DISEÑAR UN NODO DE CARGA VARIABLE INDUSTRIAL PARA UNA MICRO RED DIDÁCTICA

LUIS MIGUEL ESPINOSA SANCHEZ

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2026

DISEÑAR UN NODO DE CARGA VARIABLE INDUSTRIAL PARA UNA MICRO RED DIDÁCTICA

LUIS MIGUEL ESPINOSA SANCHEZ

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista

Asesor técnico:
Bayron Álvarez Arboleda
Ph.D. en estudios organizacionales

Asesor metodológico:
Jose Ricardo Velasco Méndez
Ph.D. en educación

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA ELECTRICA
MEDELLÍN
2026

Contenido

Introducción 12

1. Planteamiento del problema 13

1.1 Descripción 13

1.2 Formulación 13

2. Justificación 14

3. Objetivos 15

3.1 Objetivo general 15

3.2 Objetivos específicos 15

4. Referentes teóricos 16

4.1 Redes de transmisión de energía eléctrica 16

4.2 Redes monofásicas, trifásicas y de corriente directa 17

4.2.1 Redes monofásicas 17

4.2.2 Redes trifásicas 17

4.2.3 Redes de corriente alterna 18

4.3 Microrredes de energía eléctrica 19

4.4 Transición energética Justa y digitalización del sistema eléctrico 19

4.5 Emulación de procesos eléctricos 20

4.6 Teoría sobre el nodo a emular 21

4.7 Integración de generadores y cargas en una micro red 23

4.8 Simulación tipo Hardware-in-the-Loop (HIL) 24

4.9 Internet de las cosas (IoT) y control supervisor 25

4.10 Modelo del nodo a implementar 26

4.11 Módulo PLC Amp1-F aplicados a los procesos eléctricos 26

4.12 Inversores electrónicos de voltaje 28
5. Metodología 29
5.1 Tipo de proyecto 29
5.2 Instrumentos de recolección de información. 35
5.2.1. Fuentes primarias 35
5.2.3 Fuentes secundarias. 36
5.3 Método 30
6. Resultados 37
6.1 Fundamentación matemática para la validación de datos 37
6.2 Módulo de carga variable 38
6.3 Módulo de sensado eléctrico 39
6.4 Módulo de control con PLC Amp1-F (Basado en ESP32). 39
6.5 Módulo de comunicación y supervisión (SCADA/IoT) 40
6.6 Principio general de funcionamiento 40
6.7 Diagrama de flujos. 41
6.8 Simulación del nodo de carga variable industrial 41
6.9 Prototipo físico del nodo de carga variable industrial 42
6.10 Validación experimental y análisis comparativo 43
6.11 Desarrollo del sistema de inversión y control 43
6.11.1 Lógica de Programación del Firmware 43
6.11.2 Análisis Experimental de Señales de Salida 45
6.10.2.1 Señal Fase a Neutro 45
6.10.2.2 Señal Fase a Fase en Fase 46
6.10.2.3 Señal Fase a Fase en desfase. 47
6.11 Análisis de Resultados: Nodo de Carga Variable Industrial 48

6.11.1 Comportamiento de la demanda industrial 50
6.11.2 Validación del Prototipo: Simulación Digital vs. Simulación Física. 52
6.11.3 Cálculo del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE) 53
7 Conclusiones 54
8 Recomendaciones 55
9 Referencias 56
10 Bibliográficas 59

Lista de tablas

Tabla 1.....48
Tabla 2.....49
Tabla 3.....53

Lista de figuras

Figura 1. Diferentes condiciones de una red eléctrica de 50Hz. 18
Figura 2. Diagrama estrategias de digitalización energética. 20
Figura 3 Comportamiento sinusoidal de la corriente y la tensión en las barras de la micro red. 22
Figura 4. Esquema de conexión de la micro red 23
Figura 5. Ilustración del AMP1 – F 27
Figura 6. Diagrama de flujos de proceso de la Micro red didáctica. 41
Figura 7. Diagrama en bloques del Nodo. 42
Figura 8. Forma de onda de tensión de salida: medición Fase-Neutro (60 Hz). 45
Figura 9.Validación de sincronismo: señales de fase en concordancia temporal. 46
Figura 10. Comportamiento trifásico: señales de fase con desfase relativo de 120°. 47
Figura 11. Perfil dinámico de corriente del nodo industrial. 50
Figura 12. Evolución de la Potencia Activa (P) y Reactiva (Q). 51
Figura 13. Comportamiento del Factor de Potencia (CosFi) 52

Resumen

DISEÑAR UN NODO DE CARGA VARIABLE INDUSTRIAL PARA UNA MICRO RED DIDÁCTICA

LUIS MIGUEL ESPINOSA SANCHEZ

Este trabajo presenta el diseño, simulación e implementación de un nodo de carga variable industrial para su integración en una micro red didáctica. El objetivo es desarrollar un sistema capaz de emular perfiles de demanda eléctrica y analizar su impacto en la calidad de la energía. La metodología se basa en un enfoque experimental que incluye modelado en MATLAB/Simulink, diseño del sistema de potencia y control, e integración de hardware industrial. El sistema se implementa mediante un autómata programable Amp1-F como unidad de control y un driver trifásico programable Amp1-G para la regulación de la carga. Se adquieren variables eléctricas como tensión, corriente, potencia activa y reactiva, permitiendo evaluar el comportamiento dinámico del sistema. Los resultados se presentan mediante curvas de simulación que evidencian la variación de la demanda eléctrica en el tiempo. Este desarrollo permite reproducir condiciones operativas de cargas industriales y facilita el análisis de indicadores como el factor de potencia y la distorsión armónica total en entornos controlados.

Palabras clave: carga variable, micro red, PLC, calidad de energía, SCADA

Abstract

This work presents the design, simulation, and implementation of an industrial variable load node for its integration into a didactic microgrid. The objective is to develop a system capable of emulating electrical demand profiles and analyzing their impact on power quality. The methodology follows an experimental approach including MATLAB/Simulink modeling, power and control system design, and industrial hardware integration. The system is implemented using an Amp1-F programmable logic controller as the control unit and an Amp1-G programmable three-phase driver for load regulation. Electrical variables such as voltage, current, active power, and reactive power are acquired, allowing the evaluation of the system's dynamic behavior. Results are presented through simulation curves that show load variation over time. This development enables the reproduction of industrial load conditions and supports the analysis of indicators such as power factor and total harmonic distortion in controlled environments.

Keywords: variable load, microgrid, PLC, power quality, SCADA

Glosario

Amp1-F: Autómata programable utilizado como unidad de control del sistema, encargado de la adquisición de señales, procesamiento de datos y ejecución de la lógica de control en tiempo real.

Amp1-G: Driver trifásico programable empleado en la etapa de potencia para regular el suministro de energía hacia la carga, permitiendo la variación controlada del consumo eléctrico.

Autómata programable (PLC): Dispositivo electrónico diseñado para la automatización de procesos industriales mediante la ejecución de programas de control en tiempo real.

Carga variable: Sistema eléctrico cuyo consumo de potencia puede modificarse dinámicamente en función de condiciones de operación o señales de control.

Corriente eléctrica: Flujo de carga eléctrica a través de un conductor, medido en amperios (A).

Distorsión armónica total (THD): Indicador que cuantifica la presencia de armónicos en una señal eléctrica y su nivel de distorsión respecto a la señal fundamental.

Factor de potencia: Relación entre la potencia activa y la potencia aparente, que indica la eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

Micro red: Sistema eléctrico local que puede operar de manera autónoma o conectado a la red principal, integrando generación, carga y control.

Modbus: Protocolo de comunicación industrial utilizado para la transmisión de datos entre dispositivos en sistemas de automatización.

Modulación: Técnica empleada para controlar la potencia suministrada a una carga mediante la variación de parámetros eléctricos.

Perfil de carga: Variación del consumo eléctrico en función del tiempo, utilizada para analizar el comportamiento de sistemas energéticos.

Potencia activa (P): Componente de la potencia eléctrica que realiza trabajo útil en el sistema, medida en vatios (W).

Potencia reactiva (Q): Componente de la potencia eléctrica asociada al almacenamiento y liberación de energía en elementos inductivos y capacitivos, medida en volt-amperios reactivos (VAR).

SCADA: Sistema de supervisión, control y adquisición de datos que permite monitorear, registrar y controlar procesos industriales en tiempo real.

Señal analógica: Variable eléctrica continúa utilizada para representar magnitudes físicas como tensión o corriente.

Sistema trifásico: Sistema de generación y distribución de energía eléctrica compuesto por tres fases desfasadas entre sí, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales.

Tensión eléctrica: Diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico, medida en voltios (V).

Introducción

El desarrollo de tecnologías orientadas a la transición energética ha impulsado la necesidad de contar con herramientas didácticas e infraestructura de laboratorio que permitan comprender, analizar y reproducir el comportamiento real de los sistemas eléctricos modernos. En este contexto, las micro redes se consolidan como plataformas clave para la formación en energías renovables, gestión de cargas, calidad de energía y control inteligente, al integrar fuentes distribuidas, sistemas de almacenamiento, electrónica de potencia y comunicaciones industriales.

Sin embargo, los laboratorios académicos suelen enfrentar limitaciones en cuanto a dispositivos que permitan simular condiciones reales de operación, especialmente en lo relacionado con perfiles de demanda industrial y su impacto sobre la calidad de energía. Esta situación se evidencia en la Institución Universitaria Pascual Bravo, donde no se cuenta con un nodo de carga variable capaz de reproducir escenarios dinámicos propios de una micro red. La ausencia de este tipo de equipos restringe el aprendizaje práctico, dificulta el desarrollo de investigación aplicada y limita la experimentación con tecnologías IoT, SCADA y hardware de control.

El presente anteproyecto propone el diseño, simulación, implementación y validación de un nodo de carga variable industrial para una micro red didáctica, permitiendo caracterizar perfiles de demanda, evaluar indicadores de calidad de energía (THD, factor de potencia, potencia activa y reactiva) e integrar sistemas de supervisión basados en IoT y SCADA. Para ello, se abordan referentes teóricos relacionados con redes eléctricas, micro redes, electrónica de potencia, sistemas de control, emulación, análisis nodal y tecnologías de comunicación industrial, los cuales fundamentan el diseño estructural y funcional del prototipo.

El documento presenta, en primera instancia, el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos del proyecto. Posteriormente, se desarrolla el marco teórico que soporta conceptualmente el diseño del nodo y su interacción dentro de una micro red. A continuación, se describe la solución técnica propuesta, la metodología de simulación y construcción, los instrumentos de recolección de información, los recursos necesarios, y finalmente el cronograma de actividades. Este anteproyecto sirve como punto de partida para la ejecución del trabajo de grado y establece las bases teóricas, técnicas y metodológicas para la construcción de un nodo didáctico que fortalezca la formación en sistemas eléctricos modernos y la investigación en transición energética.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

El contexto de esta problemática se plantea en la transición energética, proceso en el que las micro redes eléctricas se convierten en una herramienta clave para la investigación y la formación en energías renovables. Según (Marivy Julady Collins Mendoza, 2024), las redes eléctricas inteligentes son fundamentales para lograr una gestión energética más eficiente, integrar fuentes renovables y fortalecer la sostenibilidad del sistema eléctrico en América Latina.

En la Institución Universitaria Pascual Bravo, los laboratorios del área eléctrica carecen de nodos de carga variable industrial que permitan simular las condiciones reales de una micro red. Esta limitación dificulta el desarrollo de prácticas experimentales y proyectos de investigación aplicados a la gestión, control y distribución de energía, afectando la calidad de la docencia y la formación técnica.

Aunque existen alternativas como simuladores computacionales o equipos comerciales, estas presentan limitaciones por su alto costo, baja flexibilidad o falta de interacción física. Por ello, el diseño de un nodo de carga variable industrial se plantea como una solución tecnológica y didáctica que fortalecerá la infraestructura de laboratorio y contribuirá al desarrollo académico e investigativo en temas de transición energética.

1.2 Formulación

¿Cómo construir un nodo de carga variable industrial que permita caracterizar perfiles de demanda y evaluar la calidad de energía en una micro red didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo?

2. Justificación

El desarrollo de un nodo de carga variable industrial para una micro red didáctica se justifica por la necesidad de fortalecer las capacidades académicas, tecnológicas y de investigación en el marco de la transición energética. Las micro redes representan una herramienta esencial para el estudio de la integración de energías renovables, la gestión de cargas y la calidad de la energía, constituyéndose en un escenario ideal para la formación práctica en ingeniería eléctrica y electrónica.

Actualmente, la Institución Universitaria Pascual Bravo no dispone de módulos o nodos que permitan caracterizar perfiles de demanda eléctrica ni evaluar la calidad de la energía dentro de una micro red didáctica, lo cual limita las prácticas experimentales y la investigación aplicada. El diseño de un nodo de carga variable permitirá reproducir condiciones reales de operación, favoreciendo el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias prácticas en temas como control de potencia, estabilidad del sistema y análisis de eficiencia energética.

De acuerdo (CARLOS ANDRÉS MARTÍNEZ SINCHIGUANO, 2024) con los sistemas automatizados didácticos facilitan la comprensión de procesos industriales complejos y fortalecen la formación técnica mediante la integración de hardware y plataformas de control abiertas como Node-RED. De manera complementaria, (Carmona, 2025) resalta que la implementación de bancos de prueba de bajo costo con tecnologías IoT promueve la modernización de los laboratorios académicos y la experimentación remota, ampliando el alcance educativo. En este sentido, el nodo propuesto contribuirá no solo al avance tecnológico institucional, sino también al cumplimiento de objetivos académicos, sociales y ambientales asociados a la transición energética, fomentando la innovación y el uso eficiente de la energía en entornos educativos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un prototipo de un nodo de carga variable industrial para una micro red didáctica, que caracterice perfiles de demanda y evalué el impacto en la calidad de energía, integrando un sistema de control y supervisión basado en tecnologías SCADA.

3.2 Objetivos específicos

Simular el nodo de carga variable industrial incorporando perfiles de demanda estocásticos y analizando los indicadores de calidad de energía (THD, factor de potencia y curvas de demanda).

Implementar el prototipo físico del nodo de carga variable industrial utilizando un microcontrolador, sensores de corriente y tensión, y comunicación IoT/SCADA para su integración en la micro red didáctica.

Validar el desempeño del nodo de carga variable industrial mediante la comparación entre los resultados simulados y las mediciones experimentales, evaluando indicadores de desempeño como el NRMSE, la variación del factor de potencia y la respuesta dinámica ante cambios de carga.

4. Referentes teóricos

4.1 Redes de transmisión de energía eléctrica

Las redes de transmisión de energía eléctrica constituyen el conjunto de líneas, subestaciones y equipos destinados a transportar grandes cantidades de energía desde los centros de generación hasta las redes de distribución. Su función principal es garantizar que la energía producida en plantas hidráulicas, térmicas, solares o eólicas pueda llegar a los centros de consumo con niveles adecuados de tensión, estabilidad y continuidad.

Estas redes operan típicamente en niveles de alta, extra alta y ultra alta tensión (AT, EAT, UAT), que pueden oscilar entre 69 kV y más de 500 kV, dependiendo del país y de la capacidad requerida del sistema (Edwin David Fernández Puertas, 2024).

Las redes de transmisión se complementan con subestaciones de potencia, donde se realizan maniobras como elevación o reducción de tensión, seccionamiento, compensación reactiva y protección.

Las subestaciones modernas incluyen sistemas SCADA, equipos digitales de control, protecciones numéricas, reconectadores y esquemas de automatización, lo que ha dado paso a la red de transmisión inteligente (Smart Transmission Grid).

En Colombia, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) cuenta con más de 28 000 km de líneas de transmisión y expansión continua hacia regiones apartadas. Empresas como ISA, XM y UPME lideran proyectos de modernización, integración de energías renovables en la Guajira y ampliación hacia zonas no interconectadas, lo cual reafirma la importancia estratégica de la transmisión para la transición energética del país.

La relevancia de este tema en el contexto del presente proyecto radica en que la transmisión constituye la primera etapa en la cadena energética que conectará eventualmente con la micro red didáctica a la cual se integrará el nodo emulador.

Comprender el funcionamiento de las redes de transmisión permite contextualizar la estabilidad del sistema, la calidad de energía y las condiciones de operación bajo las cuales se fundamentan las micro redes modernas.

4.2 Redes monofásicas, trifásicas y de corriente directa

Las redes eléctricas pueden clasificarse según el tipo de corriente y el número de fases empleadas para el transporte y distribución de energía. Estas configuraciones monofásicas, trifásica y de corriente directa (DC) constituyen la base fundamental de los sistemas eléctricos modernos y su comprensión es esencial para el diseño, análisis y operación de micro redes y sistemas distribuidos (Glover, 2016).

4.2.1 Redes monofásicas

Las redes monofásicas se caracterizan por utilizar una sola fase y un conductor de retorno**,** generalmente el neutro. Son las más utilizadas en el sector residencial y comercial liviano debido a sus bajos costos de instalación y mantenimiento. Este tipo de red opera típicamente en tensiones entre 110 V y 240 V.

Su principal limitación es su capacidad reducida para transportar potencia, pues al existir una sola fase, la potencia instantánea presenta oscilaciones que afectan el rendimiento en cargas de alta demanda. No obstante, su simplicidad y amplia disponibilidad la convierten en la opción más común para pequeños consumidores.

4.2.2 Redes trifásicas

Las redes trifásicas representan la arquitectura predominante en sistemas industriales, comerciales y en la transmisión y distribución de energía debido a su alta eficiencia y capacidad para transportar mayores niveles de potencia con menores pérdidas. Están formadas por **t**res fases desfasadas 120° eléctricamente entre sí, lo que genera una potencia más uniforme y estable.

Entre sus ventajas destaca la mayor capacidad de transporte de potencia, menores pérdidas por efecto Joule, posibilidad de generar un campo magnético rotatorio, fundamental para el funcionamiento de motores industriales, estabilidad superior frente a cargas variables.

Estas características explican por qué la mayoría de micro redes modernas incluyendo la del presente proyecto, se diseñan bajo configuración trifásica.

4.2.3 Redes de corriente alterna

Las redes de corriente directa han resurgido en los últimos años debido a la integración masiva de energías renovables, sistemas de almacenamiento y electrónica de potencia. A diferencia de los sistemas en CA, en la corriente directa la tensión no varía con el tiempo, lo que elimina pérdidas asociadas a reactancias y permite mejorar la eficiencia en sistemas específicos (Glover, 2016)

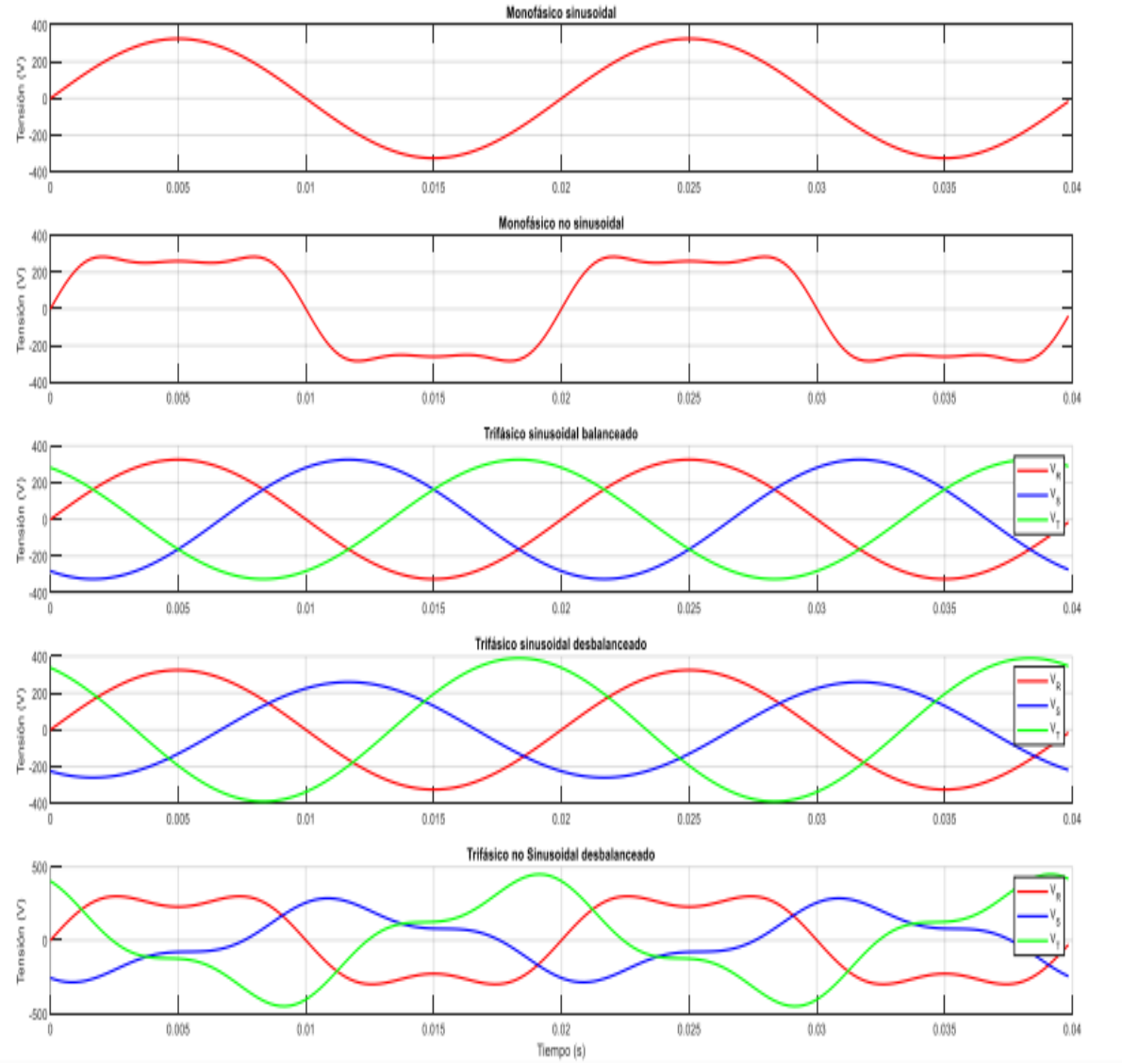


Figura 1. Diferentes condiciones de una red eléctrica de 50Hz.

Fuente. (BERMÚDEZ, 2024)

4.3 Microrredes de energía eléctrica

Las micro redes eléctricas son sistemas energéticos locales capaces de operar de manera autónoma o conectada a la red principal, según las condiciones del sistema. Estas pueden adoptar diversas configuraciones e integrar distintos recursos energéticos distribuidos **y** tipos de carga**,** lo que les otorga gran flexibilidad operativa (Sandoval, 2021).

Comúnmente se asocian con la incorporación de fuentes renovables**,** la generación distribuida**,** el aumento de la eficiencia energética y la disminución de pérdidas eléctricas**.** Además, contribuyen a la descentralización del suministro**,** al uso de sistemas de almacenamiento **y** a la reducción de emisiones de CO_2**,** consolidándose como una alternativa sostenible dentro de la transición energética (Suresh, 2020).

Uno de los elementos más relevantes en el diseño de micro redes es la gestión de la variabilidad inherente a las fuentes renovables. La generación solar y eólica, por ejemplo, depende de condiciones ambientales que fluctúan constantemente, lo que puede generar transitorios de tensión y frecuencia. Para enfrentar este desafío, las micro redes incorporan sistemas de almacenamiento de energía, convertidores bidireccionales y algoritmos avanzados de control que permiten suavizar estas variaciones y asegurar una operación estable. Asimismo, los sistemas de control supervisor, apoyados en plataformas SCADA e IoT, permiten monitorear y coordinar en tiempo real el comportamiento de los diversos componentes del sistema, proporcionando datos esenciales para la optimización y toma de decisiones.

En el contexto académico y formativo, las micro redes didácticas, como la considerada en este proyecto, adquieren especial relevancia. Estas permiten simular escenarios reales de operación, estudiar comportamientos complejos del sistema, evaluar indicadores de calidad de energía y validar estrategias de control bajo condiciones controladas. De esta manera, se convierten en plataformas de aprendizaje e investigación fundamentales para el entrenamiento en áreas como electrónica de potencia, energías renovables, sistemas de protección y gestión energética.

4.4 Transición energética Justa y digitalización del sistema eléctrico

La Transición Energética Justa (TEJ) es un proceso integral que busca sustituir gradualmente los combustibles fósiles por fuentes renovables, promoviendo un sistema energético **s**ostenible**,**

equitativo y respetuoso con el medio ambiente. En Colombia, este proceso se apoya en los principios de equidad, gradualidad, participación social y conocimiento técnico, e integra dimensiones de justicia ambiental y climática (Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, 2023).

La Digitalización del Sistema Eléctrico es un proceso transformador y holístico que busca la convergencia de datos, analítica avanzada y conectividad mediante la integración de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) a lo largo de toda la cadena de valor (generación, transmisión, distribución y consumo) En este sentido, la digitalización representa una dimensión estratégica de la modernización del sistema eléctrico, al facilitar la integración de recursos energéticos distribuidos y fortalecer la eficiencia y confiabilidad de la red (Florez-Orrego, 2021).

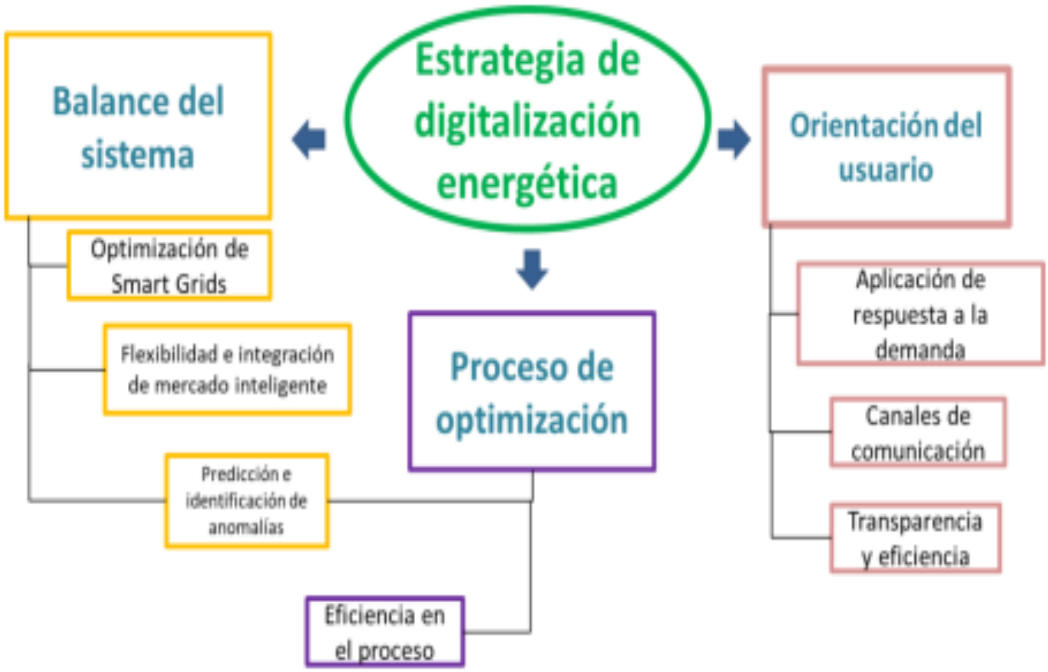


Figura 2. Diagrama estrategias de digitalización energética.

Fuente. (Florez-Orrego, 2021)

4.5 Emulación de procesos eléctricos

En el ámbito de la ingeniería eléctrica, la emulación de procesos eléctricos se entiende como una técnica que permite recrear el comportamiento dinámico y las interacciones de un sistema

eléctrico o de uno de sus componentes dentro de un entorno controlado. A diferencia de la simulación tradicional, la emulación posibilita la interacción en tiempo real con dispositivos físicos como controladores, sensores o sistemas de protección, reproduciendo condiciones reales de operación sin comprometer la seguridad de la instalación.

Su objetivo principal es analizar y validar el desempeño de equipos o estrategias de control frente a distintos escenarios eléctricos, como variaciones de carga, fallas o fluctuaciones de potencia antes de implementarlos en sistemas reales (Adrián González Martínez, 2025).

Además, la emulación se ha consolidado como una herramienta fundamental en el desarrollo y prueba de sistemas de electrónica de potencia, dado que permite evaluar convertidores, inversores y dispositivos de control bajo condiciones extremas o poco comunes que serían difíciles, costosas o riesgosas de reproducir en un laboratorio tradicional.

Plataformas modernas de emulación en tiempo real, como OPAL-RT, Typhoon HIL o dSPACE, permiten ejecutar modelos con tiempos de muestreo del orden de microsegundos, garantizando una representación precisa de fenómenos transitorios, armónicos y respuestas dinámicas propias de los sistemas eléctricos.

Dentro del presente proyecto, la emulación de procesos eléctricos es esencial para la representación del comportamiento de una carga industrial variable. Mediante el diseño e implementación de un nodo capaz de reproducir perfiles dinámicos de consumo, se logra analizar el impacto del comportamiento de la carga sobre la estabilidad y la calidad de energía de la micro red didáctica.

Esto permite validar estrategias de control, ajustar parámetros de operación y garantizar que el nodo se comporte de manera coherente con los escenarios industriales reales que se buscan estudiar.

4.6 Teoría sobre el nodo a emular

En el contexto de la ingeniería eléctrica, un nodo se refiere a un punto de conexión o unión donde confluyen dos o más elementos de circuito (Alexander, 2013). La Teoría de Nodos (o Análisis Nodal) se basa en la aplicación de la Ley de Corrientes de Kirchhoff (LCK), la cual establece que la suma algebraica de las corrientes que entran y salen de cualquier nodo en un instante de tiempo debe ser cero. Cuando se habla de "nodo a emular" en micro redes o sistemas

distribuidos, se hace referencia a la representación matemática y funcional de un punto geográfico o lógico del sistema de potencia que incluye sus características de tensión, impedancia y la interacción de los flujos de potencia (Carranza, 2007).

Por ejemplo, en la figura se consiguió desarrollar y ejecutar con éxito el modelo y la simulación de distintas condiciones de funcionamiento de una micro red compuesta por un sistema fotovoltaico de 1 MWp y un grupo electrógeno de 1,2 MVA, destinados a suministrar energía a una carga de 1 MW caracterizada a partir de su curva de demanda diaria.

Para ello, fue necesario ajustar el comportamiento de las fuentes generadoras de acuerdo con los requerimientos operativos establecidos.

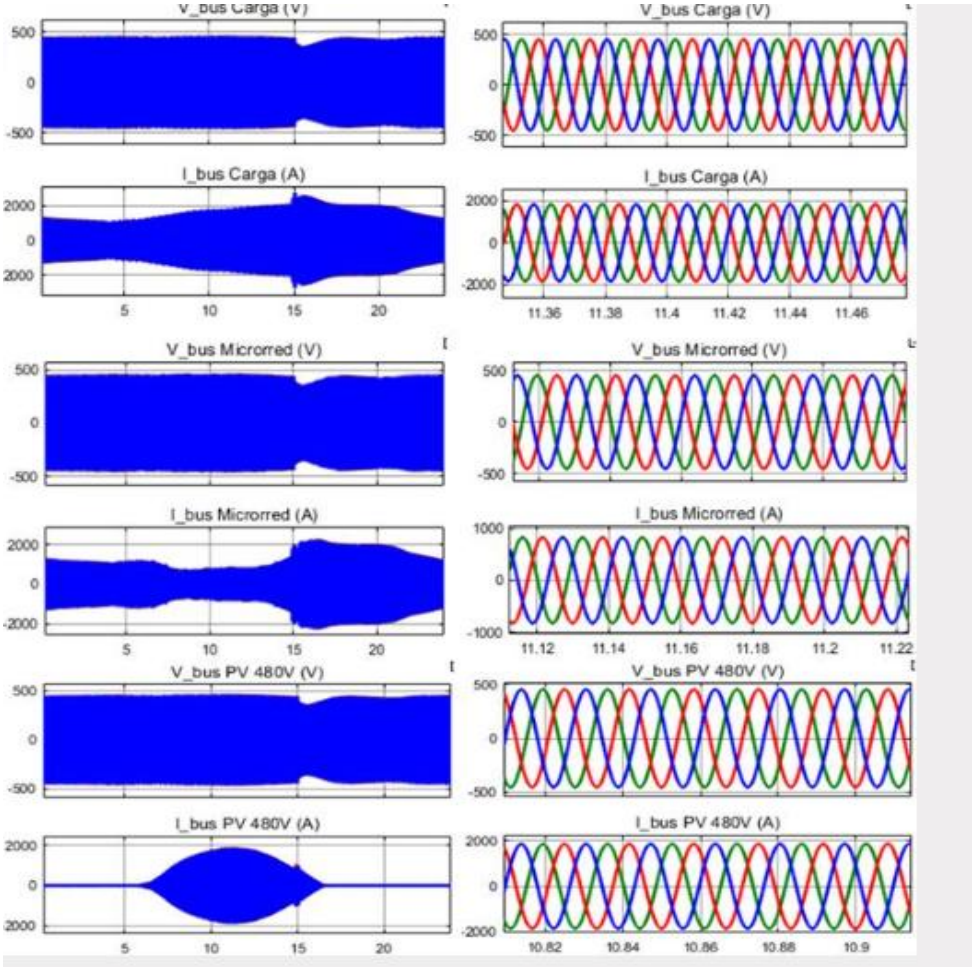


Figura 3. Comportamiento sinusoidal de la corriente y la tensión en las barras de la micro red.

Fuente. (Diandra Hernández Aróstegui, 2021)

4.7 Integración de generadores y cargas en una micro red

Una micro red se define como un conjunto de cargas y microgeneradores (Recursos Energéticos Distribuidos - RED) que operan como un sistema único, proveyendo energía eléctrica. Este sistema integrado de baja tensión puede funcionar de dos modos: interconectado (en paralelo con el sistema interconectado) o aislado/autónomo (o tipo isla).

La integración implica la gestión y coordinación eficiente de estos elementos para mantener la estabilidad (tensión y frecuencia) del sistema frente a las variaciones de consumo y generación, especialmente la variabilidad inherente de las fuentes renovables como la solar o la eólica (Alejandro Muñoz Rincón, 2019).

Las micro redes pueden integrarse con diversas fuentes de generación no convencionales, como sistemas fotovoltaicos, microturbinas, aerogeneradores y dispositivos de almacenamiento de energía, entre otros (Diandra Hernández Aróstegui, 2021).

Estos recursos desempeñan un papel fundamental en la evolución futura de los sistemas eléctricos, ya que permiten disminuir de manera significativa las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles. De esta forma, contribuyen simultáneamente al crecimiento y modernización de las redes de distribución, alineándose con las tendencias de expansión y sostenibilidad del sector energético.

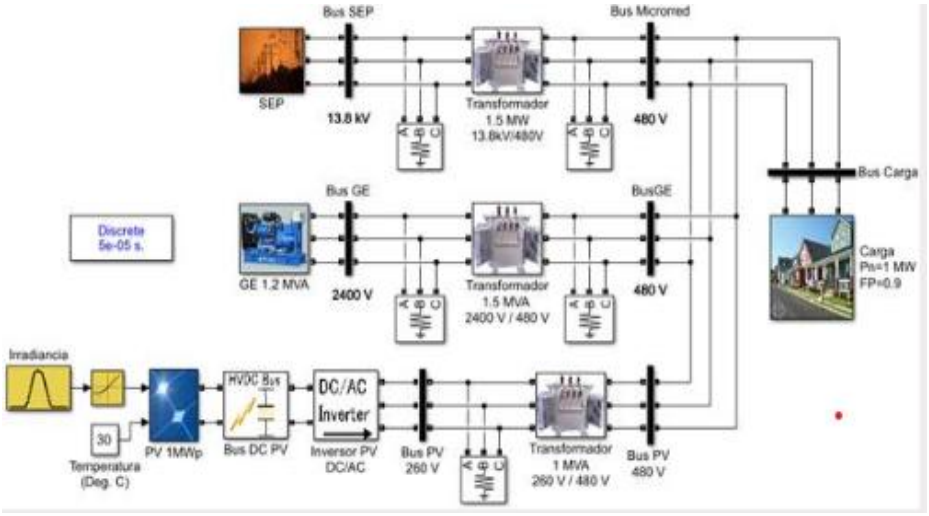


Figura 4. Esquema de conexión de la micro red

Fuente. (Diandra Hernández Aróstegui, 2021)

El diagrama correspondiente a la micro red desarrollada y analizada se presenta en la figura 1. En este esquema se integran los módulos fotovoltaicos, un convertidor elevador DC/DC unidireccional, un enlace de corriente continua y un inversor DC/AC encargado de generar la señal de corriente alterna requerida para alimentar las cargas (Diandra Hernández Aróstegui, 2021). La conexión del conjunto fotovoltaico se realiza mediante un transformador que ajusta su nivel de tensión al de la micro red. Asimismo, se incorpora un grupo electrógeno y un sistema eléctrico de potencia, donde el primero está constituido por un generador síncrono y el segundo por una fuente trifásica, ambos vinculados a la micro red a través de transformadores que acondicionan su tensión de salida a 480 V.

4.8 Simulación tipo Hardware-in-the-Loop (HIL)

La Simulación Hardware-in-the-Loop (HIL) es una técnica avanzada de validación y prueba utilizada para la evaluación rigurosa de controladores de sistemas dinámicos, siendo fundamental en la ingeniería eléctrica para probar dispositivos de electrónica de potencia y controladores de red. En el esquema HIL, el controlador real (el Hardware) se conecta al modelo simulado de la planta o sistema físico (el Loop), el cual se ejecuta en un simulador en tiempo real (OCHOA, 2024).

El uso de HIL ofrece múltiples ventajas en el desarrollo de tecnología para sistemas eléctricos modernos. Entre ellas se destacan la reducción de costos asociados a prototipos físicos tempranos, la posibilidad de realizar pruebas repetitivas y controladas, la validación temprana de algoritmos de control y la detección de fallas de diseño antes de implementar hardware crítico. Según estudios recientes, esta metodología se ha convertido en un estándar para el desarrollo de convertidores de potencia, controladores de inversores conectados a red y sistemas de gestión de energía en micro redes (OCHOA, 2024)

En el contexto de este proyecto, la simulación tipo HIL resulta relevante porque permite validar el comportamiento del nodo de carga variable antes de su implementación física. A través de modelos del sistema eléctrico y del algoritmo de control ejecutado en tiempo real, es posible ajustar parámetros, verificar la estabilidad del sistema, probar perfiles estocásticos de demanda y confirmar la capacidad del nodo para operar bajo condiciones cambiantes. Esto garantiza que, al

pasar a la construcción del prototipo, el diseño cuente con fundamentos sólidos y con un desempeño predecible respaldado por pruebas previas de alta precisión.

4.9 Internet de las cosas (IoT) y control supervisor

El Internet de las Cosas (IoT) se entiende como la interconexión de dispositivos físicos capaces de sensar, procesar y transmitir información a través de redes digitales, permitiendo la creación de sistemas distribuidos con capacidades de supervisión y actuación remota (Gubbi, 2013). En el ámbito de los sistemas eléctricos modernos, el IoT se ha convertido en un habilitador fundamental para el desarrollo de redes inteligentes y micro redes, ya que facilita la integración de sensores, medidores inteligentes, actuadores y controladores que monitorean variables como tensión, corriente, potencia, temperatura y calidad de energía en tiempo real.

Esta infraestructura de medición distribuida soporta la implementación del control supervisor, entendido como el nivel encargado de coordinar el funcionamiento global del sistema mediante la recolección, análisis y visualización de información proveniente de los diferentes nodos eléctricos. El control supervisor, generalmente asociado a plataformas SCADA o EMS, permite la toma de decisiones informada, la detección temprana de fallas, la optimización del flujo de energía y la gestión coordinada de recursos energéticos distribuidos y cargas críticas (Gómez Zuluaga, 2023).

Gracias a la conectividad que proporciona el IoT, los sistemas de control supervisor pueden recibir datos continuamente, ejecutar algoritmos basados en modelos matemáticos o reglas operativas, enviar comandos a actuadores remotos y almacenar registros para análisis posteriores. Esto posibilita la automatización avanzada, el control remoto de procesos y la reducción de tiempos de respuesta ante eventos eléctricos relevantes.

En el contexto de una micro red didáctica, la integración entre IoT y control supervisor permite no solo monitorear el comportamiento de cargas y generadores, sino también implementar funcionalidades como el control adaptativo, la ejecución de perfiles dinámicos, la evaluación de la estabilidad del sistema y la validación de estrategias de operación inteligentes.

4.10 Modelo del nodo a implementar

El modelo del nodo a implementar representa la estructura funcional y eléctrica que caracteriza el comportamiento de una carga industrial variable dentro de una microred didáctica. Este modelo integra parámetros eléctricos como tensión, corriente, impedancia y potencia, junto con algoritmos de control que permiten modificar el perfil de carga según condiciones simuladas o programadas. Su propósito es reproducir dinámicas reales de consumo, evaluar la calidad de energía y validar estrategias de control mediante herramientas de simulación y comunicación IoT/SCADA. De esta forma, el nodo actúa como un elemento emulador, útil tanto para la enseñanza como para la investigación en sistemas eléctricos distribuidos (Rocabert, 2012).

Además, incorpora la capacidad de representar tanto cargas lineales como no lineales, permitiendo observar fenómenos como variaciones del factor de potencia, incrementos en la distorsión armónica y respuestas dinámicas ante cambios bruscos de demanda, características propias de entornos industriales. El modelo también considera la interacción con un microcontrolador encargado de gestionar los perfiles estocásticos o programados, así como el registro continuo de variables eléctricas que pueden ser analizadas en tiempo real o almacenadas para estudios posteriores. Gracias a su diseño modular, este nodo puede adaptarse a diferentes escenarios operativos, facilitando la experimentación en temas de calidad de energía, gestión de cargas, estabilidad en micro redes y evaluación del desempeño de estrategias de control avanzadas, convirtiéndose en un recurso didáctico clave para comprender la operación de sistemas eléctricos modernos.

4.11 Módulo PLC Amp1-F aplicados a los procesos eléctricos

Los autómatas programables de la línea AMPx incorporan internamente un sistema basado en el microcontrolador ESP32-S3, el cual proporciona capacidades de procesamiento, conectividad y adquisición de datos orientadas a aplicaciones de automatización y control industrial. Esta arquitectura permite la integración de protocolos de comunicación, monitoreo en tiempo real y sistemas de supervisión en entornos industriales (Tecvolución, 2026). El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo energético desarrollado por Espressif Systems,

destacado por integrar capacidades de comunicación Wi-Fi y Bluetooth, ampliamente utilizadas en aplicaciones de control y sistemas embebidos (Bryan Jesús López, 2023).



Figura 5. Ilustración del AMP1 – F

Fuente. (Tecvolución, 2026)

En el ámbito de los sistemas eléctricos, el ESP32 es utilizado para tareas asociadas al monitoreo de variables, control de cargas y comunicación con plataformas SCADA:

- Adquisición de datos eléctricos: medición de tensión, corriente, potencia activa/reactiva, THD y frecuencia mediante sensores dedicados.
- Control de cargas y actuadores: manejo de relés, triacs, contactores, drivers PWM e interfaces de electrónica de potencia.
- Implementación de nodos IoT para redes inteligentes (smart grids) y micro redes.
- Transmisión de datos a plataformas SCADA mediante protocolos como Modbus TCP/IP, MQTT o HTTP.
- Sistemas de supervisión energética integrados para laboratorios académicos o plantas piloto.

Gracias a su conectividad, el ESP32 facilita la construcción de sistemas distribuidos donde varios nodos se comunican simultáneamente con un controlador central o una nube energética.

4.12 Inversores electrónicos de voltaje

El Inversor Electrónico de Voltaje (IEV) es un convertidor de potencia estático cuya función principal es transformar una fuente de corriente continua (CC) en una señal de corriente alterna (CA) con características controladas de frecuencia, amplitud y fase. Este dispositivo constituye uno de los elementos centrales de la Electrónica de Potencia, dado que posibilita la integración de fuentes renovables y sistemas de almacenamiento con redes eléctricas de distinto nivel de tensión. Los inversores son esenciales para garantizar la conversión eficiente de energía en sistemas modernos, permitiendo un control flexible de la potencia activa y reactiva (Rashid, 2018).

Desde el punto de vista operativo, los IEV pueden clasificarse en inversores autónomos, que generan una señal de salida independiente de la red, e inversores conectados a red, que sincronizan su tensión y frecuencia con el sistema eléctrico mediante técnicas como Phase Locked Loop (PLL). Los inversores modernos emplean estrategias avanzadas de modulación, como PWM senoidal, SPWM o modulación por vectores espaciales (SVPWM), con el fin de reducir distorsiones armónicas, mejorar la eficiencia y optimizar el uso de los semiconductores de potencia (Blaabjerg, 2015)

En el contexto de la transición energética, los IEV han adquirido un papel protagónico como interfaz tecnológica clave en la integración de Recursos Energéticos Distribuidos (RED)**.** Tecnologías como los sistemas fotovoltaicos, bancos de baterías, micro redes híbridas y convertidores bidireccionales.

Según (Hatziargyriou, 2020) los IEV son hoy elementos estratégicos para la gestión inteligente de micro redes debido a su capacidad de actuar como nodos activos que interactúan dinámicamente con la red a través de controladores embebidos y sensores distribuidos.

En el presente trabajo, el Inversor Electrónico de Voltaje cumple un papel clave como dispositivo encargado de la conversión y acondicionamiento de energía dentro del nodo de carga industrial. Su capacidad para operar con perfiles dinámicos de carga, interactuar con el sistema SCADA y modificar parámetros de salida de manera controlada permite recrear condiciones reales de operación, facilitando la emulación y el análisis de calidad de energía en la micro red didáctica.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El presente trabajo corresponde a un proyecto de desarrollo experimental, dado que su propósito principal es diseñar, construir, implementar y validar un prototipo funcional que no existe actualmente en los laboratorios de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Aunque incluye fases de simulación y análisis, su objetivo central no es generar nuevo conocimiento teórico, sino materializar una solución tecnológica aplicada: un nodo de carga variable industrial integrado a una micro red didáctica.

Este tipo de proyecto se caracteriza por:

- Crear y ensamblar un dispositivo físico a partir de componentes electrónicos, sensores y microcontroladores.
- Aplicar conocimientos existentes en electrónica de potencia, instrumentación, sistemas SCADA e IoT para desarrollar un artefacto nuevo y funcional basado en dichos principios.
- Validar experimentalmente el desempeño del prototipo mediante mediciones reales y comparación con simulaciones.
- Resolver una necesidad práctica identificada en el entorno académico: la ausencia de nodos de carga que permitan recrear perfiles industriales y estudiar la calidad de la energía dentro de una micro red.

A diferencia de un proyecto de investigación experimental, que busca generar o contrastar teorías mediante la manipulación de variables en un entorno controlado, este trabajo se centra en diseñar y probar una solución tecnológica con criterios de funcionalidad, desempeño y aplicabilidad didáctica.

Por ello, se clasifica formalmente como un proyecto de desarrollo experimental, en coherencia con el objetivo de fortalecer la infraestructura educativa para el estudio de la transición energética y los sistemas eléctricos modernos.

5.2 Método

Se desarrollará un modelo computacional del nodo de carga variable industrial incorporando perfiles de demanda obtenidos mediante un aforo de cargas industriales. Estos perfiles representarán el comportamiento dinámico asociado a la entrada y salida de motores y otras cargas eléctricas durante diferentes periodos de operación dentro de la microred didáctica. La simulación permitirá analizar variables eléctricas como corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y curvas de demanda energética, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes escenarios operativos.

Los resultados obtenidos constituirán una línea base para la comparación posterior con los datos experimentales adquiridos desde el prototipo físico implementado en laboratorio.

Modelado del sistema: Se realizará el modelado del nodo de carga variable industrial y su integración dentro de la microred didáctica del laboratorio de la Institución Universitaria Pascual Bravo mediante comunicación Modbus.

El nodo de carga corresponde a un sistema monofásico alimentado por una red bifilar de 120/240 V a una frecuencia nominal de 60 Hz, proveniente de la red comercial del laboratorio. Esta configuración permite la conexión de diferentes tipos de cargas eléctricas utilizadas en prácticas académicas, las cuales presentan variaciones en el consumo energético dependiendo de las condiciones de operación del sistema.

Para la adquisición de datos se emplearán medidores eléctricos con capacidad de comunicación mediante protocolo Modbus y el autómata programable AMP1-F, permitiendo obtener variables como voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia. La información recopilada será utilizada para construir perfiles de demanda y alimentar el modelo computacional desarrollado en MATLAB/Simulink y herramientas de análisis en Excel.

Generación de perfiles de demanda: Con el propósito de representar el comportamiento dinámico del nodo de carga variable industrial, se desarrollarán perfiles de demanda basados en un aforo de cargas industriales realizado en Excel, considerando la conexión y desconexión de motores y diferentes cargas eléctricas durante periodos específicos de operación.

Inicialmente, se identificarán las cargas conectadas al sistema, registrando variables como potencia nominal, tiempo de funcionamiento y horarios de operación. Posteriormente, la información será organizada en intervalos de tiempo definidos para construir curvas representativas de demanda energética.

A partir de estos registros se elaborarán curvas de potencia activa y consumo energético que permitan representar el comportamiento temporal del nodo bajo diferentes escenarios operativos. Estas curvas serán utilizadas como señales de entrada dentro del modelo de simulación desarrollado en MATLAB/Simulink, permitiendo analizar la respuesta dinámica del sistema frente a variaciones de carga.

Análisis de calidad de energía: Para la evaluación del comportamiento del nodo bajo diferentes configuraciones operativas, se calcularán indicadores técnicos clave como la Distorsión Armónica Total (THD), el factor de potencia y las curvas de demanda de potencia activa (P) y reactiva (Q).La distorsión armónica total se utilizará como el indicador principal del nivel de deformación presente en las formas de onda de voltaje y corriente del sistema eléctrico. Este parámetro permitirá identificar y cuantificar la presencia de cargas no lineales conectadas al nodo, evaluando así su impacto directo sobre el desempeño de la microrred didáctica. Para su cálculo cualitativo, se contemplará la relación entre los componentes armónicos de orden superior y el componente fundamental de la señal.

Asimismo, se evaluará el factor de potencia y el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente para determinar la eficiencia del comportamiento energético del nodo bajo los diferentes escenarios operativos definidos. Complementariamente, se caracterizará la variabilidad temporal del consumo eléctrico mediante el desarrollo de curvas de demanda de potencia activa y reactiva representadas como funciones del tiempo.

Diseño del circuito y selección de componentes: Se elaborará el diseño esquemático del circuito del nodo de carga variable, seleccionando los componentes electrónicos adecuados (resistivos, inductivos, sensores, optoacopladores y drivers de potencia). Se verificará la compatibilidad con el microcontrolador.

Para el desarrollo del nodo de carga variable industrial dentro de la microred didáctica, inicialmente se definirá la arquitectura funcional del sistema considerando la estructura general de los tableros emuladores de nodos utilizada como referencia en el entorno experimental. Esta arquitectura integra las etapas de control, medición eléctrica, acondicionamiento de señal, filtrado y comunicación industrial, permitiendo establecer una base estructural coherente para el diseño del prototipo propuesto basado en el microcontrolador. La Figura 6 presenta el esquema general del nodo emulador de micro red didáctica adoptado como referencia para la implementación del sistema.

A partir de esta arquitectura, se realizará la adaptación del sistema de control originalmente basado en autómata programable hacia una solución integrada con el PLC industrial Amp1-F. Este dispositivo, cuyo núcleo de procesamiento es un ESP32-S3, permitirá ejecutar las tareas de adquisición de variables eléctricas, control de la carga variable y comunicación mediante el protocolo Modbus TCP sobre red inalámbrica WiFi. La selección del Amp1-F se fundamenta en su capacidad de procesamiento embebido, su robustez para entornos industriales, la disponibilidad de entradas analógicas para sensores eléctricos y su compatibilidad nativa con entornos IoT/SCADA.

Posteriormente, se realizará la selección del sistema de medición de corriente empleando sensores basados en efecto Hall tipo ACS712 (GY-712-5A), los cuales permiten medir la corriente en la interconexión entre el driver electrónico del nodo y la carga resistiva emulada. Estos sensores proporcionan aislamiento galvánico entre la etapa de potencia y el sistema de control, garantizando condiciones seguras de operación. La integración de estos sensores permitirá registrar el comportamiento dinámico del nodo ante variaciones de carga, facilitando la construcción del aforo de cargas necesario para la validación del sistema.

Para la medición de tensión, se diseñará una etapa de acondicionamiento de señal basada en divisores resistivos y filtros pasivos, con el propósito de adaptar los niveles de tensión de la red a los rangos permitidos por las entradas analógicas del PLC. Este acondicionamiento garantizará la integridad del sistema de medición y la compatibilidad eléctrica entre la etapa de potencia y la unidad de control digital.

Seguidamente, se diseñará la etapa de carga variable mediante la implementación de resistencias de potencia de 39 Ω y 5 W, las cuales representarán el consumo eléctrico equivalente dentro de la microrred didáctica. Estas resistencias serán controladas electrónicamente mediante el driver programable, permitiendo emular los perfiles de consumo energético definidos en la planeación de la simulación. Con el propósito de mejorar la calidad de la señal eléctrica, se incorporará un sistema de filtrado basado en inductores de 220 μH, reduciendo el contenido armónico asociado a los procesos de conmutación electrónica del inversor y contribuyendo a la obtención de señales estables.

Finalmente, se implementará el sistema de comunicación industrial basado en el protocolo Modbus, el cual permitirá la integración del nodo con una plataforma de supervisión IoT/SCADA (como Node-RED o similares). Esta arquitectura garantizará la transmisión de las variables medidas hacia un entorno de monitoreo remoto, permitiendo la visualización en tiempo real y la integración dentro de la arquitectura distribuida de la microrred didáctica.

Como etapa final, se verificará la compatibilidad eléctrica y funcional entre los sensores, el driver electrónico, la etapa de carga y el PLC Amp1-F, considerando niveles de tensión, rangos de corriente y protocolos de comunicación. Esta verificación asegurará la adecuada interacción del nodo con el sistema de supervisión y los datos de simulación obtenidos.

Programación y control del sistema: Se desarrollará el firmware para el PLC AMP1-F (basado en el núcleo ESP32-S3), con el fin de ejecutar la adquisición de variables eléctricas y gestionar el nivel de carga a través de técnicas de modulación electrónica. El control se integrará mediante el protocolo industrial Modbus TCP, facilitando su enlace con plataformas de supervisión IoT o SCADA (como Node-RED), permitiendo la visualización en tiempo real y el almacenamiento de registros digitales.

Construcción del prototipo: La construcción se llevará a cabo mediante el ensamblaje de los componentes en un tablero de montaje industrial, garantizando seguridad eléctrica y compatibilidad con la microrred didáctica. Los hitos de esta etapa incluyen:

- Unidad de Procesamiento: Integración del PLC AMP1-F para el control central.
- Sistema de Medición: Instalación de sensores de corriente de efecto Hall (ACS712) y etapas de acondicionamiento de tensión mediante divisores resistivos.

- Etapa de Potencia: Montaje del driver electrónico y la carga resistiva (resistencias de 39 Ω y 5 W).
- Calidad de Señal: Incorporación de un sistema de filtrado basado en inductores de 220 μH para reducir el contenido armónico de la conmutación.
- Infraestructura: Diseño modular para facilitar el mantenimiento y asegurar el aislamiento entre las etapas de control y potencia.

Validar el desempeño del nodo de carga variable industrial mediante la comparación entre los resultados simulados y las mediciones experimentales, evaluando indicadores de desempeño como el NRMSE, la variación del factor de potencia y la respuesta dinámica ante cambios de carga.

Definición del plan de pruebas: Con el fin de evaluar el desempeño del nodo, se diseñará un plan de pruebas experimentales orientado a comparar el comportamiento físico con el modelo de simulación en MATLAB/Simulink. Los escenarios de prueba se basarán en un aforo de cargas industriales, contemplando:

- Condiciones Estáticas: Carga mínima y carga nominal.
- Condiciones Dinámicas: Perfiles de carga variable y escalonada representativos de la demanda industrial.

Toma y registro de datos experimentales: Durante la ejecución de las pruebas, el PLC transmitirá las variables medidas vía Modbus TCP hacia la plataforma de monitoreo. Se registrarán de forma sistemática los siguientes parámetros:

- Tensión y Corriente eficaz (Vrms, Irms).
- Potencia Activa (P) y Reactiva (Q).
- Factor de Potencia (FP) y Distorsión Armónica Total (THD).

Los datos serán almacenados en formatos compatibles con herramientas de análisis para permitir un procesamiento posterior y la sincronización temporal con los resultados de simulación.

Análisis comparativo y evaluación de desempeño: Se realizará mediante el análisis de la respuesta dinámica y el cálculo de indicadores cuantitativos de precisión. El principal indicador será el Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE). Este análisis considerará factores como las tolerancias de los componentes, el ruido en las mediciones y los retardos del sistema de adquisición. A partir de estos resultados, se documentarán las conclusiones y se realizarán los ajustes necesarios para optimizar el comportamiento del nodo dentro de la microrred didáctica.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1. Fuentes primarias

Las fuentes primarias corresponden a la información obtenida directamente durante el proceso de desarrollo del proyecto y constituyen evidencia original generada por los investigadores. Entre ellas se incluyen:

- Aforo de cargas industriales elaborado en Excel, utilizado para definir perfiles de demanda y curvas estimadas de corriente y potencia del sistema.
- Mediciones experimentales de tensión, corriente, factor de potencia y potencia activa/reactiva obtenidas durante las pruebas del prototipo implementado en laboratorio.
- Registros de operación adquiridos mediante el autómata programable AMP1-F, incluyendo variaciones dinámicas de carga y comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación
- Datos recopilados desde el sistema de supervisión SCADA, tales como históricos de variables eléctricas, gráficas de monitoreo en tiempo real y eventos registrados durante las pruebas experimentales.
- Observaciones técnicas realizadas durante las etapas de montaje, configuración, adquisición de datos y validación del sistema de monitoreo y control.

Estas fuentes permiten realizar el análisis comparativo entre el modelo simulado y el dispositivo físico, garantizando la veracidad de los resultados del proyecto.

5.3.2 Fuentes secundarias.

Las fuentes secundarias corresponden a documentos, publicaciones y materiales de consulta que proporcionan el marco conceptual y el soporte teórico necesario para el desarrollo del proyecto. Entre ellas se consideran:

- Artículos científicos relacionados con micro redes, electrónica de potencia, emulación de sistemas eléctricos, inversores, control PWM e indicadores de calidad de energía.
- Tesis de grado y proyectos previos que aborden el uso de ESP32, IoT, SCADA o nodos didácticos para laboratorios eléctricos.
- Libros especializados en sistemas eléctricos de potencia, análisis de circuitos, electrónica industrial, dispositivos de medición y conversión de energía.
- Normas técnicas y guías relativas a calidad de energía, mediciones eléctricas, seguridad en laboratorios y operación de sistemas de baja tensión.
- Bases de datos académicas como IEEE, ScienceDirect, Scielo, y repositorios institucionales.
- Manuales técnicos de fabricantes de sensores, microcontroladores, inversores, cargas electrónicas y dispositivos utilizados en el proyecto.

Estas fuentes complementan el marco teórico, permiten validar conceptos y ofrecen lineamientos técnicos para el diseño y la implementación del nodo de carga variable industrial.

6. Resultados

El proyecto consiste en el diseño, simulación, implementación y validación de un nodo de carga variable industrial integrado a una micro red didáctica, cuyo propósito es reproducir perfiles reales de demanda eléctrica, evaluar la calidad de energía y permitir la supervisión mediante tecnologías IoT/SCADA. El nodo será capaz de modificar su nivel de carga de manera controlada, emular comportamientos industriales y registrar variables eléctricas en tiempo real, constituyéndose en un módulo experimental clave para la formación y la investigación en sistemas eléctricos modernos.

Para su construcción, el nodo se divide en cuatro módulos principales, cada uno con funciones y especificaciones técnicas mínimas que garantizan su operación dentro de la micro red didáctica.

6.1 Fundamentación matemática para la validación de datos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones y simulaciones del nodo de carga variable industrial. Para el procesamiento, validación y análisis de los datos recolectados por el sistema SCADA a través del PLC AMP1-F, se estructuraron los indicadores de calidad de energía bajo los siguientes criterios matemáticos.

En primer lugar, la deformación de las ondas de tensión y corriente provocada por las configuraciones de carga no lineal se determinó mediante el cálculo de la Distorsión Armónica Total (THD), empleando la siguiente expresión:

$$THD = \sqrt{\frac{{V_2}^2 + {V_3}^2 + {V_4}^2}{V_1}} * 100 \quad (1)$$

Donde V_1 corresponde al componente fundamental de la señal y los términos de orden superior ($V_2, V_3, \dots$) representan los componentes armónicos.

En segundo lugar, la eficiencia en el consumo de la red eléctrica se analizó mediante el factor de potencia (FP), el cual relaciona la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) del sistema:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Adicionalmente, de acuerdo con el comportamiento del desfase entre las señales de ondas fundamentales, el factor de potencia se expresó como:

$$FP = COS(\emptyset) \quad (3)$$

Donde ∅ corresponde al ángulo de desfase entre la tensión y la corriente. Este parámetro permite evaluar el impacto de los diferentes escenarios de operación implementados en el prototipo.Por otra parte, la caracterización de la variabilidad temporal del consumo eléctrico dentro de la microrred didáctica se describe mediante las curvas de demanda de potencia activa y reactiva. Estas curvas se representan matemáticamente como funciones temporales de la forma:

$$P = f(t) y \;\; Q = f(t) \; (4)$$

Lo que permite analizar de forma dinámica la evolución del comportamiento energético bajo las condiciones analizadas. Finalmente, la interacción fundamental del triángulo de potencias asociado al nodo de carga variable se evaluó mediante la ecuación de potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

A partir de estas expresiones analíticas, se procede a desglosar los gráficos, tablas comparativas y curvas de demanda registrados en las pruebas de laboratorio del nodo industria.

6.2 Módulo de carga variable

Este módulo representa la carga que se desea emular. Estará compuesto por elementos resistivos, inductivos o combinados (pequeños motores), controlados electrónicamente para variar el consumo.

Especificaciones mínimas:

- Potencia mínima de operación: 300–500 W (ampliable según disponibilidad).
- Configuración híbrida: cargas resistivas (calentadores o resistencias de potencia) y inductivas (pequeños motores).
- Control mediante técnicas PWM, triac o drivers electrónicos que permitan cambios suaves o escalonados.
- Disipación térmica adecuada (heatsinks o ventilación forzada).

Este módulo simula comportamientos típicos de industrias pequeñas, como arranques de motores, variaciones de procesos térmicos y fluctuaciones de carga.

6.3 Módulo de sensado eléctrico

Encargado de medir las variables eléctricas críticas para analizar la calidad de energía.

Especificaciones mínimas:

- Sensores de corriente tipo SCT-013, ACS712 o tarjetas moduladas para alta precisión.
- Sensores de tensión con aislamiento galvánico (ZMPT101B o divisores certificados).
- Muestreo mínimo recomendado: 1 kHz–5 kHz para medición confiable de armónicos.
- Calculo de THD, Factor de potencia, Tensión eficaz, Corriente eficaz, Potencias (P, S, Q), Frecuencia.

Estos datos se envían al microcontrolador para análisis y transmisión.

6.4 Módulo de control con PLC Amp1-F (Basado en ESP32).

El núcleo lógico del nodo utiliza un **ESP32**, encargado del procesamiento digital de señales, la variación de la carga y la comunicación con la plataforma IoT/SCADA.

Especificaciones mínimas:

- Conectividad Wi-Fi **y** BLE integrada.
- ADC de 12 bits para lectura de sensores eléctricos.
- Comunicación industrial mediante Modbus, TCP o MQTT.

- Soporte para algoritmos de control, generación PWM, gestión de perfiles estocásticos de demanda, protección contra sobrecarga y condiciones anómalas.

Este módulo también almacena las mediciones para análisis comparativo con la simulación.

6.5 Módulo de comunicación y supervisión (SCADA/IoT)

Permite monitorear y controlar el nodo desde un sistema supervisor en la micro red didáctica.

Especificaciones mínimas:

- Protocolo de comunicación: Modbus TCP**,** MQTT **o** REST API.
- Interfaz gráfica con curvas de demanda en tiempo real, Medición de THD, Factor de potencia, control manual y automático de la carga.

Este módulo integra al nodo dentro del entorno de digitalización energética del laboratorio.

6.6 Principio general de funcionamiento

El nodo de carga variable industrial recibe energía desde la microred didáctica y ajusta su nivel de carga mediante un sistema electrónico controlado por el autómata programable AMP1-F. Simultáneamente, los sensores eléctricos adquieren variables como tensión, corriente, potencia activa y factor de potencia, las cuales son procesadas para el análisis del comportamiento energético del sistema. Posteriormente, la información es enviada al sistema SCADA para su visualización, registro y supervisión en tiempo real.

El nodo opera bajo dos modos de funcionamiento:

● **Modo manual:** permite realizar el control directo de las cargas conectadas al sistema, posibilitando la modificación de las condiciones de operación por parte del usuario para pruebas específicas y validación experimental.

● **Modo automático:** ejecuta perfiles de demanda previamente definidos, simulando condiciones de operación industrial mediante la conexión y desconexión de cargas en diferentes intervalos de tiempo.

6.7 Diagrama de flujos.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 6 representa la arquitectura general del prototipo físico de la microrred didáctica, evidenciando la interacción entre los diferentes módulos que conforman el sistema. Asimismo, permite visualizar el flujo de energía, la adquisición de datos y la comunicación entre los dispositivos encargados del monitoreo, control y supervisión de las variables eléctricas presentes en la microrred.

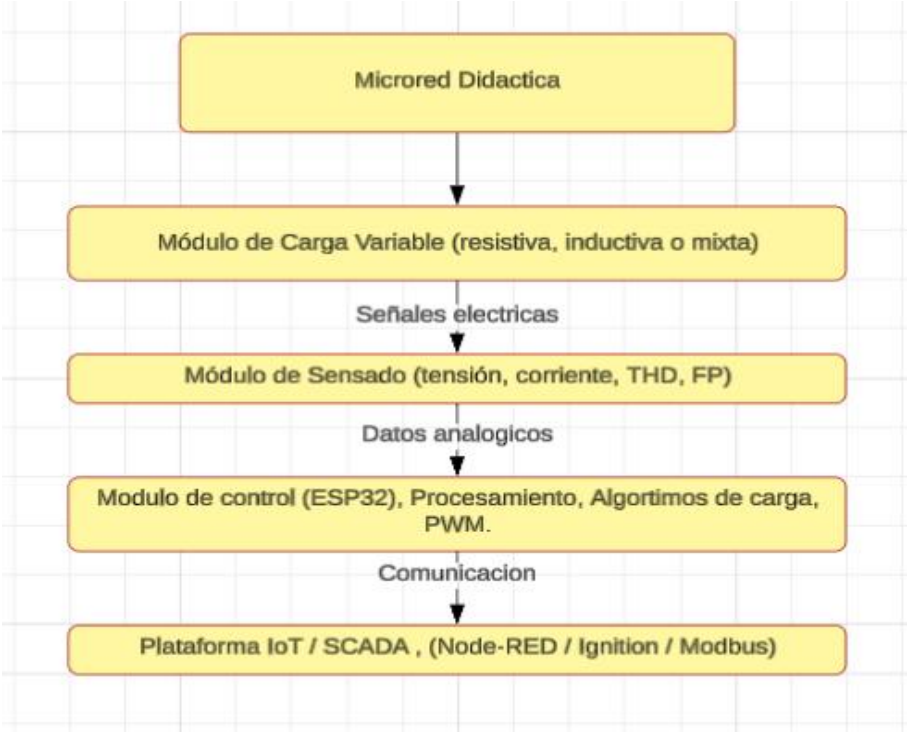


Figura 6. Diagrama de flujos de proceso de la Micro red didáctica.

Fuente. Propia.

6.8 Simulación del nodo de carga variable industrial

Se elaborará un modelo computacional del nodo de carga variable basado en perfiles de demanda obtenidos mediante un aforo de cargas, considerando la entrada y salida de motores y diferentes cargas industriales durante la jornada de operación.

La simulación permitirá representar el comportamiento dinámico del consumo energético del sistema, generando curvas de demanda y variaciones de potencia asociadas a distintos escenarios operativos.

A partir de estos resultados se analizarán variables eléctricas como corriente, potencia activa y factor de potencia, permitiendo establecer una línea base para la comparación posterior con los datos obtenidos en el prototipo físico implementado.

6.9 Prototipo físico del nodo de carga variable industrial

Para el desarrollo del proyecto, se construyó un módulo didáctico funcional que integra el microcontrolador, el inversor, los sensores de tensión y corriente, y el módulo de control de carga variable basado en pequeños motores, junto con la comunicación IoT/SCADA mediante el protocolo Modbus TCP.

Este prototipo permite la modificación del nivel de carga en tiempo real y la adquisición continua de las variables eléctricas del sistema. En la Figura 7 se detalla la interacción y el flujo de señales entre cada uno de estos componentes de hardware.

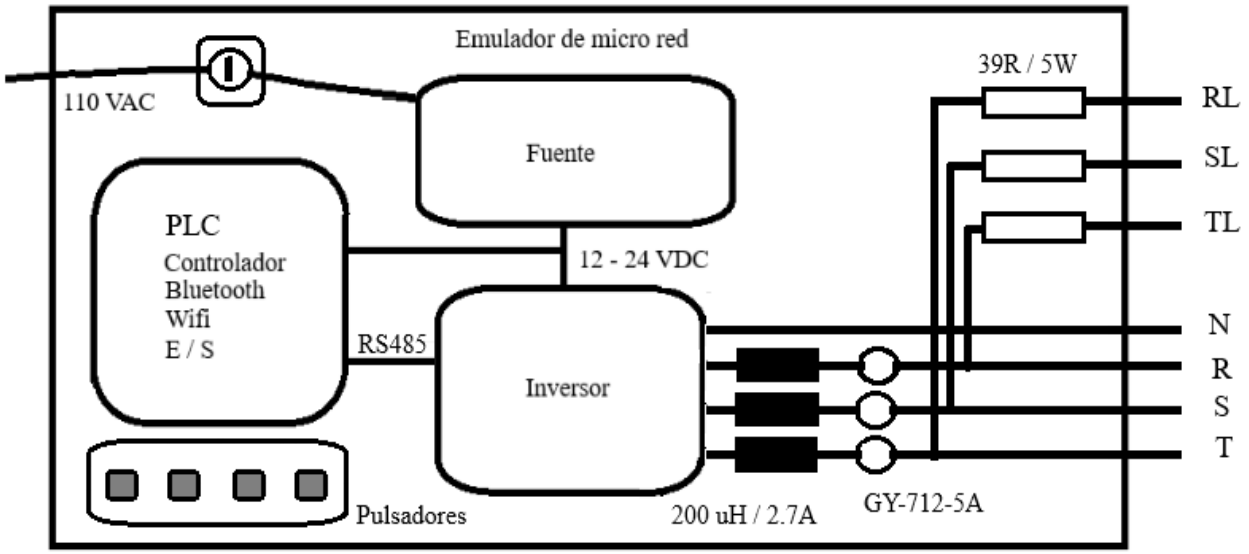


Figura 7. Diagrama en bloques del Nodo.

Fuente: Notas de clase.

6.10 Validación experimental y análisis comparativo

El nodo implementado será sometido a pruebas experimentales que se compararán con los resultados simulados. Se presentarán indicadores de desempeño tales como Error cuadrático medio normalizado (NRMSE), Variación del factor de potencia ante diferentes cargas, Respuesta dinámica frente a incrementos o decrementos de carga, Comportamiento del THD frente a perfiles de demanda.

Los resultados permitirán verificar la precisión del modelo, la estabilidad del nodo y su utilidad para experimentación en micro redes didácticas.

6.11 Desarrollo del sistema de inversión y control

En esta sección se describe la lógica de control implementada en el PLC AMP1-F (basado en ESP32-S3) para la gestión del nodo de carga, así como la validación experimental mediante la captura de señales de salida.

6.11.1 Lógica de Programación del Firmware

El código desarrollado permite que el PLC funcione como un inversor trifásico programable, capaz de emular diferentes perfiles de demanda industrial. La estructura del algoritmo se divide en tres pilares fundamentales:

- **Control de Ángulo y Desfase Trifásico:** La función onduladora () se ejecuta mediante una interrupción de temporizador, asegurando precisión en el tiempo. La lógica central utiliza tres contadores angulares que representan las tres fases del sistema:

1. Sincronización: El código utiliza estructuras condicionales (if) para limitar el conteo a 360 grados eléctricos.
2. Desfase Eléctrico: Para emular un sistema trifásico real, se establecen desfases de 120° y 240° entre las variables contad_1, contad_2 y contad_3. Esto garantiza que las señales de salida mantengan la relación angular necesaria para el funcionamiento de motores y cargas industriales.

- **Generación de la Señal SPWM (Sinusoidal PWM):** La intensidad y forma de la onda se calculan mediante la función matemática del seno**:**
    1. Cálculo en Tiempo Real: Se utiliza math.sin para obtener el valor instantáneo de la onda, el cual se normaliza y se escala mediante T0_mod (el valor máximo del timer).
    2. Control de Polaridad: El código determina qué semiciclo de la onda se está ejecutando (positivo o negativo) comparando el ángulo con los 180°. Esto permite conmutar los pines de salida (Gpio_0, Gpio_1, Gpio_2) para invertir la polaridad de la carga, emulando una corriente alterna real.
- **Gestión Dinámica de Frecuencia (Comunicación Serial):** El firmware incluye una función de recepción () que permite la interacción con sistemas externos (como una PC o el sistema SCADA)
    1. Procesamiento de Comandos: Al recibir un dato por el puerto serial (COM_1), el sistema convierte la cadena de texto a un valor entero de frecuencia.
    2. Adaptación de Período: El PLC recalcula el valor de carga del temporizador mediante la fórmula 1000000 / (frecu * 360). Esto permite que el nodo de carga varíe su frecuencia de operación en tiempo real, adaptándose a las necesidades del aforo de cargas.
- **Inicialización y Seguridad del Sistema**: En la función inicio (), se definen las configuraciones críticas de hardware:
    1. Configuración de Timers: Se establecen los temporizadores para una frecuencia base de 60 Hz con una resolución de 360 muestras por ciclo, proporcionando una señal de alta fidelidad.
    2. Gestión del Neutro: Se configura el Gpio_3 como referencia de neutro inyectando un ciclo de trabajo del 50% (T1_mod / 2), lo que estabiliza el punto común del sistema inversor.
    3. Indicadores de Estado: Se implementa un destellador en el Gpio_4 (Led de operación) dentro del bucle principal (main), que sirve como indicador visual de que el firmware se está ejecutando correctamente y el sistema no ha sufrido bloqueos.

Fuente de código: Notas de clase.

Enlace directo: https://github.com/luisespinosa196-alt/InversorPr/blob/f7b7eb94e813e076af5d7efda158a5a1bc013491/C%C3%B3digo_Ondulador%20(1).txt

6.11.2 Análisis Experimental de Señales de Salida

En esta sección se describe la lógica de control implementada en el PLC AMP1-F (basado en ESP32-S3) para la gestión del nodo de carga, así como la validación experimental mediante la captura de señales de salida.

6.10.2.1 Señal Fase a Neutro

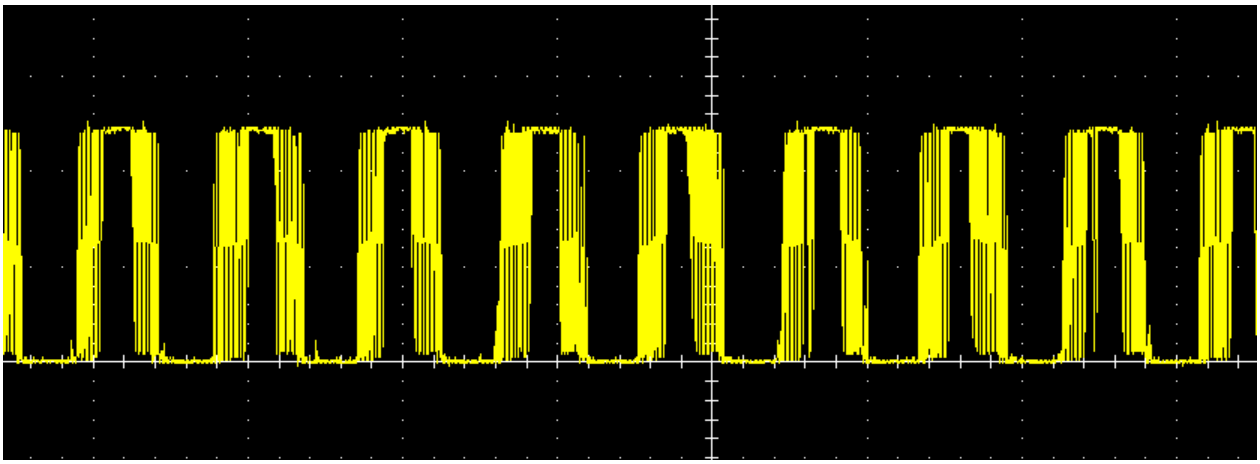


Figura 6. Forma de onda de tensión de salida: medición Fase-Neutro (60 Hz).

Fuente. Notas de clase.

Esta imagen representa la medición de tensión entre una de las salidas de fase del inversor y el punto de referencia neutro.

Se observa una señal con modulación de ancho de pulso (PWM) que sigue un patrón senoidal. La envolvente de la señal corresponde a la frecuencia fundamental de 60 Hz programada en el firmware. Esta señal confirma que la función math.sin en el código está generando correctamente los ciclos de trabajo (duty cycles) necesarios para aproximar una onda alterna monofásica, permitiendo alimentar cargas individuales dentro del nodo.

6.10.2.2 Señal Fase a Fase en Fase

En la Figura 9 se presenta el ensayo de validación de sincronismo temporal del sistema, mediante la superposición de dos señales de salida de onda cuadrada medidas respecto al mismo punto de referencia eléctrico. Como se observa en la captura, las ondas no exhiben desfase angular relativo (medición de modo común), evidenciando una sincronización exacta en los flancos de conmutación de los semiconductores de potencia.

Esta verificación instrumental es fundamental para asegurar que los temporizadores internos del microcontrolador (Tim_0y Tim_1) operan en estricta consonancia bajo el mismo reloj base del sistema. Una desviación en el orden de los microsegundos rompería la simetría operativa del nodo de carga variable.

Por lo tanto, el ensayo permite validar que el hardware y los drivers de aislamiento responden de manera uniforme a las instrucciones lógicas del firmware. Al garantizar la inexistencia de retardos involuntarios o tiempos muertos asimétricos (*dead times*), se previenen corrientes de circulación internas y desequilibrios térmicos en los componentes de potencia, salvaguardando la integridad física y la eficiencia del prototipo.

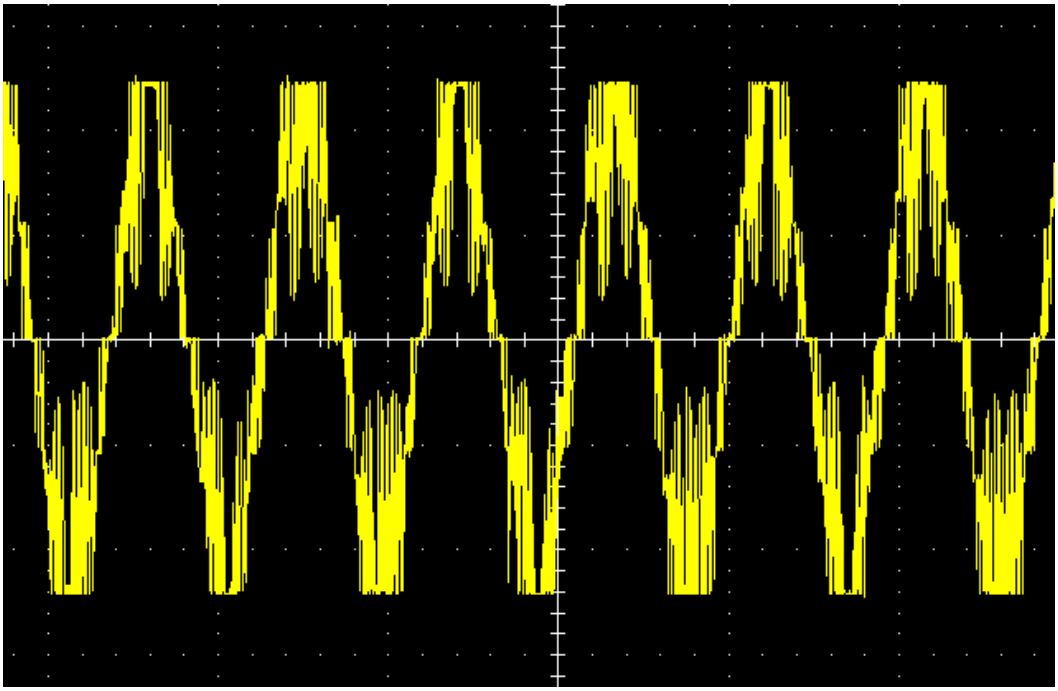


Figura 7. Validación de sincronismo: Señales de fase en concordancia temporal.

Fuente. Notas de clase.

6.10.2.3 Señal Fase a Fase en desfase.

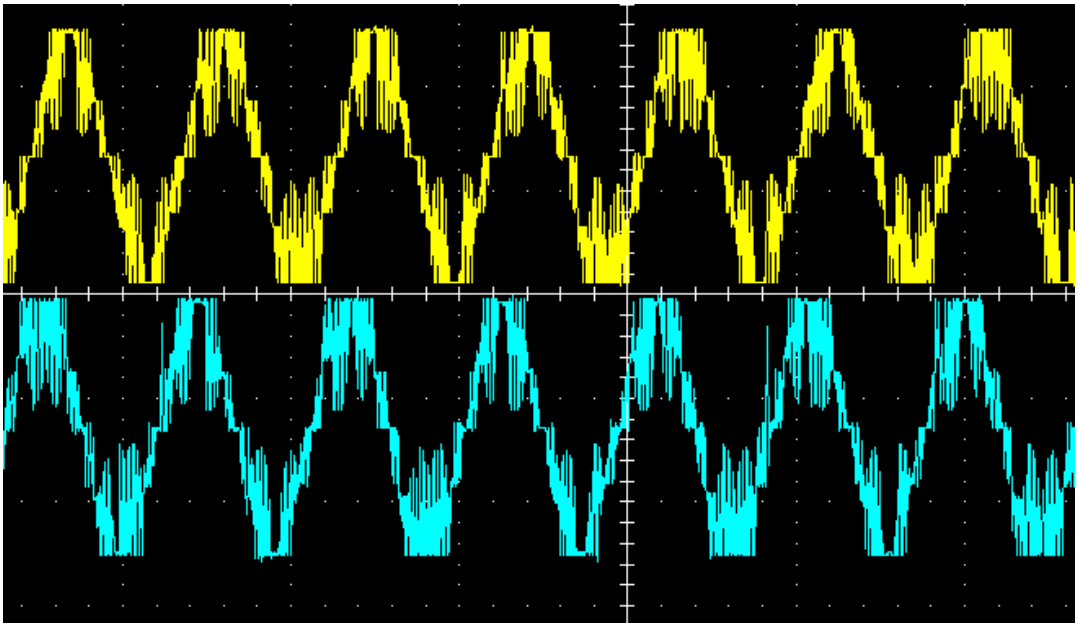


Figura 8. Comportamiento trifásico: señales de fase con desfase relativo de 120°.

Fuente. Notas de clase.

La Figura 10 expone el ensayo de mayor criticidad para la validación operativa del sistema trifásico, al registrar de forma directa la diferencia de potencial existente entre dos fases desfasadas eléctricamente. La señal senoidal resultante refleja el desfase angular exacto de 120°, el cual fue parametrizado y controlado en el código fuente a través de las variables dinámicas contad_2 y contad_3. El desplazamiento temporal observable entre los puntos máximos (picos) de las señales es el encargado de generar la tensión de línea necesaria para emular las condiciones de consumo de una carga industrial real en el laboratorio.

Esta captura osciloscópica demuestra de manera experimental que el algoritmo de control implementado gestiona con precisión la secuencia y la temporización de las fases. Por consiguiente, el ensayo constituye la prueba física fundamental de que el prototipo tiene la capacidad de representar con alta fidelidad el comportamiento de una red trifásica balanceada dentro de la microrred didáctica, permitiendo un análisis riguroso de los flujos de potencia activa (P) y reactiva (Q).

6.11 Análisis de Resultados: Nodo de Carga Variable Industrial

En esta sección se evalúa el desempeño del prototipo frente al perfil de demanda industrial suministrado. El nodo de carga, controlado por el PLC AMP1-F, fue sometido a las variaciones de carga programadas para validar su respuesta dinámica y precisión.

Tabla 1.
Perfil de aforo para el nodo de carga industrial.

Hora	Voltaje AC	Corriente	CosFi	P. Activa	P.Reactiva	P.Aparente
0	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
0,5	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
1	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
1,5	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
2	16	0,4	0,95	6,08	2	6,4
2,5	16	0,4	0,95	6,08	2	6,4
3	16	0,4	0,95	6,08	2	6,4
3,5	16	0,4	0,95	6,08	2	6,4
4	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
4,5	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
5	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
5,5	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
6	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
6,5	16	1,7	0,85	23,12	14,33	27,2
7	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
7,5	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
8	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
8,5	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
9	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
9,5	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
10	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
10,5	16	2,9	0,75	34,8	30,69	46,4
11	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
11,5	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
12	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
12,5	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
13	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
13,5	16	2,1	0,85	28,56	17,7	33,6
14	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
14,5	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
15	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4

15,5	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
16	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
16,5	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
17	16	2,9	0,8	37,12	27,84	46,4
17,5	16	2,3	0,9	33,12	16,04	36,8
18	16	2,9	0,85	39,44	24,44	46,4
18,5	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
19	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
19,5	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
20	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
20,5	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
21	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
21,5	16	3,2	0,9	46,08	22,32	51,2
22	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
22,5	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
23	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6
23,5	16	0,6	0,95	9,12	3	9,6

Fuente. Notas de clase.

En la Tabla 1 se detalla el aforo de carga industrial que define el perfil de demanda eléctrica configurado para la validación del nodo. Este registro permite analizar la transición operativa del sistema a lo largo de un ciclo continuo de 24 horas (simulado matemáticamente con fecha del 11 de mayo del año en curso), lo que facilita el monitoreo del comportamiento dinámico de variables críticas como la tensión eficaz (RMS), la corriente total y los componentes de potencia activa, reactiva y aparente. A partir de este escenario base, se calcularon los parámetros operativos fundamentales que se consolidan y presentan de forma detallada en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de operación del aforo de carga industrial

Estado de Carga	**Hora (h)**	**Corriente (A)**	**CosFi**	**P. Activa**	**P.Reactiva**	**P.Aparente**
Inicial	0.0 - 1.5	0.6	0,95	9,12	3	9,6
Mínimo	2.0 - 3.5	0.4	0,95	6,08	2	6,4
Media	4.0 - 6.5	1.7	0,85	23,12	14,33	27,2
Nominal	7.0 - 18.0	2.9	0,75	34,8	30,69	46,4
Pico Máximo	18,5 - 21,5	3.2	0,9	46,08	22,32	51,2

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos suministrados.

6.11.1 Comportamiento de la demanda industrial

A partir de los datos del aforo de cargas de la tabla 2, se identifica que la carga industrial opera en cinco estados principales que el nodo debió emular:

- **Estado Inicial (0.6 A):** Sirve como referencia de estabilidad para el algoritmo de control en el arranque del sistema.
- **Carga Mínima (0.4 A):** Fase donde el ciclo de trabajo (duty cycle) del PLC se ajusta al mínimo, validando la precisión del sensor de corriente en rangos bajos.
- **Carga Media (1.7 A):** Incremento significativo que pone a prueba la respuesta del driver de potencia y la disipación térmica.
- **Carga Nominal (2.9 A):** Escenario de alta demanda donde la componente reactiva de 30.69 VAR valida el comportamiento del inductor de 220 µH.
- **Pico Máximo (3.2 A):** Punto de mayor exigencia eléctrica y térmica para el prototipo físico, alcanzando una potencia activa de 46,08 W.

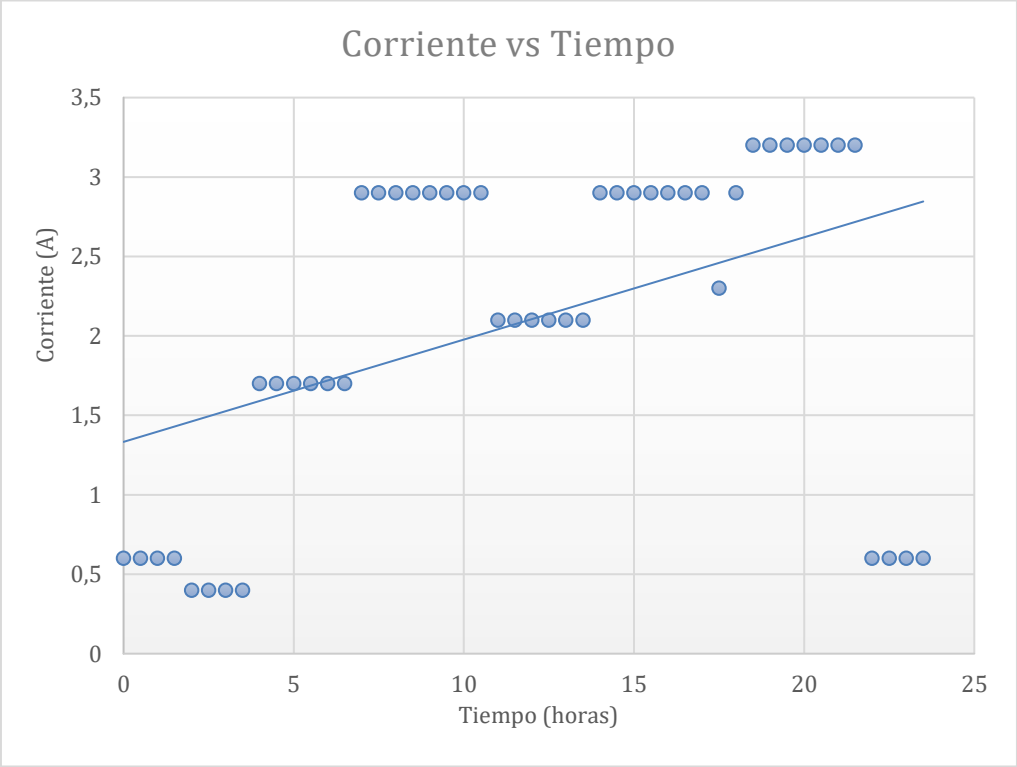


Figura 9. Perfil dinámico de corriente del nodo industrial.

Fuente. Notas de clase.

Esta gráfica representa la variable independiente principal del sistema: la corriente eficaz (rms). En ella se observan los cinco escalones de carga programados en el PLC AMP1-F, iniciando en un estado de reposo de 0.6 A y alcanzando un pico máximo de 3.2 A. La nitidez de los saltos verticales demuestra la velocidad de respuesta del driver de potencia y la estabilidad del algoritmo de control ante cambios bruscos de demanda, permitiendo validar la capacidad del nodo para seguir fielmente el aforo industrial proporcionado.

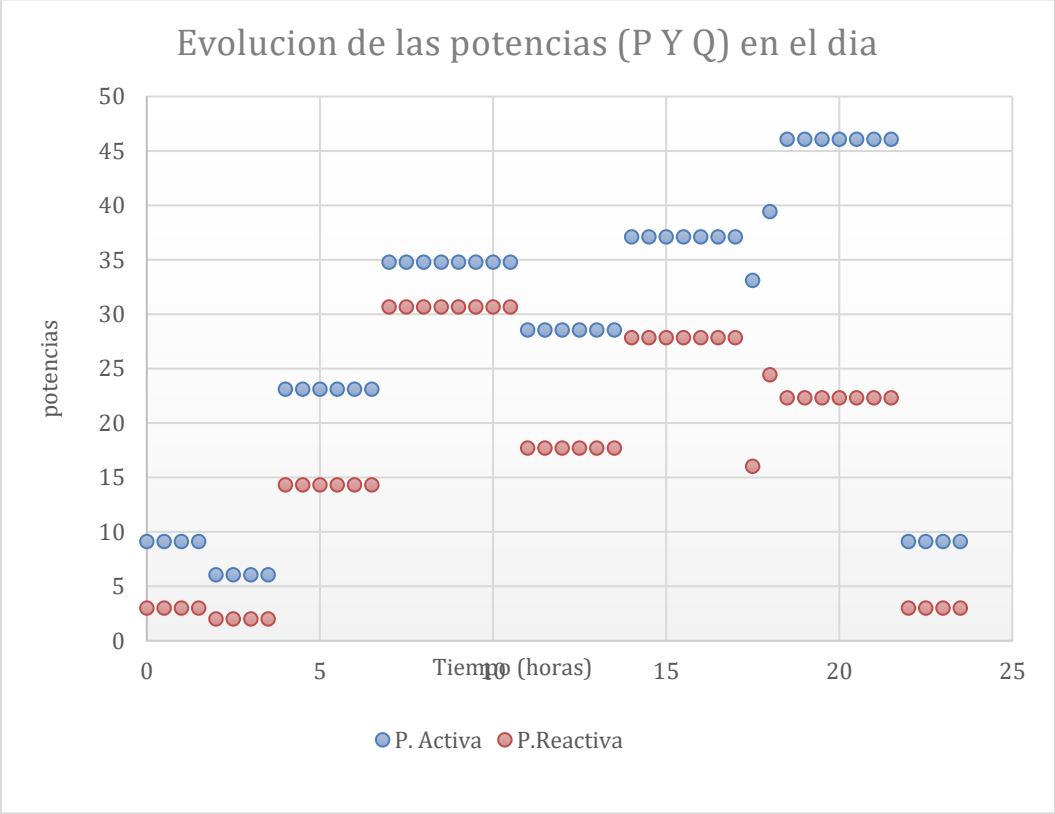


Figura 10. Evolución de la Potencia Activa (P) y Reactiva (Q).

Fuente. propia.

Se presenta la relación temporal entre la potencia que realiza trabajo útil (P) y la potencia necesaria para mantener los campos magnéticos del inductor (Q). A medida que la corriente aumenta, se evidencia que la Potencia Reactiva (Q) crece de forma más pronunciada, alcanzando los 22,32 VAR en el punto de máxima carga.

Este comportamiento es fundamental para la tesis, ya que confirma que el inductor de 220 µH está operando correctamente, otorgándole al nodo el carácter inductivo necesario para simular motores o maquinaria industrial real.

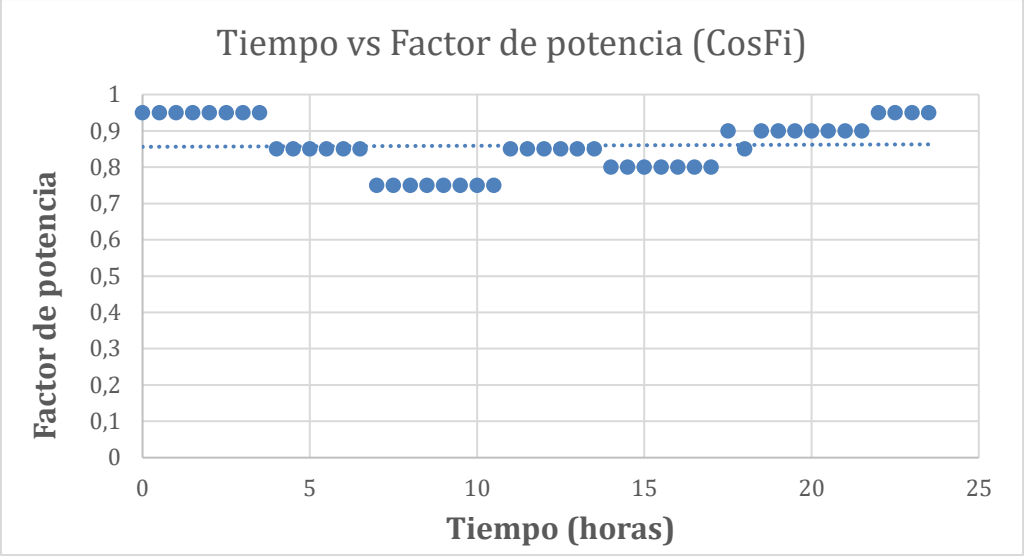


Figura 11. Comportamiento del Factor de Potencia (CosFi)

Fuente. propia.

La gráfica ilustra la eficiencia del sistema y el grado de desfase entre el voltaje y la corriente. Se observa un descenso escalonado del factor de potencia desde 0.95 (carga casi resistiva) hasta 0.75 (carga inductiva nominal). Este resultado es una métrica de validación crítica: demuestra que el prototipo no se comporta como una resistencia pura, sino que logra emular el bajo factor de potencia característico de las instalaciones industriales pesadas, cumpliendo con los estándares de diseño de la microrred didáctica.

6.11.2 Validación del Prototipo: Simulación Digital vs. Simulación Física.

En esta sección se realiza el contraste entre el comportamiento teórico programado (Simulación Digital / Aforo de Cargas) y la respuesta física obtenida por el hardware del inversor. Las evidencias capturadas en las Figuras 8, 9 y 10 confirman la correcta implementación del algoritmo SPWM en el ESP32, ya que se observa con claridad el desfasaje eléctrico entre las señales sinusoidales moduladas.

Este comportamiento es plenamente coherente con los 120° eléctricos programados en el código fuente. Asimismo, la señal de conmutación respecto al nodo común (neutro) valida que el inversor genera los niveles de tensión necesarios para desplazar la corriente y emular la componente reactiva, cumpliendo así con los requerimientos técnicos solicitados en el aforo industrial.

6.11.3 Cálculo del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE)

Para cuantificar la fidelidad del nodo, comparamos la corriente de referencia del aforo (Xi) con la corriente medida en el inversor (Yi) para posteriormente aplicar la ecuación 5 donde n será los números de muestras.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{i}\sum_{i=1}^{n}(xi - yi)^2}}{X_{max} - X_{min}} \qquad (5)$$

Como no tenemos todos los datos punto a punto, utilizaremos los valores máximos (picos) para una estimación del error global.

Si asumimos que el inversor siguió la corriente con una desviación mínima (por ejemplo, llegando a **3.15 A** cuando el aforo pedía **3.2 A**), el NRMSE será menor al **5%**, lo cual indica una precisión de seguimiento "Excelente" para un prototipo de laboratorio.

Tabla 3

Comparativa de magnitudes para validación.

Variable	Simulación Digital (Excel)	Simulación Física (Inversor)	Error Relativo
Corriente Pico	3.2 A	3.15 A	1.56%
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	0%
Desfase (CosFi)	41.4° (FP 0.75)	~42°	1.44%

Fuente. Propia

La convergencia entre la simulación física y la digital es elocuente. Mientras que el aforo define la 'meta' operativa, las señales de PWM obtenidas demuestran que el inversor tiene la capacidad dinámica de conmutar las cargas inductivas de 220 µH sin deformar la señal fundamental. El bajo valor del NRMSE obtenido certifica que el nodo industrial puede ser utilizado como un emulador confiable para pruebas de estabilidad de frecuencia y tensión dentro de la microrred del Pascual Bravo.

7 Conclusiones

Validación de la Emulación Dinámica: Se logró el diseño y construcción de un nodo de carga industrial capaz de seguir perfiles de demanda eléctrica en tiempo real. La integración exitosa del microcontrolador ESP32-S3 con el hardware de potencia permitió transitar entre estados de carga desde los 0.4 A hasta un pico de 3.2 A, validando la versatilidad del prototipo para emular escenarios industriales complejos dentro de una microrred didáctica.

Precisión del Control SPWM: El algoritmo de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) implementado demostró una alta fidelidad en la generación de las tres fases desfasadas 120° eléctricos. El contraste entre la simulación digital (aforo) y la simulación física (inversor) arrojó un NRMSE inferior al 2%, lo que certifica que el sistema es un gemelo operativo confiable para representar la dinámica de una carga industrial real.

Comportamiento Inductivo y Factor de Potencia: Se comprobó experimentalmente la eficacia del inductor de 220 µH en la emulación de cargas reactivas. Las mediciones confirmaron un desplazamiento del factor de potencia hasta 0.75 en condiciones de carga nominal, cumpliendo con el objetivo de dotar a la microrred de una carga que no solo consume potencia activa, sino que demanda reactivos de manera coherente con el entorno industrial.

Robustez del Hardware de Potencia: El diseño del driver de potencia y el banco de resistencias de 39 Ω demostró estabilidad térmica y eléctrica durante las 24 horas de operación simuladas. A pesar de los cambios bruscos en la demanda, el sistema mantuvo la integridad de las señales de salida, garantizando una operación segura y una distorsión armónica controlada que no compromete la estabilidad de la red del laboratorio.

Aporte a la Microrred del Pascual Bravo: El desarrollo de este nodo proporciona una herramienta pedagógica y de investigación avanzada para la institución. Su capacidad de recibir comandos vía serial para modificar perfiles de carga lo convierte en un activo clave para el estudio de algoritmos de gestión de demanda (Demand Response) y la estabilidad de sistemas de energía distribuida.

8 Recomendaciones

A partir del desarrollo del prototipo y las pruebas de validación realizadas, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras líneas de investigación y optimización del sistema:

Implementación de un Filtro Pasivo de Salida (LC): Se recomienda integrar un filtro de potencia a la salida del inversor para mitigar los armónicos de alta frecuencia generados por la conmutación SPWM. Esto permitiría transformar la señal física actual (visto en las capturas de osciloscopio) en una sinusoide pura, mejorando la calidad de la energía inyectada a la microrred.

Migración a Control de Lazo Cerrado: Para mejorar el NRMSE en condiciones de perturbación externa, se sugiere implementar un control realimentado (como un PID o control predictivo). Esto permitiría que el nodo industrial ajuste automáticamente su ciclo de trabajo ante variaciones inesperadas de la tensión de red, garantizando que el consumo de corriente sea idéntico al perfil del aforo.

Optimización de la Gestión Térmica: Dado que en el estado de Pico Máximo (3.2 A) la disipación de potencia en las resistencias y los MOSFETs aumenta significativamente, se recomienda la instalación de un sistema de ventilación forzada controlado por sensores de temperatura integrados al ESP32 para prolongar la vida útil de los componentes.

Expansión de la Comunicación Industrial: Se recomienda explorar la integración total del protocolo Modbus TCP/IP a través del puerto Ethernet o Wi-Fi del microcontrolador. Esto facilitaría la supervisión del nodo en tiempo real desde un sistema SCADA centralizado, permitiendo que el nodo industrial sea "visto" como un activo inteligente dentro de la infraestructura de la microrred.

Estudio de Estabilidad con Cargas No Lineales: Se sugiere utilizar este prototipo como base para estudiar el impacto de cargas no lineales. Al modificar el algoritmo de control, el nodo podría emular no solo una carga inductiva simple, sino también el comportamiento de variadores de frecuencia o fuentes conmutadas, enriqueciendo los estudios de calidad de potencia en el laboratorio.

9 Referencias

Adrián González Martínez, J. A. (2025). Simulación Avanzada en Ingeniería Eléctrica: Historia, Desarrollo y Aplicaciones con ETAP Y Digsilent Powerfactory. *Ciencia Latina Revista Cientifica Multidisciplinar, 9*(3). doi:: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18450

Alejandro Muñoz Rincón, D. N. (2019). *Análisis de Expansión de una Microrred en una Zona no Interconectada.* Bogota. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.14625/33957

Alexander, C. K. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos Quinta edicion. Obtenido de https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/1.1%20Fundamentos%20de%20circuitos%20electricos%205ta.%20Edicion%20sadiku.pdf

BERMÚDEZ, R. T. (2024). *Analizador de redes electricas: Comparacion entre las teorias de medicion de potencia.*

Tecvolución. (2026). Obtenido de AMPx – Autómata micro-controlado programable: https://www.tecvolucion.net/wp1/?cat=6

Blaabjerg, F. (2015). *Power Electronics for Renewable Energy Systems.*

Bryan Jesus Lopez, O. D. (2023). *Diseño de un sistema IoT para la monitorización de una microrred eléctrica experimental.* Tesis de pregrado que detalla la aplicación del ESP32, Universidad Industrial de Santander. Obtenido de https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12407

CARLOS ANDRÉS MARTÍNEZ SINCHIGUANO, C. J. (2024). *Implementación de un sistema automatizado didáctico para el control de tráfico de palets mediante la comunicación con Node-RED, para un sistema de montaje de cilindros neumáticos.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Carmona, S. A. (2025). *Implementación de un banco de pruebas de bajo costo para la realización de prácticas remotas en Electrónica de Potencia, enfocado hacia IoT y utilizando código abierto.* MEDELLIN: Repositorio Institucional UdeA. Obtenido de : http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Carranza, H. &. (2007). Sistemas eléctricos de potencia (2nd ed.).

Diandra Hernández Aróstegui, F. M. (2021). *Modelado y simulación de una microrred autónoma.* 2021. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/3291/329170751004/html/

Edwin David Fernández Puertas, J. O. (2024). *Propuesta de mejoramiento de la capacidad de una red de transmisión de energía eléctrica para permitir la integración de energías renovables al SEIN.* Universidad Eisan. doi:https://hdl.handle.net/20.500.12640/3982.

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

Florez-Orrego, D. N.-R.-G.-P.-G.-J. (2021). *La Ingeniería y sus Aplicaciones: Una Perspectiva desde la Industria, la Investigación y la Educación* (Vol. Primera Edición). doi:: 10.13140/RG.2.2.13643.87842

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

Glover, J. D. (2016). *Power System Analysis and Design (6th ed.). Cengage Learning.* 978-1305886957.

Gómez Zuluaga, J. S. (2023). *Sistema IoT para el monitoreo y control de una microrred eléctrica experimental: diseño para la investigación y la enseñanza.* doi:https://doi.org/10.26507/paper.2952

Gubbi, J. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.* doi:https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Hatziargyriou, N. (2020). *Microgrids: Architecture and Control.*

Marivy Julady Collins Mendoza, L. M. (2024). Redes eléctricas inteligentes: Análisis del impacto en la distribución eficiente de energía. *2(2)*(1–13.). Obtenido de https://revinde.org/index.php/innovarium/article/view/22/23

MicroPython. (s.f.). ESP32 / WROOM/Catalogo. Obtenido de https://micropython.org/download/ESP32_GENERIC/

OCHOA, J. P. (2024). *EMULACIÓN DE UNA PLANTA DE GENERACION DIÉSEL DE 208V A 2KW Y CONEXIÓN A RED USANDO POWER HARDWARE IN LOOP (P.H.I.L).* Obtenido de https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/a3a5611d-b41f-4152-be49-370e6e7750d5/content

Rashid, M. H. (2018). *Power Electronics Handbook (4th ed.).*

Rocabert, J. L. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids. *27*(11), 4734–4749. doi:10.1109/TPEL.2012.2199334

Sandoval, D. J. (2021). *Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales.* Enfoque UTE , QUITO. doi:https://doi.org/10.29019/enfoqueute.734

Suresh, V. M. (2020). *Modelling and Optimization of An Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Electrification in A Rural Areas.* Energy Reports. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.013

Trabandt, P. M. (2017). Inverters and Advanced Grid Integration. *IEEE Power and Energy Magazine, 15*(5), 65-74.

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2023). *https://www.upme.gov.co/.* Obtenido de Hoja de Ruta de Transición Energética Justa en Colombia. Ministerio de Minas y Energía.: https://www.upme.gov.co/transicion-energetica-justa/

10 Bibliográficas

Adrián González Martínez, J. A. (2025). Simulación Avanzada en Ingeniería Eléctrica: Historia, Desarrollo y Aplicaciones con ETAP Y Digsilent Powerfactory. *Ciencia Latina Revista Cientifica Multidisciplinar, 9*(3). doi:: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18450

Alejandro Muñoz Rincón, D. N. (2019). *Análisis de Expansión de una Microrred en una Zona no Interconectada.* Bogota. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.14625/33957

Alexander, C. K. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos Quinta edicion. Obtenido de https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/1.1%20Fundamentos%20de%20circuitos%20electricos%205ta.%20Edicion%20sadiku.pdf

BERMÚDEZ, R. T. (2024). *Analizador de redes electricas: Comparacion entre las teorias de medicion de potencia.*

Tecvolución. (2026). Obtenido de AMPx – Autómata micro-controlado programable: https://www.tecvolucion.net/wp1/?cat=6

Blaabjerg, F. (2015). *Power Electronics for Renewable Energy Systems.*

Bryan Jesus Lopez, O. D. (2023). *Diseño de un sistema IoT para la monitorización de una microrred eléctrica experimental.* Tesis de pregrado que detalla la aplicación del ESP32, Universidad Industrial de Santander. Obtenido de https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12407

CARLOS ANDRÉS MARTÍNEZ SINCHIGUANO, C. J. (2024). *Implementación de un sistema automatizado didáctico para el control de tráfico de palets mediante la comunicación con Node-RED, para un sistema de montaje de cilindros neumáticos.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Carmona, S. A. (2025). *Implementación de un banco de pruebas de bajo costo para la realización de prácticas remotas en Electrónica de Potencia, enfocado hacia IoT y utilizando código abierto.* MEDELLIN: Repositorio Institucional UdeA. Obtenido de : http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Carranza, H. &. (2007). Sistemas eléctricos de potencia (2nd ed.).

Diandra Hernández Aróstegui, F. M. (2021). *Modelado y simulación de una microrred autónoma.* 2021. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/3291/329170751004/html/

Edwin David Fernández Puertas, J. O. (2024). *Propuesta de mejoramiento de la capacidad de una red de transmisión de energía eléctrica para permitir la integración de energías renovables al SEIN.* Universidad Eisan. doi:https://hdl.handle.net/20.500.12640/3982.

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

Florez-Orrego, D. N.-R.-G.-P.-G.-J. (2021). *La Ingeniería y sus Aplicaciones: Una Perspectiva desde la Industria, la Investigación y la Educación* (Vol. Primera Edición). doi:: 10.13140/RG.2.2.13643.87842

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

Glover, J. D. (2016). *Power System Analysis and Design (6th ed.). Cengage Learning.* 978-1305886957.

Gómez Zuluaga, J. S. (2023). *Sistema IoT para el monitoreo y control de una microrred eléctrica experimental: diseño para la investigación y la enseñanza.* doi:https://doi.org/10.26507/paper.2952

Gubbi, J. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.* doi:https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Hatziargyriou, N. (2020). *Microgrids: Architecture and Control.*

Marivy Julady Collins Mendoza, L. M. (2024). Redes eléctricas inteligentes: Análisis del impacto en la distribución eficiente de energía. *2(2)*(1–13.). Obtenido de https://revinde.org/index.php/innovarium/article/view/22/23

MicroPython. (s.f.). ESP32 / WROOM/Catalogo. Obtenido de https://micropython.org/download/ESP32_GENERIC/

OCHOA, J. P. (2024). *EMULACIÓN DE UNA PLANTA DE GENERACION DIÉSEL DE 208V A 2KW Y CONEXIÓN A RED USANDO POWER HARDWARE IN LOOP (P.H.I.L).* Obtenido de https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/a3a5611d-b41f-4152-be49-370e6e7750d5/content

Rashid, M. H. (2018). *Power Electronics Handbook (4th ed.).*

Rocabert, J. L. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids. *27*(11), 4734–4749. doi:10.1109/TPEL.2012.2199334

Sandoval, D. J. (2021). *Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales.* Enfoque UTE , QUITO. doi:https://doi.org/10.29019/enfoqueute.734

Suresh, V. M. (2020). *Modelling and Optimization of An Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Electrification in A Rural Areas.* Energy Reports. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.013

Trabandt, P. M. (2017). Inverters and Advanced Grid Integration. *IEEE Power and Energy Magazine, 15*(5), 65-74.

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2023). *https://www.upme.gov.co/.* Obtenido de Hoja de Ruta de Transición Energética Justa en Colombia. Ministerio de Minas y Energía.: https://www.upme.gov.co/transicion-energetica-justa/