la comunicación
00 07: cantidad de datos de la trama RTU
00 03: primeros dos bytes de la trama RTU, identidad del AMP1-F = 0 y función de lectura
04: cantidad de bytes leídos
00 00 00 00: datos leídos

Para escribir el valor 45 al registro interno con dirección 1 del AMP1-F con alias 119, se debe enviar la siguiente trama:

00 01: contador incremental para evitar reenvíos en repetidores
01 19: alias del AMP1-F con el cual se realiza la comunicación
00 09: cantidad de datos de la trama RTU
00 10: primeros dos bytes de la trama RTU, identidad del AMP1-F = 0 y función de escritura
00 01: dirección interna de datos en el AMP1-F (comandos)
00 01 02: cantidad de datos y bytes a escribir (cada dato se compone de dos bytes)
00 2D: valor 45 a escribir. Debe estar en hexadecimal.
00 01: contador incremental de la respuesta de escritura del AMP1-F
01 19: alias del AMP1-F con el cual se realiza la comunicación
00 06: cantidad de datos de la trama RTU
00 10: primeros dos bytes de la trama RTU, identidad del AMP1-F = 0 y función de escritura
00 01: dirección interna de datos en el AMP1-F (comandos)
00 01: cantidad de datos escritos (cada dato se compone de dos bytes)

Comunicación de aplicaciones dashboard con dispositivos AMP1-F. Las aplicaciones de supervisión, como dashboards, aplicaciones web o herramientas de análisis, se comunican con los autómatas mediante solicitudes HTTP tipo GET. Estas solicitudes contienen en su interior tramas Modbus-TCP, lo que permite acceder a los registros del PLC desde interfaces externas.

18.191.129.89: dirección IP o URL del servidor que alberga los broker Modbus-Mgd
1032: puerto del broker respectivo (1027, 1032)
modbus: indica al broker que es una API tipo modbus.
000101190006000300000002: trama Modbus-TCP envuelta en la consulta para lectura descrita en el punto 3 de este documento.
abcde: token programado en el AMP1-F para validación (por seguridad debe ser complejo)

Una vez realizada la consulta, el sistema devuelve la información en formato JSON, lo que facilita su interpretación y uso en diferentes plataformas. Esto permite visualizar variables en tiempo real, como estados o mediciones del sistema, y también enviar comandos de control desde el entorno gráfico hacia el dispositivo, mejorando la interacción con el sistema IoT–SCADA.

```
{       "Device":"00",
        "Function":"03",
        "Bytes":"04",
    "Value":"00000000" }
```

Se debe explorar el campo “Value” para extraer los datos leídos (cada cuatro cifras hexadecimales son un dato de dos bytes ó 16 bits). Estas consultas pueden ser realizadas desde la barra de URL de cualquier navegador web conectado a internet.

18.191.129.89: dirección IP o URL del servidor que alberga los broker Modbus-Mgd
1032: puerto del broker respectivo (1027, 1032)
modbus: indica al broker que es una API tipo modbus.
000101190009001000010001020002D: trama Modbus-TCP envuelta en la consulta para escritura, descrita en el punto 3 de este documento.
abcde: token programado en el AMP1-F para validación (por seguridad debe ser complejo)

El broker envía la consulta Modbus-TCP al AMP1-F, el cual responde con la trama descrita al final del punto 3, para que sea convertida a formato JSON de la siguiente manera:

```
{       "Device":"00",
        "Function":"10",
        "Words":"0001"  }
```

Comunicación de aplicaciones dashboard con dispositivos RTU. El sistema también permite la integración de dispositivos RTU conectados al bus RS-485 mediante el uso del PLC en modo gateway. En este modo, el autómata actúa como intermediario entre la red inalámbrica y los dispositivos de campo, reenviando las solicitudes que recibe desde las aplicaciones hacia los equipos conectados.

Para lograr esto, se utilizan tramas similares a las empleadas en la comunicación con el PLC, pero ajustando la dirección del dispositivo correspondiente dentro del bus. De esta manera, es posible realizar operaciones de lectura y escritura sobre diferentes equipos sin necesidad de una conexión directa a cada uno, lo que simplifica la arquitectura del sistema y mejora su flexibilidad.

Para esto es necesario que el AMP1-F esté configurado con el bus operando en modo “Gateway” que es un modo “Maestro”, en el cual se envía al bus RS485 todo lo que llegue por WiFi y se envía a WiFi lo que llegue por el bus RS485.

Para este caso las consultas y la respuesta tiene el mismo formato JSON de lectura como el descrito en el punto anterior, pero con la identidad igual a la del dispositivo RTU.

Comunicación mediante broker con persistencia de datos

Como parte de la integración IoT–SCADA, se implementa un mecanismo de almacenamiento de información mediante brokers configurados para realizar consultas automáticas a los dispositivos. Esto permite capturar datos de manera periódica, incluso cuando no hay aplicaciones de supervisión activas.

Los datos obtenidos son almacenados en bases de datos junto con marcas de tiempo, lo que permite llevar un registro histórico del comportamiento del sistema. Además, es posible consultar, filtrar o eliminar estos datos según sea necesario, facilitando su análisis posterior. Este tipo de funcionalidad es clave para estudios de desempeño, diagnóstico de fallas y toma de decisiones basadas en información real del sistema.

Existe un broker en el puerto 1029 (para consultas en 1027) y otro en el puerto 1034 (para consultas en 1032) que pueden ser configurados para que envíen requerimientos automáticos a los AMP1-F, aunque la aplicación dashboard no esté en operación. Esto permite tener un mecanismo de persistencia en la web.

Par hacer una consulta de lectura de datos al AMP1-F, se utiliza un requerimiento similar al utilizado en el punto anterior.

La respuesta se presenta como un objeto JSON con el tiempo en formato epoch y los datos.

{ "Time": 1762994853076, "Value": "0000000000000000" }

La respuesta se presenta como un objeto JSON con la cantidad de datos escritos.

{ "Words": "0001" }

El tiempo epoch corresponde a Timestamp así: 1760848760 es 2025-10-18 23:39:20

Para crear un esquema de persistencia es necesario lanzar un broker especificando el nombre de su base de datos (el broker la crea automáticamente), la clave de seguridad como por ejemplo “mgd@lkjhgfdsa!731” y apuntando a un broker Modbus-Mgd determinado **“http://18.191.129.89:1032”.**

Para configurar los barridos automáticos es necesario enviar requerimientos con la API “query” y la función “W” para que la base de datos “dbas1029” tenga una tabla “amp0119” que recibe los barridos **“000101190006000300000010?abcde”** cada 10 segundos.

http://18.191.129.89:1029/query=W,dbas1029.amp0119,data{0,10:000101190006000300000010?abcde}?1234/

La clave “**1234**” es la clave de seguridad del broker de persistencia. La respuesta de confirmación de que se ha creado o configurado el barrido es:

{ "Status": "Scan_programmed,dbas1029.amp0119=0,10:000101190006000400000010?abcde" }

Para hacer la configuración anterior con múltiples barridos, se envía el requerimiento:

http://18.191.129.89:1029/query=W,dbas1029.amp0119,data{0,10:0001011900060004000010.0001011900060003000000010?abcde}?1234/

Las tramas de barrido (que corresponden a Modbus-TCP del punto 3) van separadas por “.”

Para leer los barridos es necesario enviar requerimientos con la API “query” y la función “R” para que la base de datos “dbas1029” devuelva el contenido de la tabla “amp0119” de acuerdo con el criterio del filtro “{FIRST,LAST}”, se debe enviar el requerimiento:

http://18.191.129.89:1029/query=R,dbas1029.amp0119,filter{FIRST,LAST}?1234/

Las palabras claves FIRST y LAST se refieren a la primera y la última entrada almacenadas. Para consultar fechas específicas se deben escribir en formato epoch.

La respuesta presenta un objeto JSON con las fechas en formato epoch y los datos bajo la entrada “Value”, de la siguiente manera:

{ "Time": "1761519612202",
"Value": "0AD801D901AF01BB00E1018B01FE01F800000000" },
{ "Time": "1761519676823",
"Value": "0AD301D601AD01B900C9013301C201EB0000000" },
{ "Time": "1761519741281",
"Value": "0ADB01D901B501BF01FE014500A2006900000000" },
{ "Time": "1761519806227",
"Value": "0ADC01D901B401BF0105007900750100000000000" },

Para borrar datos de la tabla “amp0119” de la base de datos “dbas1029” según el filtro “{LAST}” en el broker con clave “mgd@lkjhgfdsa!731”, se debe enviar el requerimiento:

http://18.191.129.89:1029/query=C,dbas1029.amp0119,filter{LAST}?mgd@lkjhgfdsa!731/

La respuesta de confirmación de borrado es:

{ "Status": "Deleted,dbas1029.amp0119=LAST" }

Creación del panel de supervisión con indicadores, alarmas y controles.

Estrategias para presentar datos remotos en dashboard. Para la presentación de datos remotos en dashboards, se implementa una estrategia basada en el uso de solicitudes HTTP que permiten consultar la información almacenada en los dispositivos AMP1-F a través del broker. Estas

consultas son realizadas desde aplicaciones web o entornos de desarrollo utilizando lenguaje JavaScript, donde se ejecutan funciones que envían peticiones al servidor y reciben como respuesta los datos en formato JSON. Posteriormente, estos valores son procesados, convirtiendo la información hexadecimal en datos numéricos comprensibles, lo que permite su representación en gráficos, indicadores o tablas dentro del dashboard. Este procedimiento facilita la visualización en tiempo real del estado del sistema, permitiendo al usuario interpretar de manera clara las variables eléctricas y operativas del nodo.

```
async function fetchData() {
url = "http://18.191.129.89:1032/modbus=000101190006000304000010?abcde/";
try {
   const response = await fetch(url);
   if (!response.ok) {
     throw new Error(`HTTP error! status: ${response.status}`);
   }
   const data = await response.json(); // Parseamos como JSON
   const hexValue = data.Value; // Extraemos solo el campo "Value"
   decimalValues = parseHexValue(hexValue); // Convertimos a decimales
 } catch (error) {
   console.error("Error:", error);
 }
}



async function sendData(valuex) {
  if((valuex & 1) == 1){
   url = "http://18.191.129.89:1032/modbus=000101190009001000000001020001?abcde/";
  } else {
   url = "http://18.191.129.89:1032/modbus=000101190009001000000001020000?abcde/";
  }
  try {
   const response = await fetch(url);
   if (!response.ok) {
     throw new Error(`HTTP error! status: ${response.status}`);
   }
   const data = await response.json(); // Parseamos como JSON
      const hexValue = data.Function + data.Words; // Extraemos los campos "Function" +
"Words"
      document.getElementById("story").value = hexValue;
  } catch (error) {
   console.error("Error:", error);
  }
}
```

Estrategias para enviar datos a los dispositivos de campo. Para el envío de datos hacia los dispositivos de campo, se emplean funciones programadas que generan solicitudes de escritura hacia los registros del autómata.

Estas funciones construyen dinámicamente las tramas de comunicación dependiendo de la acción requerida, permitiendo activar o desactivar estados, modificar variables o ejecutar comandos específicos dentro del sistema.

Una vez enviada la solicitud, el dispositivo responde con un mensaje en formato JSON que confirma la correcta ejecución de la operación, lo cual permite validar el proceso y asegurar la confiabilidad de la comunicación.

4. Fase 4 – Pruebas y validación (Semanas 13 a 16):

Comparación entre resultados teóricos y experimentales.

La **Figura 27**, la **Figura 28** y la **Figura 29** muestran las simulaciones de voltaje fase neutro, fase desface y fase-fase.

Análisis de señales del inversor trifásico. Con el fin de validar el funcionamiento del sistema inversor implementado en el nodo de carga variable comercial, se analizaron las señales generadas mediante el código de control del ondulador trifásico y las formas de onda obtenidas durante las pruebas realizadas.

El código implementado permite generar señales sinusoidales trifásicas moduladas mediante PWM, utilizando desfases de 120° entre fases para representar un sistema trifásico balanceado. Para ello, el programa emplea funciones sinusoidales y temporizadores internos del microcontrolador, permitiendo variar la frecuencia de operación y controlar el comportamiento del inversor.

El algoritmo configura las salidas digitales encargadas de controlar la polaridad de cada rama del inversor, mientras que las señales PWM son calculadas mediante funciones seno absolutas, generando una aproximación sinusoidal en la salida del sistema.

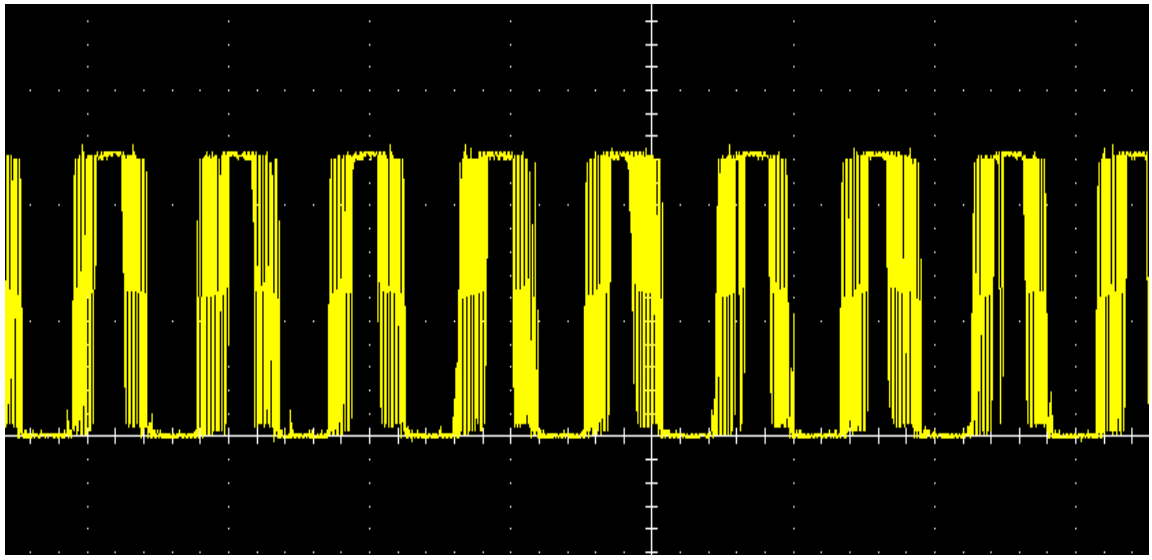
Adicionalmente, el código incorpora comunicación serial para modificar parámetros de frecuencia y un sistema de temporización encargado de sincronizar la generación de las señales trifásicas.

Señal “Fase - Neutro” La imagen “Fase - Neutro” corresponde a la señal medida entre una fase y el neutro del sistema inversor. La forma de onda presenta un comportamiento pulsante controlado mediante PWM, donde se observan periodos de conducción y conmutación asociados a la estrategia de control implementada.

La señal evidencia una referencia estable del neutro y un comportamiento coherente con el funcionamiento esperado del sistema trifásico programado. Asimismo, las variaciones en el ancho de pulso muestran el proceso de modulación utilizado para aproximar el comportamiento sinusoidal de la salida.

Este tipo de señal es característico de inversores controlados digitalmente y permite verificar el correcto funcionamiento de las etapas de potencia y control del prototipo.

Figura 27. *Simulación de voltaje fase- neutro*



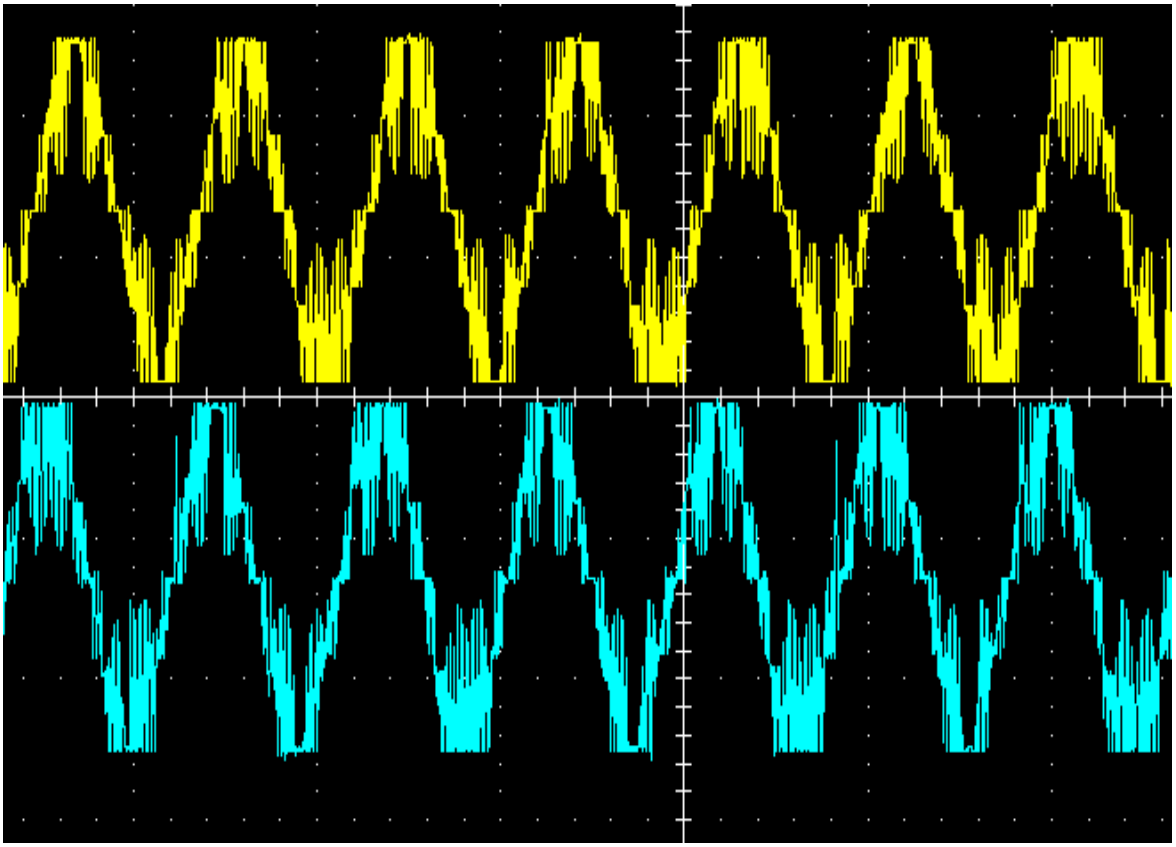
Fuente: Notas de clase

Señal “Fase-Desfase” La imagen “Fase - Desfase” presenta dos señales correspondientes a diferentes fases del sistema trifásico. En la gráfica se observa el desfase angular existente entre ambas señales, validando el comportamiento esperado de un sistema trifásico balanceado.

El desfase generado es coherente con la programación implementada en el código, donde las variables de control fueron desplazadas angularmente para representar los 120° eléctricos característicos de este tipo de sistemas.

Adicionalmente, se observa la modulación PWM sobre ambas fases, evidenciando que el inversor no genera una señal sinusoidal pura, sino una aproximación sinusoidal obtenida mediante técnicas de conmutación electrónica de alta frecuencia.

Figura 28. *Simulación fase-desfase*



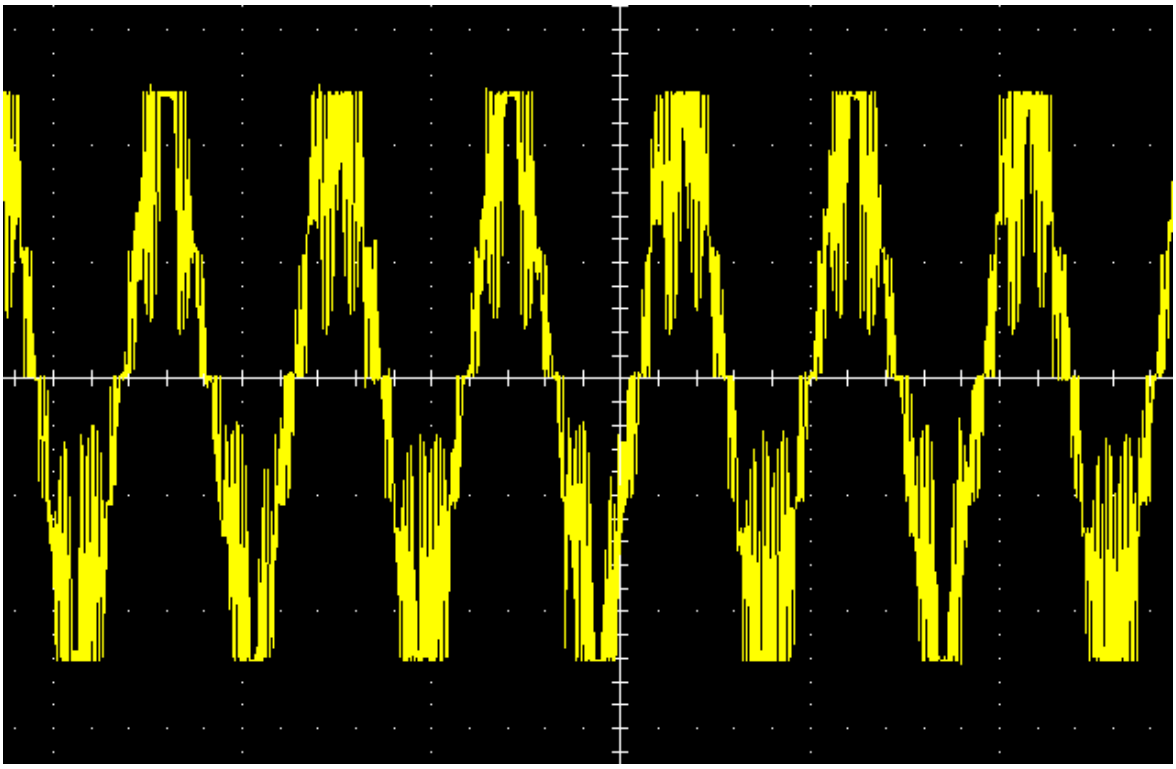
Fuente: Notas de clase

Señal “Fase-Fase” La imagen denominada “Fase - Fase” muestra la señal de salida entre dos fases del inversor trifásico. Se observa una forma de onda alterna con comportamiento sinusoidal obtenida mediante modulación PWM.

La señal presenta múltiples conmutaciones rápidas propias de la electrónica de potencia, donde el ancho de los pulsos varía de acuerdo con la referencia sinusoidal programada en el código del ondulador. La envolvente general de la señal permite identificar claramente el comportamiento AC generado por el inversor.

Este resultado evidencia que el sistema implementado logra sintetizar una señal alterna trifásica a partir de técnicas de conmutación electrónica controladas digitalmente.

Figura 29. *Simulación fase-fase*



Fuente: Notas de clase

A continuación, se muestra la captura del voltaje del prototipo físico y curvas con datos recolectados y su comparación con los datos de la simulación.

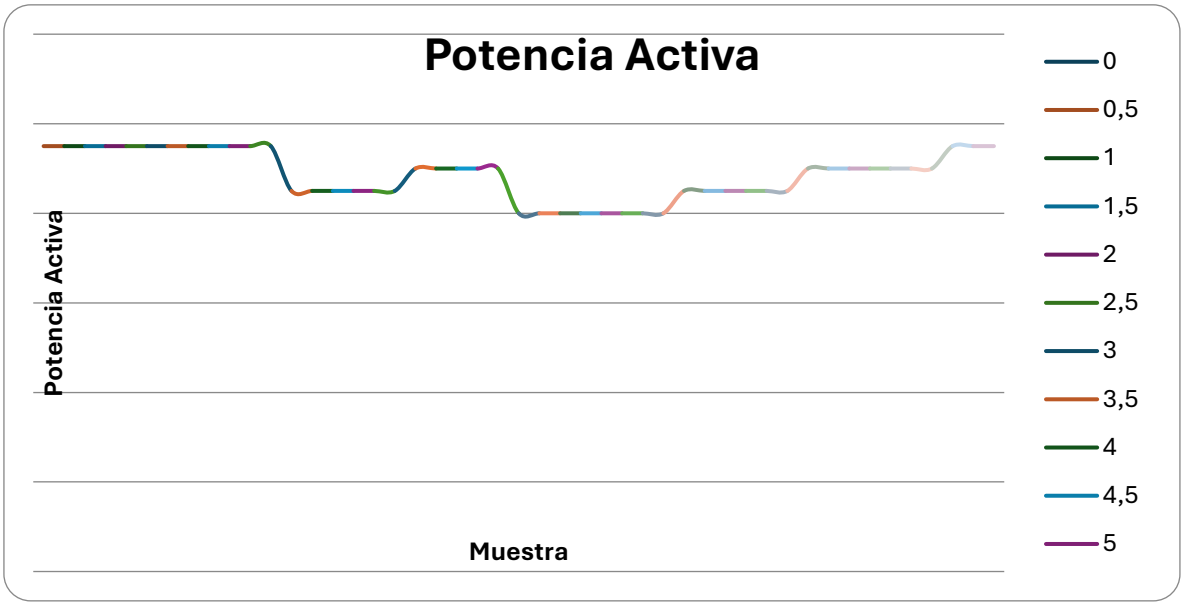
Tabla 1. *Datos del Emulador*

Hora	Voltaje AC	Corriente	CosFi	P. Activa	P.Reactiva	P.Aparente
0	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
0.5	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
1	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
1.5	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
2	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
2.5	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
3	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
3.5	16	0.5	0.95	7.6	2.5	8
4	16	1.3	0.95	19.76	6.49	20.8

Hora	Voltaje AC	Corriente	CosFi	P. Activa	P.Reactiva	P.Aparente
4.5	16	1.3	0.95	19.76	6.49	20.8
5	16	1.3	0.95	19.76	6.49	20.8
5.5	16	1.3	0.95	19.76	6.49	20.8
6	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
6.5	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
7	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
7.5	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
8	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
8.5	16	2.4	0.85	32.64	20.23	38.4
9	16	1.7	0.9	24.48	11.86	27.2
9.5	16	1.7	0.9	24.48	11.86	27.2
10	16	1.7	0.9	24.48	11.86	27.2
10.5	16	1.7	0.9	24.48	11.86	27.2
11	16	1.7	0.9	24.48	11.86	27.2
11.5	16	3.1	0.8	39.68	29.76	49.6
12	16	3.1	0.8	39.68	29.76	49.6
12.5	16	3.1	0.8	39.68	29.76	49.6
13	16	3.1	0.8	39.68	29.76	49.6
13.5	16	3.1	0.8	39.68	29.76	49.6
14	16	2.2	0.8	28.16	21.12	35.2
14.5	16	2.2	0.8	28.16	21.12	35.2
15	16	1.5	0.8	19.2	14.4	24
15.5	16	1.5	0.85	20.4	12.64	24
16	16	1.5	0.85	20.4	12.64	24
16.5	16	1.5	0.85	20.4	12.64	24
17	16	1.5	0.85	20.4	12.64	24
17.5	16	2.3	0.85	31.28	19.39	36.8
18	16	2.8	0.85	38.08	23.6	44.8
18.5	16	2.8	0.9	40.32	19.53	44.8

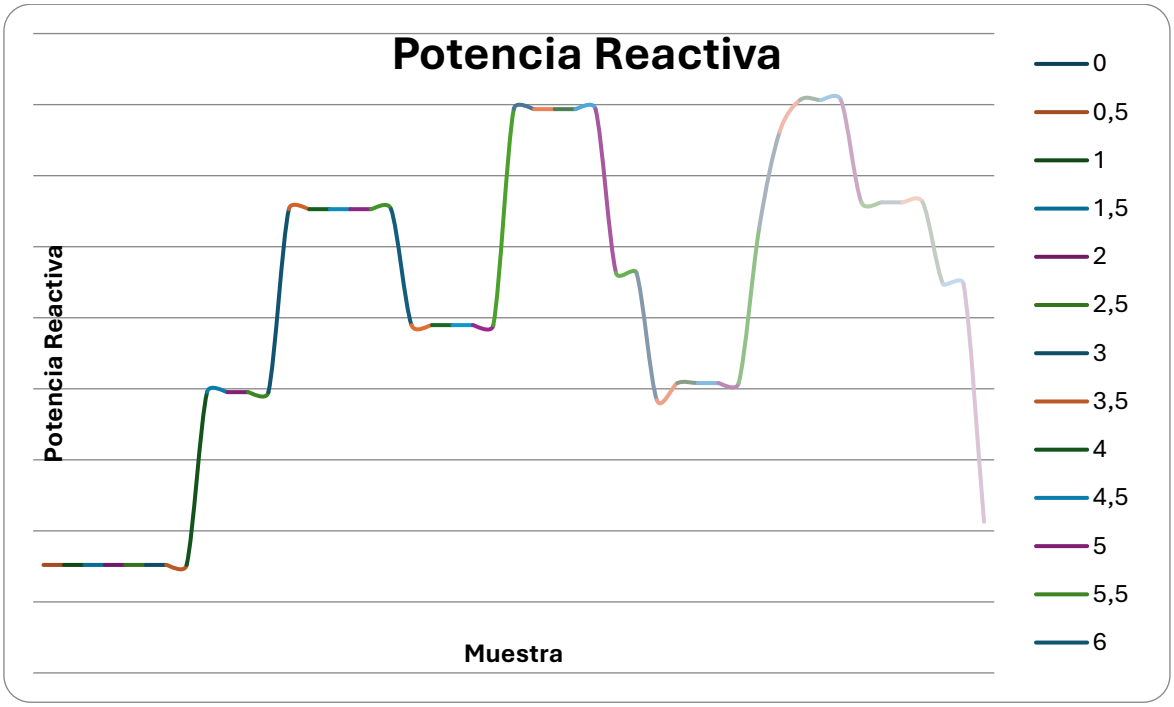
Los gráficos resultantes son:

Figura 30. *Curva de potencia activa*



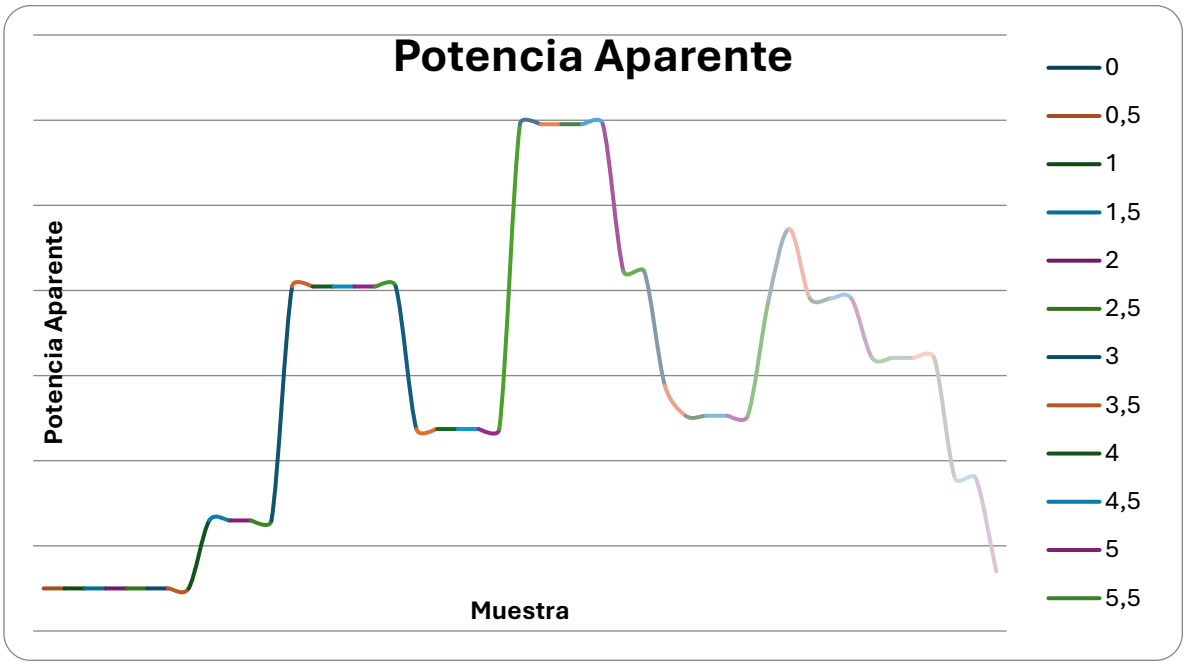
Fuente: Notas de clase

Figura 31. *Curva de potencia reactiva*



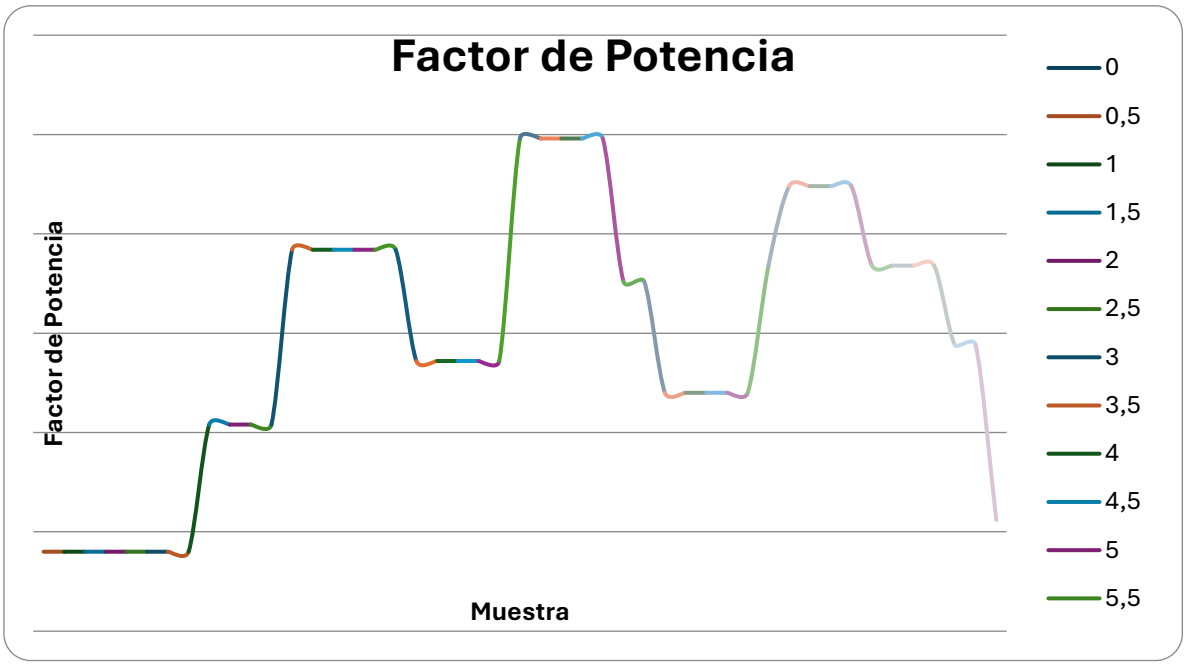
Fuente: Notas de clase

Figura 32. *Curva de potencia aparente*



Fuente: Notas de clase

Figura 313 Curva de factor de potencia



Fuente: Notas de clase

Durante la fase de diseño y simulación del proyecto se desarrolló un modelo del nodo de carga variable comercial en MATLAB, con el objetivo de representar el comportamiento eléctrico del sistema bajo diferentes condiciones de operación y variaciones de carga. En esta etapa se analizaron variables como potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, corriente, tensión y factor de potencia, permitiendo validar teóricamente el comportamiento esperado del nodo dentro de la microrred didáctica.

Posteriormente, durante la fase experimental, se realizaron pruebas físicas sobre el prototipo del nodo de carga comercial el día 11 de mayo de 2026, obteniendo registros reales de funcionamiento mediante la plataforma de adquisición de datos integrada al sistema IoT-SCADA. Los resultados experimentales permitieron construir las gráficas de comportamiento eléctrico del nodo y compararlas con los resultados obtenidos previamente en simulación.

A partir de las gráficas experimentales se observó que el voltaje AC permaneció prácticamente constante durante toda la prueba, manteniéndose alrededor de los 16 V. Este comportamiento coincide con lo esperado en la simulación, donde la fuente de alimentación del nodo se modeló bajo condiciones estables de tensión, permitiendo que las variaciones observadas estuvieran asociadas principalmente a los cambios de carga y no a perturbaciones de la fuente.

En cuanto a la corriente AC, se evidenciaron variaciones importantes durante el ensayo, alcanzando valores aproximados entre 0,5 A y 3,1 A. Este comportamiento es coherente con el modelo desarrollado en MATLAB, donde el nodo fue configurado para representar una carga variable de tipo comercial. Las fluctuaciones de corriente observadas tanto en simulación como en el prototipo físico demuestran que el sistema responde adecuadamente ante cambios en la demanda eléctrica.

Respecto a la potencia activa, las gráficas experimentales mostraron un comportamiento dinámico con incrementos y disminuciones asociados directamente a la variación de corriente del nodo. Los valores máximos registrados estuvieron cercanos a 40 W, mientras que los mínimos se aproximaron a 7 W. En la simulación se obtuvo una tendencia similar, observándose que el nodo incrementa su consumo de potencia activa cuando aumenta la carga conectada. La similitud entre ambas curvas evidencia una adecuada representación matemática del comportamiento eléctrico del sistema.

Para la potencia reactiva se identificaron variaciones más pronunciadas en ciertos intervalos de operación, principalmente cuando el factor de potencia disminuyó. Este comportamiento también

fue previsto durante la etapa de simulación, donde se analizaron escenarios de flujo de potencia activa y reactiva dentro de la microrred. Tanto en simulación como en las pruebas experimentales se observó que el nodo presenta un comportamiento característico de cargas comerciales con componentes reactivos, generando un incremento de la demanda de potencia reactiva en determinados momentos de operación.

La potencia aparente presentó un comportamiento directamente relacionado con la combinación de potencia activa y reactiva. Los resultados experimentales mostraron incrementos significativos en los intervalos de mayor corriente, alcanzando valores cercanos a 50 VA. Este comportamiento coincide con el modelo implementado en MATLAB, validando la relación entre las variables eléctricas simuladas y las medidas experimentalmente.

Adicionalmente, el análisis del factor de potencia permitió identificar cambios durante el funcionamiento del nodo, evidenciando periodos donde la carga presentó un comportamiento más inductivo. Estos resultados son coherentes con los análisis teóricos realizados durante la etapa de diseño y simulación, donde se planteó que el comportamiento dinámico de la carga influye directamente sobre el flujo de potencia y la estabilidad de la microrred.

De manera general, la comparación entre las gráficas simuladas y los resultados experimentales muestra una alta concordancia en la tendencia de las variables eléctricas analizadas. Aunque se presentan pequeñas diferencias entre algunos valores simulados y medidos, estas pueden asociarse a factores propios de la implementación física, tales como tolerancias de componentes, ruido eléctrico, tiempos de respuesta de los sensores y condiciones reales de operación del prototipo.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten validar el funcionamiento del nodo de carga variable comercial y confirmar que el modelo desarrollado en MATLAB representa de manera adecuada el comportamiento del sistema físico implementado. Esto demuestra la viabilidad del prototipo para su integración en la microrred didáctica de investigación y para futuras prácticas académicas relacionadas con supervisión, automatización y análisis energético mediante plataformas IoT-SCADA.

Relación entre las señales y el código del ondulador. Las señales observadas en las figuras anteriores presentan relación directa con el código implementado para el control del inversor

trifásico. En el programa se utilizan funciones seno para generar las referencias de cada fase, además de desfases de 120° entre señales, lo que permite obtener un sistema trifásico balanceado.

Las señales PWM observadas experimentalmente coinciden con el comportamiento esperado durante la simulación desarrollada en MATLAB, especialmente en aspectos relacionados con:

- Desfase angular entre fases.
- Modulación PWM.
- Comportamiento sinusoidal aproximado.
- Control de polaridad del inversor.
- Operación trifásica balanceada.

La comparación entre las señales simuladas y experimentales permite validar el correcto funcionamiento del sistema de control implementado en el nodo de carga variable comercial y confirmar la coherencia entre el modelo teórico y el comportamiento físico del prototipo.

6.5. Viabilidad técnica y seguridad

El proyecto ha sido concebido para asegurar que sea viable desde el punto de vista operativo y técnico en el ámbito académico, teniendo en cuenta:

- Elementos de bajo precio y fácil acceso local.
- Corrientes y tensiones seguras para la enseñanza.
- Un diseño modular que haga más fácil la ampliación, reparación o mantenimiento.
- Aplicación de protecciones eléctricas esenciales (fusibles, interruptores térmicos).
- Cumplimiento de las reglas de seguridad eléctrica del laboratorio institucional.

Asimismo, el empleo anterior de simulación en MATLAB reducirá los peligros eléctricos durante la fase experimental, ya que posibilitará prever situaciones críticas y verificar los valores de diseño antes de la instalación real.

6.6 Impacto Técnico del Prototipo

El proyecto se completará con un sistema real y funcional para simular cargas comerciales en la microrred didáctica, con potencial para crecer en el futuro.

Su efecto se mostrará en:

- Consolidación del laboratorio de la entidad, proporcionándole un módulo de carga que se pueda medir y controlar.

- Unificación eficiente entre la práctica y la teoría, a través de la experimentación directa con sistemas eléctricos inteligentes.
- Capacidad para escalar y replicar, dado que el diseño modular facilitará la inclusión de más nodos.

6.7 Resultados de la propuesta

Se espera que el proyecto "Construcción de un prototipo de nodo de carga variable comercial para la microrred didáctica de investigación en la Institución Universitaria Pascual Bravo con integración a una aplicación IoT-SCADA de supervisión" termine con una serie de resultados técnicos, académicos y formativos que ayuden a fortalecer las habilidades profesionales de los alumnos involucrados, así como a afianzar el laboratorio de microrredes del centro educativo.

A continuación, se detallan los resultados previstos según la estructura de productos del trabajo de grado y las metas propuestas:

6.8 Resultados Técnicos y de Desarrollo del Prototipo

A. Prototipo físico funcional del nodo de carga variable comercial

La creación de un módulo físico que imite el comportamiento de una carga comercial variable en una microrred educativa será el resultado más importante. Este prototipo se va a componer de:

- Una serie de resistencias eléctricas y componentes de conmutación regulados electrónicamente que posibiliten cambiar la demanda de energía de forma controlada y progresiva.
- Un sistema de control embebido, el cual se ha puesto en funcionamiento a través de un autómata programable, que tiene la responsabilidad de manejar las fluctuaciones de carga y transmitir los datos operativos a la plataforma IoT-SCADA.
- Sensores de voltaje, potencia, corriente y factor de potencia que están integrados para calcular las variables eléctricas del sistema.

B. Modelo de simulación en MATLAB.

Se generará un modelo computacional del nodo de carga variable comercial en el ambiente MATLAB como resultado adicional. Este modelo posibilitará:

- Mostrar cómo se comporta eléctricamente el nodo frente a diferentes perfiles de carga.
- Examinar el flujo de potencia activa y reactiva en la microrred.

- Analizar la estabilidad del sistema frente a cambios en la demanda y las condiciones de funcionamiento.
- Validar teóricamente el diseño del prototipo previo a la construcción física.

El modelo funcionará como un recurso de apoyo pedagógico para prácticas académicas que se realicen en el futuro.

C. Integración con la plataforma IoT–SCADA

Uno de los hallazgos más significativos será la incorporación del prototipo físico y el modelo de simulación a una plataforma para supervisar IoT-SCADA, utilizando protocolos de comunicación como Modbus TCP/IP o MQTT.

Esto posibilitará:

- Observar en tiempo real las variables eléctricas (carga, potencia, corriente y tensión).
- Desde un panel SCADA o una interfaz gráfica, supervisar de manera remota la magnitud de la carga.
- Mantener un registro y almacenar datos históricos para la trazabilidad y el análisis.
- Verificar la interoperabilidad entre redes de comunicación, sistemas embebidos y programas de supervisión industrial.

El sistema IoT–SCADA se convertirá en una herramienta de aprendizaje e investigación, apta para mostrar a los estudiantes la relación entre los sistemas eléctricos y las tecnologías de la industria.

6.9 Resultados Académicos y Formativos

A. Fortalecimiento del laboratorio de microrredes didácticas

El prototipo se integrará al laboratorio de investigación y docencia en microrredes de la institución, constituyéndose como un módulo base para la experimentación y la enseñanza aplicada.

El resultado permitirá:

- Llevar a cabo ensayos de eficiencia energética y estabilidad bajo diversas condiciones de carga.
- Aplicar procedimientos de análisis del flujo de potencia y la calidad energética.

- Desarrollar proyectos de investigación o de grado novedosos que permitan la expansión del sistema (por ejemplo, el control avanzado, la integración de fuentes solares o el almacenamiento).

Así, el proyecto proporcionará un recurso duradero a la infraestructura académica, que tiene un gran valor educativo y una notable capacidad de replicación.

B. Desarrollo de competencias profesionales

La implementación del proyecto posibilitará que los miembros del grupo obtengan y evidencien habilidades en:

- Creación y modelaje de sistemas eléctricos.
- Programación de controladores embebidos y sistemas SCADA.
- Integración de sistemas eléctricos con tecnologías del Internet de las Cosas (IoT).
- Documentación técnica, administración de proyectos y análisis de datos eléctricos.

En el campo de la ingeniería eléctrica contemporánea, sobre todo en los campos de automatización, administración energética y creación de soluciones sustentables, se requieren estas competencias.

7. Conclusiones

A través del presente proyecto se diseña, simula e implementa un prototipo funcional de nodo de carga variable comercial, cumpliendo con el objetivo general trazado a través de la supervisión de la plataforma IoT SCADA. La integración dentro de una microrred didáctica demostró viabilidad técnica al combinarse las herramientas de simulación, control industrial y tecnología de la comunicación en un entorno teórico-académico.

Con respecto al diseño del modelo conceptual y eléctrico, se establece una arquitectura funcional del nodo que integra las etapas de potencia, control e instrumentación. Por medio de este diseño se representa de una forma adecuada el comportamiento de las cargas comerciales variables, sirviendo de base para la simulación y la implementación física del sistema.

A través de las simulaciones en MATLAB, se desarrolla un modelo que reproduce el comportamiento eléctrico del nodo bajo las diversas condiciones operativas trazadas. Como resultado, se obtuvo coherencia entre las variables simuladas (potencia, corriente, tensión y factor de potencia) y los datos obtenidos del aforo de las cargas, por lo que se valida el modelo teórico, se disminuyen las incertidumbres que se tenían y se da paso a la construcción del prototipo.

Cuando el prototipo físico entra en ejecución, se consigue armar un sistema operativo que combina un autómata programable, un controlador de potencia, sensores de medición y una batería de cargas resistivas. Los protocolos industriales usados, como Modbus para la comunicación, permitieron que los dispositivos de control interactuaran de forma efectiva con la plataforma de supervisión.

En tiempo real se pudieron medir y controlar las variables eléctricas del sistema al integrarse con la plataforma IoT SCADA, demostrando la interoperabilidad entre las tecnologías IoT y los sistemas de automatización industrial. El análisis del comportamiento del nodo dentro de la microrred fue facilitado a través de esta integración, así como la supervisión a distancia y el almacenamiento de datos.

Tanto en la simulación como en los entornos reales, las pruebas hechas variaron y confirmaron que el nodo operaba correctamente, que era estable y respondía funcionalmente a los cambios de carga, por lo que se evidencia una gran coincidencia entre los hallazgos teóricos y los experimentales, validando el diseño y su correcta implementación.

Desde la perspectiva académica, el proyecto proporciona un recurso experimental y didáctico que robustece el laboratorio de microrredes de la Institución Universitaria Pascual Bravo, al posibilitar prácticas en campos tales como supervisión energética, integración IoT y control de sistemas eléctricos. Asimismo, ayuda a fomentar habilidades en simulación, automatización, modelado e instrumentación.

Por último, el prototipo creado tiene propiedades de escalabilidad y modularidad, lo cual facilita su futura expansión con sistemas de almacenamiento energético, generación distribuida o estrategias sofisticadas de control. Esto lo establece como una plataforma fundamental para el progreso de proyectos novedosos de investigación aplicada en sistemas energéticos inteligentes y microrredes.

8. Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros integrar fuentes de generación distribuida, como sistemas fotovoltaicos y eólicos a pequeña escala, ampliando así el alcance del prototipo y permitiendo el estudio completo de una microrred híbrida en condiciones reales de operación.

Se recomienda incorporar sistemas de almacenamiento de energía (baterías u otros dispositivos que lo permitan) para analizar estrategias de gestión energética, dando así respuesta a las variaciones de carga y posibilitando la operación en modo isla dentro de la microrred didáctica.

El sistema de medición se puede mejorar mediante la implementación de sensores de mayor precisión y módulos de adquisición de datos más robustos, con el fin de obtener resultados experimentales detallados y confiables para análisis avanzados.

Se recomienda profundizar en el desarrollo de estrategias de control más avanzadas —tales como control automático de carga, respuesta a la demanda o algoritmos inteligentes—, lo cual permitiría optimizar el comportamiento del nodo dentro de la microrred.

Por último, se recomienda implementar el sistema como una plataforma modular de laboratorio, incorporando nuevos nodos y facilitando su uso en proyectos de investigación y formación académica.

Referencias Bibliográficas

A, B. S. (2009). *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition.* ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Akpolat, A. N., Yang, Y., Blaabjerg, F., Dursun, E., & Kuzucuoğlu, A. E. (2021). Design implementation and operation of an education laboratory-scale microgrid. *IEEE Access, 9*, 57949-57966. https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/9312710/09402732.pdf

Bano, F., Rizwan, A., H.Serbaya, S., Hasan, F., Karavas, C. S., & Fo, G. (2024). Integrating Microgrids into Engineering Education: Modeling and Analysis for Voltage Stability in Modern Power Systems. 29. https://www.mdpi.com/1996-1073/17/19/4865?utm_source=chatgpt.com

Borky, J. M., & Bradley, T. H. (2018). *Effective model-based systems engineering.* Springer.

Elvira, D. G., Blavi, H. V., Pastor, A. C., & Salamero, L. M. (2018). Efficiency Optimization of a Variable Bus Voltage DC Microgrid. *MDPI*, 21. https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3090?utm_source=chatgpt.com

Ernest O. Doebelin, D. N. (2017). *Measurement Systems: Application and Design.* New York, United States: McGraw-Hill Education.

ESPRESSIF. (2020). ESPRESSIF: https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

Fitzgerald, A. K. (2003). *Electric Machinery.* Mc.Graw Hill, Internationa.

Frede Blaabjerg, Y. Y. (2018). Power electronics – The key technology for renewable energy systems. págs. 2-14.

García-Peñalvo, F. J. (2019). nteligencia Artificial. Una perspectiva desde la ficción a la realidad. *https://bit.ly/2Q0jap0. doi: 10.5281/zenodo.2818903*.

Güngör, V. C. (2009). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *(IEEE Transactions on Industrial Informatics*, págs. 529–539.

Haidekker, M. A., Liu, M., & WenZhan. (2023). Alternating-Current Microgrid Testbed Built with Low-Cost Modular Hardware. *MDPI*, 21. https://www.mdpi.com/1424-8220/23/6/3235?utm_source=chatgpt.com

Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and sustainable Energy reviews, 90*, 402-411. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830128X

Institute, P. P. (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge.* Project Management Institute: https://www.pmi.org/standards

Juan Carlos Gómez, J. A. (2022). *Diseño y construcción de módulos didácticos para la enseñanza de ingeniería eléctrica.* Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling (12th ed.).* Hoboken, New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

Kotsampopoulos, P. C., Kleftakis, V. A., & Hatziargyriou, N. D. (2016). Laboratory education of modern power systems using PHIL simulation. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(5), 3992-4001. https://ieeexplore.ieee.org/iel7/59/4374138/07801946.pdf

Kundur. (1994). *Power system stability and control (The EPRI power system engineering series).*

L. Iera, A. M. (2010). The Internet of Things: A survey. *Elsevier*.

Lidula, n. d., & Rajapakse, A. (15 de Enero de 2011). Investigación sobre microrredes: una revisión de microrredes experimentales y sistemas de prueba. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, págs. 186 - 202.

Linus Lawrenz, B. X. (2018). *Explorando las vías energéticas para la transformación hacia una economía baja en carbono en la India: un análisis basado en modelos.* Basilea, Suiza: MDPI.

Liping guo, J. K. (2021). Design of a Laboratory Scale Solar Microgrid Cyber-Physical System for Education. *MDPI*, 13. https://www.mdpi.com/2079-9292/10/13/1562?utm_source=chatgpt.com

MathWorks. (29 de 10 de 2025). MathWorks: https://la.mathworks.com/discovery/power-electronics-simulation.html

MathWorks. (29 de 10 de 2025). MathWorks: https://la.mathworks.com/discovery/power-electronics-simulation.html

MDPI. (29 de Marzo de 2017). MDPI: https://www.mdpi.com/2227-7080/5/2/12#sec4-technologies-05-00012

Peterson, C. J. (2019). *Systems architecture design and validation methods for microgrid systems.* {Doctoral dissertation, Monterey, CA; Naval Postgraduate School}. https://calhoun.nps.edu/bitstreams/c9229346-f5bb-44d7-90bb-2e5697adec27/download

Prabir Mitra, G. K. (s.f.). Smart microgrid monitoring, management, and control: A review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, págs. 4349–4359.

Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications.* Harlow, England: Pearson Education Limited.

Restrepo-Zambrano, J. A., Ramírez-Scarpetta, J. M., Orozco-Gutiérrez, M. L., & Tenorio-Melo, J. A. (2016). Experimental framework for laboratory scale microgrids. *DOAJ*, 2. https://doaj.org/article/2b1acb8d7dc24b7bbe17d3016bf64b73?utm_source=chatgpt.com

Timothy J. Kloppenborg, V. S. (2019). *Contemporary Project Management.* Boston, Massachusetts, Estados Unidos: Cengage Learning.

Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J., Chiñas-Palacios, C., & Hurtado-Perez, E. (2019). Low-cost web-based Supervisory Control and Data Acquisition system for a microgrid testbed: A case study in design and implementation for academic and research applications. *Heliyon, 5*(9). https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(19)36134-1.pdf

Vijay, A. S., Doolla, S., & Chandorkar, M. C. (2017). Real-time testing approaches for microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 5*(3), 1356-1376. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7903597/

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (14 de Febrero de 2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Xplore*, págs. 22-32.

Anexos

Anexo 1.

Código Matlab para importar datos, realizar cálculos eléctricos y generar gráficos de potencias activa, reactiva y aparente.

```
“clc
clear
close all

% Leer archivo de Excel
datos = readtable('aforo_centro_comercial_24h.xlsx');

% Convertir la columna Hora a formato tiempo
hora = datetime(datos.Hora,'InputFormat','HH:mm');

% Variables del Excel
V = datos.Voltaje_V_;
I = datos.Corriente_A_;
fp = datos.FP;

% Constante del sistema trifásico
k = sqrt(3);



% Calculo de potencias
P = k .* V .* I .* fp;
Q = k .* V .* I .* sqrt(1 - fp.^2);
S = k .* V .* I;

% Crear tabla temporal
tabla = table(hora,P,Q,S);
```

```
% Sumar las cargas que tienen la misma hora
P_total = groupsummary(tabla,"hora","sum","P");
Q_total = groupsummary(tabla,"hora","sum","Q");
S_total = groupsummary(tabla,"hora","sum","S");

%% ---------------------------------
% Grafica potencia activa
%% ---------------------------------
figure
plot(P_total.hora,P_total.sum_P,'LineWidth',2)
grid on
title('Potencia Activa Total')
xlabel('Hora del día')
ylabel('P (W)')


% Escala del eje X cada hora
xticks(P_total.hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
xtickangle(45)

%% ---------------------------------
% Grafica potencia reactiva
%% ---------------------------------
figure
plot(Q_total.hora,Q_total.sum_Q,'LineWidth',2)
grid on
title('Potencia Reactiva Total')
xlabel('Hora del día')
ylabel('Q (VAR)')
```

```
xticks(Q_total.hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
xtickangle(45)

%% ---------------------------------
% Grafica potencia aparente
%% ---------------------------------
figure
plot(S_total.hora,S_total.sum_S,'LineWidth',2)
grid on
title('Potencia Aparente Total')
xlabel('Hora del día')
ylabel('S (VA)')
xticks(S_total.hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
xtickangle(45)”
```

Anexo 2.

Código Matlab para validación de parámetros eléctricos

```
“clc
clear
close all

% Leer hoja correcta (TRIFÁSICA)
datos = readtable('Tablas de impedancia.xlsx','Sheet','Trifásica');

% Hora
hora = datetime(datos{:,2},'InputFormat','HH:mm');

% Variables
V = datos{:,3};
P_real = datos{:,4};
Q_real = datos{:,5};
R = datos{:,6};
X = datos{:,7};

% Cálculos
P_calc = (V.^2 .* R) ./ (R.^2 + X.^2) / 1000;
Q_calc = (V.^2 .* X) ./ (R.^2 + X.^2) / 1000;
S_calc = (V.^2) ./ sqrt(R.^2 + X.^2) / 1000;

S_real = sqrt(P_real.^2 + Q_real.^2);

%% ================================
% POTENCIA ACTIVA
%% ================================
```

```
figure
plot(hora,P_real,'ro--','LineWidth',1.5) % ORIGINAL (rojo punteado)
hold on
plot(hora,P_calc,'b','LineWidth',2)   % CALCULADA (azul)

grid on
legend('P original','P calculada')
title('Comparación Potencia Activa')
xlabel('Hora')
ylabel('kW')

xticks(hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
xtickangle(45)

%% ================================
% POTENCIA REACTIVA
%% ================================
figure
plot(hora,Q_real,'ro--','LineWidth',1.5)
hold on
plot(hora,Q_calc,'b','LineWidth',2)

grid on
legend('Q original','Q calculada')
title('Comparación Potencia Reactiva')
xlabel('Hora')
ylabel('kVAr')

xticks(hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
```

```
xtickangle(45)

%% ================================
% POTENCIA APARENTE
%% ================================
figure
plot(hora,S_real,'ro--','LineWidth',1.5)
hold on
plot(hora,S_calc,'b','LineWidth',2)

grid on
legend('S original','S calculada')
title('Comparación Potencia Aparente')
xlabel('Hora')
ylabel('kVA')

xticks(hora(1:2:end))
xtickformat('HH:mm')
xtickangle(45)

%% ================================
% ERRORES (para subir nota)
%% ================================
errorP = abs(P_calc - P_real);
errorQ = abs(Q_calc - Q_real);
errorS = abs(S_calc - S_real);

fprintf('Error máximo P: %.4f kW\n', max(errorP))
fprintf('Error máximo Q: %.4f kVAr\n', max(errorQ))
fprintf('Error máximo S: %.4f kVA\n', max(errorS))”
```

Anexo 3.

Código Matlab del inversor trifásico

```
//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
    }

    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;
    }
}
```