

**CONSTRUCCIÓN DE EMULADOR DEL TIPO CONTROLADO POR HARDWARE
PARA LA PRUEBA DE ANALIZADORES DE RED DEL PROYECTO AP0036**

CAMILA GONZÁLEZ RESTREPO

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2025

**CONSTRUCCIÓN DE EMULADOR DEL TIPO CONTROLADO POR HARDWARE
PARA LA PRUEBA DE ANALIZADORES DE RED DEL PROYECTO AP0036**

CAMILA GONZÁLEZ RESTREPO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera electricista

Asesores

Santiago Bustamante Mesa

Doctor en ingeniería

Andrés Fernando Pérez González

Magister en ingeniería

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2025

Contenido

1.	Planteamiento del problema	2
1.1	Descripción	2
1.2	Formulación	2
2.	Justificación	3
3.	Objetivos	4
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos	4
4.	Referentes teóricos	5
4.1	Emulación de cargas	5
4.2	Microcontroladores	6
4.2.1.	Microcontrolador Stm32	6
4.3	Medidores de energía	7
4.3.1.	Medición de corriente, voltaje y factor de potencia	7
4.4	Protocolo Modbus	8
4.4.1.	Modbus RTU	9
4.4.2.	RS-485	10
4.5	Diferencia entre emulación y simulación	10
4.6	Control remoto de motores eléctricos	11
5.	Metodología	13
5.1	Tipo de proyecto	13
5.2	Método	13
5.3	Instrumentos de recolección de información.	15
5.3.1.	Fuentes primarias	15
5.3.2.	Fuentes secundarias	15
6.	Resultados	16

7.	Conclusiones	24
8.	Recomendaciones	25
9.	Referencias bibliográficas	26

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema general emulador de carga	5
Figura 2. Placa de pines stm32.	7
Figura 3. Niveles de protocolo Modbus.	9
Figura 4. Conexión de los dispositivos en red bajo el estándar RS-485.	10
Figura 5. Conexiones del módulo.	16
Figura 6. Curva histórica de demanda XM.	18
Figura 7. Curva ajustada a la salida.	18
Figura 8. Pantalla interfaz de usuario.	19
Figura 9. Esquema eléctrico general del emulador.	22
Figura 10. Diseño de emulador final.	22

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Pruebas de validación.	20

Resumen

CONSTRUCCIÓN DE EMULADOR DEL TIPO CONTROLADO POR HARDWARE PARA LA PRUEBA DE ANALIZADORES DE RED DEL PROYECTO AP0036

CAMILA GONZÁLEZ RESTREPO

Este trabajo presenta el desarrollo e implementación de un sistema emulador de cargas eléctricas para micro redes, basado en microcontroladores STM32 y una tarjeta STEVAL en su rol de inversor. La finalidad del proyecto es simular el comportamiento dinámico de cargas tipo RLC en un entorno controlado, facilitando el análisis de respuesta en micro redes inteligentes. Se diseñaron e implementaron algoritmos de modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM) en dos controladores STM32: uno encargado de generar señales de voltaje y otro de corriente. El sistema permite variar los parámetros de carga de forma flexible, representando diferentes condiciones de operación. Las pruebas realizadas demostraron la capacidad del emulador para reproducir señales con frecuencia de 60 Hz y generar corrientes de hasta 70 A, validando su utilidad como herramienta de pruebas en entornos académicos y de investigación. Este desarrollo contribuye a la creación de entornos de prueba más accesibles para estudios de calidad de energía, integración de fuentes renovables y control de cargas.

Palabras claves: Emulador de carga, microred, STM32, voltaje, corriente.

Abstract

This project presents the development and implementation of an electric load emulator system for microgrids, based on STM32 microcontrollers and a STEVAL board functioning as an inverter. The purpose of the project is to simulate the dynamic behavior of RLC-type loads in a controlled environment, facilitating response analysis in smart microgrids. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) algorithms were designed and implemented on two STM32 controllers: one responsible for generating voltage signals and the other for current. The system allows for flexible adjustment of load parameters, representing different operating conditions. Tests demonstrated the emulator's capability to reproduce 60 Hz signals and generate currents of up to 70 A, validating its usefulness as a testing tool in academic and research environments. This development contributes to creating more accessible test environments for studies on power quality, renewable energy integration, and load control.

Keywords: Load emulator, microgrid, STM32, voltage, current.

Glosario

Analizador de red: dispositivo utilizado para medir y monitorear parámetros eléctricos como voltaje, corriente y factor de potencia en un sistema eléctrico.

Cable USB-C: conector utilizado para la comunicación y alimentación de dispositivos, incluyendo algunas placas STM32 modernas que admiten programación y depuración a través de este puerto.

Corriente alterna (CA): tipo de corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones cambia periódicamente.

Corriente continua (CC): tipo de corriente eléctrica en la que los electrones fluyen en una única dirección.

Emulación: técnica que permite replicar el comportamiento de un sistema real mediante hardware y software.

Factor de potencia: relación entre la potencia activa y la potencia aparente en un sistema eléctrico, indicando la eficiencia en el uso de la energía.

HDMI (High-Definition Multimedia Interface): interfaz de comunicación digital que permite la transmisión de video y audio en alta definición entre dispositivos como computadoras, monitores y televisores.

Inversor: dispositivo que convierte corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) de características específicas.

IoT (Internet of Things): red de dispositivos interconectados que recopilan y comparten datos a través de internet.

Medidor de energía: dispositivo que mide el consumo eléctrico de una instalación.

Microrred: pequeño sistema eléctrico interconectado que puede operar de forma independiente o en conjunto con la red principal.

Modbus: protocolo de comunicación industrial basado en una arquitectura maestro-esclavo, utilizado para la transmisión de datos entre dispositivos como PLCs, sensores y microcontroladores STM32 en redes RS-485 o TCP/IP.

Simulación: técnica que modela el comportamiento de un sistema a través de cálculos matemáticos sin replicarlo físicamente.

SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation): técnica de modulación de ancho de pulso utilizada para generar señales senoidales en inversores y convertidores de potencia.

Introducción

En el contexto actual de la transformación digital y la creciente integración del Internet de las Cosas (IoT) en el sector eléctrico, la validación precisa de dispositivos de medición resulta esencial para garantizar la seguridad y eficiencia de las redes eléctricas. Este documento presenta el desarrollo de un emulador de hardware diseñado para la realización de pruebas exhaustivas de analizadores IoT de red eléctrica. El emulador tiene la capacidad de simular condiciones eléctricas variables, como tensiones de fase, corrientes y factores de potencia, a través de microcontroladores e inversores manipulados de forma remota mediante la comunicación con un medidor multifuncional y la integración de protocolos como Modbus que facilita la interacción en tiempo real entre el emulador, los dispositivos de medición y la plataforma de control, lo que optimiza la recolección y análisis de datos.

El desarrollo se fundamenta en la necesidad de contar con entornos de prueba seguros y realistas que permitan evaluar el comportamiento de los analizadores de red antes de su implementación en sistemas operativos reales. De esta manera, se busca reducir costos asociados a posibles fallos y mejorar la fiabilidad de los dispositivos de medición, contribuyendo a la implementación de soluciones energéticas más eficientes y sostenibles.

En las secciones siguientes, se abordará los objetivos específicos del proyecto, la metodología adoptada para el diseño y construcción del emulador reflejando los resultados obtenidos, así como las pruebas de validación para verificar su funcionalidad. Finalmente, se espera que este emulador no solo contribuya al desarrollo de tecnologías más avanzadas en el ámbito del IoT, sino que sirva como referencia para futuros desarrollos en el campo de la automatización y el control de sistemas energéticos.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

La seguridad y confiabilidad de los sistemas de potencia en redes eléctricas dependen de su capacidad para mantenerse dentro de parámetros estables en sus variables de operación. Con el crecimiento de las redes de suministro y la creciente complejidad en la gestión de la estabilidad, las oscilaciones que surgen tras ciertas contingencias pueden llevar al sistema al colapso. Para mantener la estabilidad, se han desarrollado diversas estrategias de monitoreo y control, incluyendo la implementación de analizadores IoT avanzados. Sin embargo, estos dispositivos deben probarse en entornos controlados antes de su implementación en la red real.

La creación de un emulador de hardware para pruebas de analizadores IoT en redes eléctricas presenta desafíos esenciales para garantizar que estos dispositivos operen con la precisión y seguridad necesarias. Estos emuladores deben poder reproducir variaciones de tensiones, corrientes y factores de potencia, simulando escenarios críticos para evaluar la respuesta de los analizadores de red. Los problemas a resolver incluyen la construcción de un equipo que pueda emular condiciones operacionales de un analizador de red.

1.2 Formulación

¿Cómo se puede realizar la variación de tensiones, corrientes y factor de potencia a partir de la construcción un emulador del tipo hardware para probar y validar la precisión de analizadores IoT de redes eléctricas en condiciones controladas?

2. Justificación

Este proyecto es adquiere alta relevancia ya que permite realizar pruebas rigurosas en condiciones controladas y realistas, asegurando el correcto funcionamiento de los analizadores IoT de red eléctrica. Al garantizar que los dispositivos de medición operen de manera precisa, es posible la consecución de datos más acotados a la realidad y, por lo tanto, que suministren una información más precisa sobre el comportamiento de la red eléctrica, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en el monitoreo y control de los diferentes sistemas eléctricos. La solución basada microcontroladores STM32 e inversores STEVAL permite generar variaciones controladas de tensión, corriente y factor de potencia con mayor precisión, aprovechando la capacidad de estos dispositivos para comunicarse de forma remota mediante protocolos como Modbus RS485 y USB.

La implementación de esta tecnología no solo mejora la exactitud de las pruebas, sino que también facilita la integración con plataformas digitales y sistemas de monitoreo en tiempo real, lo que resulta en una validación más efectiva del rendimiento de los analizadores. Este tipo de proyecto fomenta la innovación en el sector eléctrico, investigaciones de IoT y permite el avance de tecnologías de medición y control. La innovación en emulación de analizadores de red fomenta avances en el sector de la ingeniería eléctrica y el IoT, promoviendo la investigación y el desarrollo de tecnologías de medición y control que beneficien tanto a investigadores como a ingenieros y empresas del sector energético. La capacidad de emular y probar perfiles de consumo variados permite predecir cómo reaccionarían los sistemas en condiciones de operación diferentes.

El presente proyecto contribuye a reducir los costos asociados a fallos en la implementación de nuevos dispositivos de medición, al permitir realizar ensayos en un entorno seguro y controlado, beneficiando tanto a operadores de red como a usuarios finales garantizando que los valores medidos son los correctos y por ende no habrá equivocaciones en facturación. Con el desarrollo de este tipo de proyectos se da un alto impulso para el avance en el área del IoT aplicado a redes eléctricas, promoviendo el desarrollo de tecnologías más eficientes y seguras para la medición y control de la energía.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Construir un emulador del tipo hardware para la realización de pruebas de analizadores IoT de redes eléctricas, que permita la variación controlada de las tensiones de fase, corrientes y factor de potencia a través de dos microcontroladores Stm32 y dos inversores Steval, garantizando una validación precisa del desempeño de los dispositivos de medición en condiciones eléctricas simuladas.

3.2 Objetivos específicos

Implementar un sistema de control remoto que manipule los parámetros eléctricos de entrada de los microcontroladores Stm32, a través de una plataforma basada en comunicación Modbus emulando el comportamiento de una curva de demanda.

Configurar una interfaz de usuario que permita la manipulación precisa de los microcontroladores Stm32 y en consecuencia la variación de tensiones y corrientes a través del control de los inversores, emulando diferentes perfiles de carga.

Realizar pruebas para la validación del funcionamiento del emulador, garantizando que se cumplan los requerimientos operacionales de los analizadores IOT.

4. Referentes teóricos

4.1 Emulación de cargas

El término emulación se refiere a la reproducción del comportamiento de un sistema o una parte de él mediante otra plataforma o dispositivo, de modo que el sistema imitador funcione de manera idéntica al original. Esto implica que, ante una misma entrada, la salida del sistema que emula debe ser igual a la del sistema imitado. La relevancia de un sistema de emulación de cargas industriales radica en su capacidad para analizar el comportamiento del sistema y facilitar la toma de decisiones, permitiendo comparar distintos métodos de control utilizados en la actualidad. Este concepto es ampliamente aplicable en diversas áreas de la ingeniería, como el desarrollo y control de máquinas eléctricas, el control de procesos y la gestión de energía (Changoluisa et al., 2017).

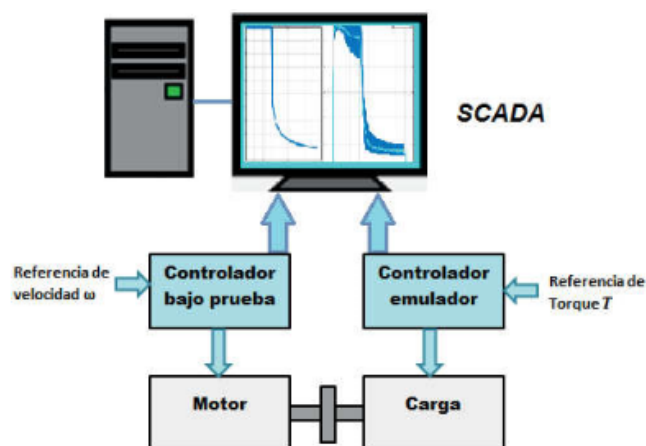


Figura 1. Esquema general emulador de carga

Fuente Changoluisa, D., Jácome, G., Tasiguano, C., & Pozo, M. (2017).

Los emuladores han jugado un papel crucial en el desarrollo de la tecnología, permitiendo la simulación de sistemas y dispositivos para diversas aplicaciones. Su historia se remonta a los primeros días de la computación y ha evolucionado significativamente con el tiempo. En la década de 1960 con la llegada de las primeras computadoras, surgió la necesidad de emular hardware para poder ejecutar software en diferentes plataformas. Uno de los primeros emuladores conocidos fue el "CTSS" (Compatible Time-Sharing System), que permitió a diferentes usuarios acceder a recursos computacionales compartidos. Durante este tiempo, los emuladores eran

principalmente utilizados en entornos académicos y de investigación. A finales de los años 80 y durante los 90, los emuladores de videojuegos comenzaron a ganar popularidad (Santos, 2010).

4.2 Microcontroladores

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico programable diseñado para ejecutar acciones o instrucciones específicas. Su funcionamiento es similar al de un ordenador, pero con un tamaño más compacto, un menor costo y un enfoque en tareas concretas. Está compuesto por diversos elementos internos que permiten su operatividad. La Unidad Central de Procesamiento (CPU) es el núcleo del microcontrolador y se encarga de ejecutar las instrucciones almacenadas en la memoria. La memoria se divide en dos tipos: la RAM, que almacena temporalmente los datos utilizados por el programa en ejecución, y la ROM, que guarda de forma permanente el código que debe ejecutar el microcontrolador. Además, cuenta con un oscilador, que genera pulsos a una frecuencia determinada para sincronizar todas sus funciones internas (Universidad Europea, 2024).

4.2.1. Microcontrolador Stm32. Los microcontroladores STM32 son una serie de dispositivos de 32 bits que utilizan el núcleo ARM Cortex-M y han sido desarrollados y fabricados por STMicroelectronics. Los microcontroladores STM32 se emplean en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo el procesamiento digital de señales en tiempo real, sistemas de bajo consumo, el Internet de las Cosas (IoT) y sistemas integrados simples. Las placas STM32 Nucleo ofrecen una solución accesible para probar ideas y desarrollar prototipos con estos microcontroladores. Entre sus características, integran el depurador y programador ST-LINK, incluyen la biblioteca HAL de software de STM32, disponen de varios ejemplos de software preinstalados y permiten acceso directo a recursos en línea de mbed. Además, cuentan con soporte de conectividad Arduino y disponen de encabezados ST Morpho para ampliar sus funcionalidades (Riverdi, s.f.).

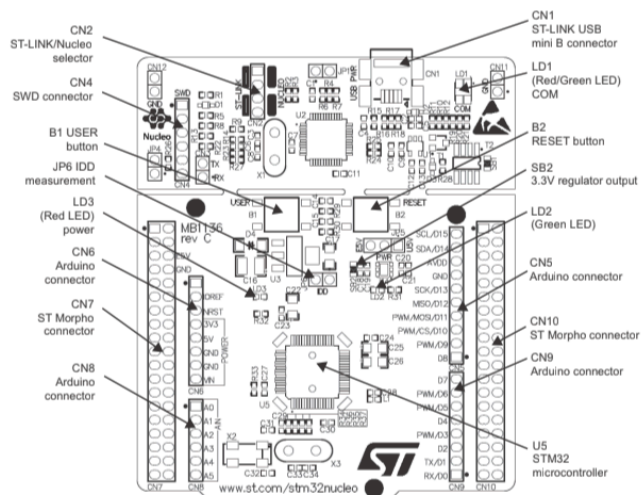


Figura 2. Placa de pines stm32.
Fuente (STMicroelectronics, 2014).

4.3 Medidores de energía

Un medidor de consumo eléctrico es un dispositivo que se utiliza para calcular la cantidad de energía eléctrica que se consume en una vivienda o negocio. Estos equipos se conectan a la red eléctrica y registran el flujo de electricidad que pasa por el cableado. Existen varios tipos de medidores de consumo eléctrico, siendo uno de los más comunes el medidor bidireccional. Este tipo de medidor, además de medir el consumo total, puede ofrecer información detallada sobre el uso específico de la energía, indicando, por ejemplo, cuánta electricidad se emplea para calefacción, iluminación o electrodomésticos. Esta información es útil para tomar decisiones informadas que permitan reducir el consumo energético (Melfosur, 2023).

4.3.1. Medición de corriente, voltaje y factor de potencia. La medición de corriente se realiza con un amperímetro o una pinza amperométrica, conectándose en serie para registrar la corriente que fluye por el circuito. La tensión, en cambio, se mide con un voltímetro en paralelo al componente o fuente. El factor de potencia, que representa la eficiencia de uso de energía, se mide utilizando un cosfímetro o una pinza cosfímetrica, que determina el desfase entre corriente y tensión para obtener el coseno de phi. Estos instrumentos ayudan a evaluar y optimizar el rendimiento eléctrico (Universidad Nacional de La Plata, s.f).

Los emuladores de carga y los medidores de energía son herramientas clave en la medición y control de corriente, voltaje y factor de potencia, especialmente en entornos de pruebas y desarrollo de sistemas eléctricos. Los emuladores de carga permiten simular diversas condiciones de carga en un sistema eléctrico, lo que facilita la evaluación del comportamiento de los dispositivos eléctricos bajo diferentes situaciones, como cambios en la corriente o en el voltaje. Estos emuladores pueden ajustar dinámicamente la carga, permitiendo a los ingenieros medir el voltaje, la corriente y, de manera indirecta, el factor de potencia sin necesidad de conectar cargas reales. De esta manera, se pueden estudiar las características de rendimiento de los equipos y verificar su funcionamiento en condiciones extremas o de operación específicas (Mori, M. M. N., 2018).

Por otro lado, los medidores de energía son dispositivos esenciales que se utilizan para cuantificar el consumo de electricidad en un sistema. Estos medidores miden no solo el voltaje y la corriente, sino también la potencia activa, reactiva y aparente, proporcionando una visión completa de la eficiencia del sistema. Con estos medidores, es posible calcular el factor de potencia, que refleja qué tan eficientemente se está utilizando la energía. Al integrarse con los emuladores de carga, los medidores de energía permiten realizar pruebas detalladas en diferentes escenarios de operación, optimizando el rendimiento de los sistemas eléctricos y asegurando que los dispositivos operen dentro de los parámetros deseados. Estos instrumentos son fundamentales para mantener el control y monitoreo continuo, mejorando tanto la seguridad como la eficiencia energética de las instalaciones (de Moura, R. C., Rosa, L. H., Almeida, C. F., Kagan, N., & Dominice, A., 2020).

4.4 Protocolo Modbus

En la actualidad, la comunicación no se limita únicamente a la interacción entre personas, sino que también abarca la conexión entre maquinaria y dispositivos, transformando la manera en que interactuamos con el mundo. En este contexto, el protocolo Modbus ha optimizado la operatividad en fábricas, plantas de energía y sistemas de control. Este protocolo permite la comunicación entre sensores y controladores de distintos niveles de complejidad, facilitando una

transmisión de datos eficiente y precisa. Este protocolo fue desarrollado en 1979 como una extensión del sistema MODICON, utilizado en los primeros controladores lógicos programables (PLCs), Modbus sigue siendo ampliamente empleado en diversas instalaciones industriales. Su versatilidad y fiabilidad lo han convertido en uno de los protocolos de comunicación más utilizados en el ámbito industrial. En este contexto, el protocolo Modbus es un sistema de comunicación de código abierto diseñado para la transmisión de datos en redes en serie entre dispositivos electrónicos. De hecho, es el protocolo más utilizado en la automatización industrial. Su operatividad se basa en una estructura maestro-esclavo, donde un dispositivo maestro, como un PLC, envía órdenes o solicita datos a uno o varios dispositivos esclavos, que pueden incluir sensores, actuadores o controladores. En una red Modbus convencional, un solo maestro puede gestionar hasta 247 dispositivos esclavos (Ferrer Castro, 2024).

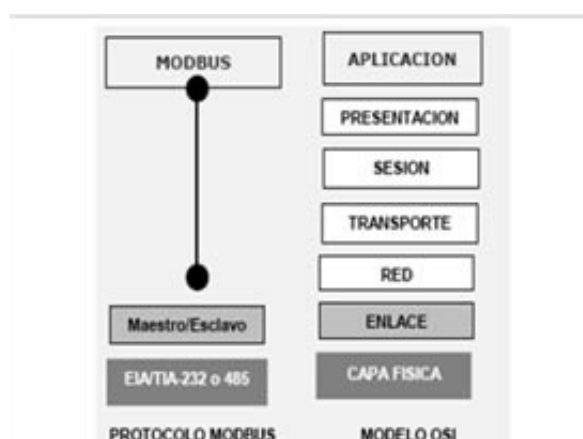


Figura 3. Niveles de protocolo Modbus.

Fuente: Ferrer Castro, A. (2024, 12 de julio).

4.4.1. Modbus RTU. El protocolo Modbus RTU consiste en un bus serial para la transmisión y recepción de datos de control, tomando una arquitectura maestro/esclavo entre dispositivos controladores e instrumentos de campo. Siendo uno de los más antiguos, ha llegado a ser uno de los más utilizados en aplicaciones industriales debido a su funcionalidad y bajo costo en el mercado, en comparación con otros protocolos. Gracias a su diseño de solicitud y respuesta, y con su característica de manejo flexible de datos en una red de comunicación de tipo SCADA entre dispositivos, es otra razón por la que hoy en día sigue teniendo impacto y éxito en las comunicaciones industriales (Flores García et al., s.f.).

4.4.2. RS-485. El estándar RS-485, actualmente denominado EIA/TIA-485, es una interfaz de comunicación que opera en la capa física del modelo OSI, es decir, el nivel encargado de la transmisión de señales. Este protocolo fue desarrollado con el propósito de mejorar las capacidades físicas de la interfaz RS-232. La conexión serie EIA-485 se establece a través de un cableado compuesto por dos o tres hilos: uno para la transmisión de datos, otro con la señal invertida y, en muchos casos, un tercero utilizado como referencia a tierra (0 V). Para este propósito, se emplea un cable de par trenzado con conductores rígidos de calibre 22 o 24 AWG. El objetivo principal de este sistema es transmitir señales mediante dos conductores, donde uno transporta la señal original y el otro su versión invertida. Este método mejora la resistencia a interferencias electromagnéticas en modo común. Además, el cableado utilizado en la transmisión puede ser blindado o no, dependiendo de los requisitos del sistema (Weis, 2021).

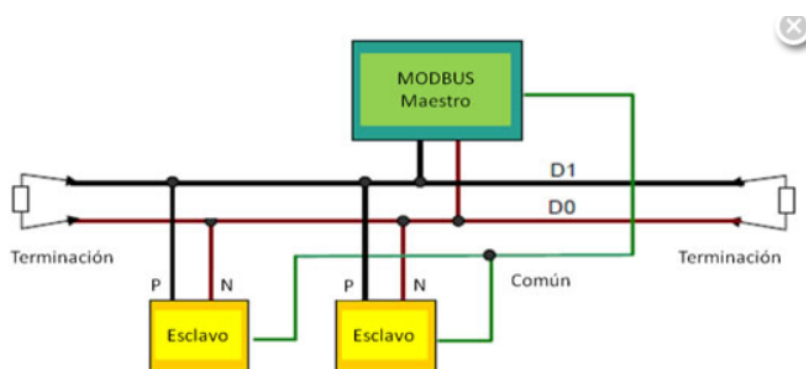


Figura 4. Conexión de los dispositivos en red bajo el estándar RS-485.
Fuente. Weis, O. (2021, 19 de octubre).

4.5 Diferencia entre emulación y simulación

La emulación y la simulación tienen propósitos y características diferentes: la emulación busca replicar fielmente sistemas existentes para asegurar compatibilidad, mientras que la simulación modela el comportamiento de sistemas para su análisis, experimentación y apoyo en decisiones. Conocer estas diferencias permite seleccionar el método adecuado, logrando un desarrollo y análisis de sistemas más efectivos en diversas aplicaciones (Felkl, L, 2023).

La simulación y la emulación son dos enfoques distintos para modelar y probar sistemas, pero se diferencian principalmente en el nivel de fidelidad y la interacción con el entorno real. La

simulación se basa en crear modelos matemáticos o lógicos que imitan el comportamiento de un sistema sin replicarlo completamente, permitiendo estudiar su rendimiento bajo diversas condiciones sin necesidad de hardware físico. Aunque es más económica y flexible, la simulación no permite la interacción real con el entorno físico, lo que puede limitar su precisión en algunos casos. Por otro lado, la emulación busca replicar el sistema real de manera más fiel, tanto en su software como en su hardware, permitiendo que el sistema emulado interactúe físicamente con el entorno, como lo haría el sistema original. Esto la hace más precisa y útil para pruebas reales, pero a un costo más alto y con mayor complejidad en su implementación. En ingeniería eléctrica, los emuladores de carga se utilizan para simular el comportamiento de cargas sin necesidad de dispositivos físicos, mientras que las simulaciones de circuitos permiten estudiar el rendimiento de un sistema sin necesidad de construirlo físicamente. En resumen, la simulación es más flexible y económica, mientras que la emulación ofrece una réplica más realista y precisa, permitiendo una interacción directa con el entorno físico (Serrano, J. J., Fernández-Navajas, J., & Saldaña, J. M., 2013).

4.6 Control remoto de motores eléctricos

Los controladores de motores son dispositivos clave en la automatización industrial que evalúan y gestionan el funcionamiento de motores en diversas maquinarias. Desde simples interruptores de encendido y apagado hasta sistemas complejos que administran múltiples motores y sensores, estos controladores ayudan a mejorar la seguridad y rendimiento. Su función incluye activar o detener motores, ajustar su velocidad, dirección y, en algunos casos, el par. Son fundamentales para evitar fallos graves, como cortocircuitos, en entornos industriales (SDI Industrial, s.f).

En cuanto a los componentes que permiten el control remoto de motores eléctricos, destacan los sistemas de automatización y control basados en tecnologías como PLC (Controlador Lógico Programable), sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y módulos de comunicación inalámbrica. Los PLCs permiten programar secuencias de arranque, paro y control de velocidad de motores, mientras que los sistemas SCADA proporcionan una interfaz de usuario para monitorear y controlar múltiples motores y otros equipos a través de una red centralizada.

Además, las comunicaciones inalámbricas y los protocolos como Modbus, Ethernet/IP, y Wi-Fi permiten que los operadores controlen los motores de manera remota desde estaciones de trabajo, computadoras o incluso dispositivos móviles. El control remoto también es crucial en sistemas de energía renovable, como los sistemas fotovoltaicos o eólicos, donde los motores de las bombas o generadores deben ser gestionados a distancia para optimizar el rendimiento y la eficiencia operativa. A través de estos sistemas, los usuarios pueden ajustar la configuración de los motores en función de las condiciones cambiantes del entorno, como la luz solar o el viento, sin tener que estar físicamente presentes para hacer ajustes. Esto es especialmente útil en instalaciones de difícil acceso o en áreas donde la intervención manual sería costosa o riesgosa (Arias Pacheco, A. C., & Pérez López, L. E., 2017).

Una de las grandes ventajas de implementar control remoto en motores eléctricos es la reducción de costos operativos. Al permitir la automatización de tareas, como el ajuste de la velocidad o la activación según demanda, se puede optimizar el uso de energía y reducir el desgaste de los equipos. Además, el control remoto proporciona la capacidad de realizar mantenimiento predictivo. Los sistemas de monitoreo remoto pueden detectar fallos potenciales o condiciones anormales antes de que ocurran, lo que permite a los técnicos realizar intervenciones preventivas y evitar paradas no planificadas que podrían resultar costosas (Zayas Sierra, G., 2014).

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Este es un proyecto de desarrollo experimental ya que busca la creación y validación de un emulador de hardware para la prueba de analizadores IoT en redes eléctricas. El desarrollo experimental se refiere a la aplicación de conocimientos y principios técnicos ya establecidos para el diseño y construcción de un nuevo sistema. En este caso, el proyecto se enfoca en la creación de un dispositivo físico que permita simular condiciones eléctricas reales, con el fin de evaluar y probar el comportamiento de los analizadores de red en un entorno controlado. Esto implica la implementación de tecnologías existentes de IoT y microcontroladores para la emulación, dentro de un entorno de pruebas que asegure la eficacia y seguridad de los analizadores.

5.2 Método

Para el objetivo específico de implementación de un sistema de control remoto que manipule los parámetros eléctricos de entrada de los microcontroladores Stm32, a través de una plataforma basada en comunicación Modbus emulando el comportamiento de una curva de demanda, se realizarán las siguientes actividades:

Seleccionar los materiales y componentes para la construcción del módulo de emulación de perfiles de carga.

A partir de los diseños previos, y los materiales seleccionados, se ensambla el módulo de emulación del tipo hardware para la realización de pruebas de analizadores IoT.

Determinar los parámetros y/o elementos de salida y entrada para el control automático del módulo de emulación del tipo hardware.

Para el objetivo específico de configuración de una interfaz de usuario que permita la manipulación precisa de los microcontroladores Stm32 y en consecuencia la variación de tensiones y corrientes a través del control de los inversores, emulando diferentes perfiles de carga, se realizarán las siguientes actividades:

Desarrollar el diseño de la interfaz de usuario, integrando los parámetros de control de los microcontroladores.

Para el objetivo específico de realización de pruebas para la validación del funcionamiento del emulador, garantizando que se cumplan los requerimientos operacionales de los analizadores IOT, se realizarán las siguientes actividades:

Definir los casos de prueba y las condiciones simuladas que representen escenarios reales de operación en la red.

Ejecutar pruebas de validación con cada perfil de carga, registrando los datos obtenidos en los analizadores.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1. Fuentes primarias. Las fuentes primarias utilizadas en este proyecto incluyen documentos originales de investigación, informes técnicos especializados y estudios experimentales relacionados con la generación de energía eléctrica y el control de oscilaciones en sistemas de potencia. Estos materiales proporcionan información de primera mano sobre las metodologías, tecnologías y modelos aplicados en el desarrollo de emuladores para pruebas de analizadores IoT en redes eléctricas.

5.3.2. Fuentes secundarias. Para complementar la investigación, se emplearon fuentes secundarias como artículos de revisión académica, publicaciones especializadas en digitalización y monitoreo industrial, y sitios web oficiales de organismos de seguridad industrial. Estas referencias permiten obtener una visión más amplia de las tendencias actuales, estándares normativos y mejores prácticas en la implementación de sistemas de automatización y control en redes eléctricas.

6. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos de la metodología:

Se seleccionaron los materiales acordes al desarrollo del proyecto y estos son: transformadores de corriente 100 A – 5 A ya que en la realización de pruebas se obtuvo una corriente de 80 A, transformadores 115 V – 9 V ya que es la referencia de más baja potencia para obtener la corriente más alta, medidor de energía digital multifuncional trifásico TTAMG que va permitir lectura de voltajes, corrientes y factor de potencia, tarjeta Stm32 núcleo con salidas PWM para la conversión de las señales sinusoidales ,tarjeta Steval-IHM023V3 como módulo de potencia para dar salida trifásica, CPU Bmax para correr la futura aplicación de gestión de datos del módulo, display monitor 10,1” para observar los datos emulados y maleta 34x46cm para el almacenamiento de los diferentes componentes del proyecto.

Se realiza la conexión y ensamble de los componentes dentro de la maleta, adicional, los recortes de acrílicos para la posición del medidor, pantalla y salida de conexiones. En la figura 5, se observa la conexión del módulo desde un toma externo con fase, neutro y tierra que va hacia las entradas G, L y N de las tarjetas Steval, de las salidas A, B y C de las mismas tarjetas van hacia los transformadores conectados entre si en delta y su salida hacia los transformadores de corriente los cuales presentan dos espiras en el bucle, finalmente, desde los tc se lleva conexión a las terminales Ia, Ib e Ic del medidor. Adicional, con la misma fase, neutro y tierra se alimenta el toma para el monitor y el pc.



Figura 5. Conexiones del módulo.

Fuente. Diseño propio (2025).

Para el funcionamiento del emulador de cargas eléctricas, fue necesario definir de manera clara y estructurada los parámetros de entrada y salida que determinan el comportamiento del sistema. El diseño se centró en permitir la representación de distintos perfiles de demanda eléctrica, utilizando curvas típicas de consumo como referencia.

Parámetros de entrada:

Los parámetros de entrada se conforman principalmente por señales de referencia derivadas de curvas de demanda, las cuales representan el comportamiento dinámico del consumo eléctrico en distintos escenarios. Estas curvas fueron adaptadas para generar referencias de corriente y voltaje que alimentan los controladores STM32, los cuales están encargados de producir las señales moduladas por SPWM.

Entre los parámetros principales definidos como entradas se encuentran:

- Corriente deseada por fase (A)
- Voltaje deseado por fase (V)
- Frecuencia de operación (Hz) – Establecida en 60 Hz
- Factor de potencia estimado ($\cos \phi$) – Para definir comportamiento inductivo, resistivo o capacitivo simulado
- Curva de carga base en función del tiempo

Estas entradas pueden ser establecidas manualmente desde el CPU del sistema o cargadas como archivos de datos representativos de perfiles reales.

Elementos de salida:

A partir de los parámetros de entrada, el sistema genera en tiempo real las siguientes salidas físicas:

- Señal de corriente alterna trifásica: generada por el STM32 y aplicada a través de la tarjeta STEVAL hacia la carga emulada.
- Tensión modulada (SPWM) que representa el comportamiento del inversor bajo el perfil de carga deseado.
- Lectura de corriente en la carga (A): medida mediante sensores y transformadores conectados al sistema.
- Datos visualizados en pantalla HDMI: permitiendo monitoreo en tiempo real del comportamiento del sistema.

Además, se integran transformadores de corriente (100 A – 5 A) para adaptar y acondicionar la señal de salida a niveles seguros de medición, permitiendo así validar la generación de hasta 80 A según lo exigido por el perfil de carga simulado.

La correspondencia entre las curvas de demanda suministradas al sistema y las señales generadas permite validar que el emulador replica con precisión los escenarios eléctricos deseados, sirviendo como herramienta de prueba para analizadores de red. La Figura 6 muestra una curva histórica de demanda energética tomada de la plataforma de XM. Esta gráfica representa el comportamiento típico de consumo a lo largo de un día, en un sistema eléctrico colombiano, lo que sirvió de base para definir los perfiles de carga que debía emular el sistema en diferentes horarios. Ahora bien, en la Figura 7 se presenta la curva ajustada a la salida del sistema emulador, la cual se construyó tomando como referencia la curva de demanda real.

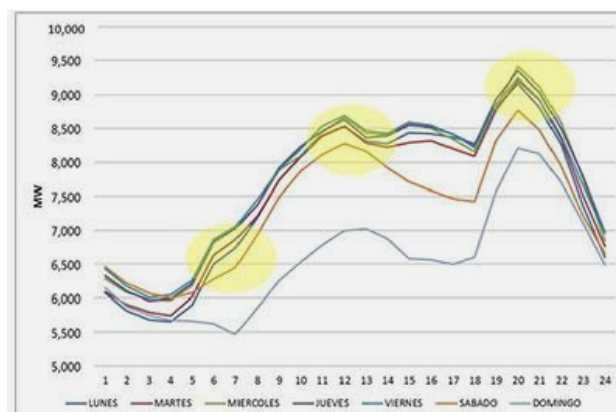


Figura 6. Curva histórica de demanda XM.
Fuente. Xm (2025).



Figura 7. Curva ajustada a la salida.
Fuente. Diseño propio (2025).

Para la supervisión del sistema emulador se incorporó una pantalla de 10,1 pulgadas conectada al CPU del módulo mediante una interfaz HDMI. Esta pantalla cumple la función de interfaz de usuario (HMI básica), permitiendo visualizar en tiempo real las condiciones operativas del sistema, incluyendo parámetros eléctricos como voltajes de fase, corrientes y potencia activa estimada.

El CPU (mini PC Bmax) corre un entorno Windows que permite lanzar aplicaciones de monitoreo, registro de datos y comunicación serial. Durante esta fase del desarrollo, la interfaz se configuró para mostrar los datos directamente desde el puerto de comunicación mediante un terminal de comandos tipo browser serial, lo que permite comprobar el correcto envío y recepción de tramas desde y hacia los microcontroladores STM32.

Aunque no se desarrolló aún un entorno gráfico con botones o visualizaciones dinámicas (como dashboards SCADA o software HMI especializado), se estructuró el sistema de registros y la arquitectura de comunicación que permitirá integrar dichas herramientas en futuras versiones. Esto incluye:

Direccionamiento de registros Modbus para el envío de perfiles de carga y lectura de mediciones.

Compatibilidad con software de supervisión como Modbus, Node-RED o aplicaciones diseñadas en Python/Visual Studio.

Diseño de lógica de control donde el usuario podrá modificar valores de corriente o voltaje de referencia y activar/desactivar perfiles simulados.

De este modo, el sistema ya cuenta con una interfaz funcional de supervisión básica y con los cimientos listos para una interfaz interactiva avanzada, ajustada a requerimientos industriales o académicos. En la Figura 8 se observa la pantalla de 10,1", que actúa como interfaz de usuario básica. Esta interfaz permite verificar que los parámetros generados coincidan con los valores deseados, y ofrece una supervisión continua del comportamiento del emulador.



Figura 8. Pantalla
Fuente. Amazon (2025).

interfaz de usuario.

Con el objetivo de validar el comportamiento del emulador en condiciones similares a las que se presentan en la operación real de una red eléctrica, se definieron una serie de pruebas experimentales centradas en la evaluación de las variables eléctricas generadas por el sistema.

Para simular variaciones progresivas de carga, se utilizó un autotransformador variable (variac) conectado a un solo transformador de corriente (TC) con una relación nominal de 100 A – 5 A. A la salida del variac se conectó un transformador de baja tensión que permitió inducir corriente en el TC, replicando un comportamiento de carga controlada.

Para registrar el comportamiento del sistema, se utilizó un amperímetro conectado en serie con la carga, permitiendo visualizar la corriente inducida a medida que se incrementaba el voltaje de salida del variac. En paralelo, se implementó un método práctico para amplificar la corriente percibida por el TC: se introdujeron espiras adicionales en el núcleo del TC, simulando un aumento progresivo de corriente secundaria sin necesidad de una carga real.

Este método es ampliamente utilizado en laboratorios cuando se requiere inducir altas corrientes de manera controlada y segura. Con una espira, el sistema alcanzó aproximadamente 20 A, con dos espiras se obtuvo 40 A, y al realizar un doble bucle (cuatro pasadas del conductor por el núcleo del TC), se logró inducir una corriente cercana a 80 A, lo que confirma la capacidad del emulador para reproducir condiciones exigentes de carga sin necesidad de una carga física conectada al sistema.

Cabe resaltar que estas pruebas se realizaron manteniendo los componentes dentro de sus límites operativos, y los resultados evidencian la eficacia del sistema para generar respuestas dinámicas y controladas de corriente bajo distintos escenarios.

En la Tabla 1, se observa la lectura por fase obtenida durante una de las pruebas, junto con la potencia total generada por el sistema. Los datos reflejan la estabilidad del sistema y la capacidad del emulador para responder a las referencias impuestas.

Tabla 1.

Pruebas de validación

# espiras en el secundario	Amperios	Potencia por fase
1	20 A	4,4 kVA
2	40 A	8,8 kVA
2 bucles al tc	80 A	17,6 kVA

Fuente. Diseño propio

Con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento interno del sistema emulador de cargas eléctricas, se diseñó un esquemático general que representa de forma estructurada la conexión entre todos los componentes principales del prototipo. Este diagrama es clave para visualizar cómo se interrelacionan los distintos módulos dentro de la arquitectura, desde la generación de señales hasta la visualización y medición de las variables eléctricas.

En el esquema se identifican los siguientes bloques fundamentales:

CPU o unidad central de procesamiento (mini PC Bmax): Es el núcleo del sistema que permite la ejecución de aplicaciones de monitoreo, comunicación y supervisión. Desde aquí se gestionan las referencias de entrada, el envío de tramas Modbus y la interfaz con el usuario a través de la pantalla HDMI.

Pantalla de monitoreo HDMI: Actúa como interfaz de usuario básica, permitiendo la visualización en tiempo real de parámetros eléctricos generados por el sistema. Su conexión directa con el CPU facilita el despliegue de datos.

Microcontroladores STM32: Dos unidades independientes encargadas de generar señales SPWM. Uno de ellos se dedica a la modulación de voltajes de fase, y el otro al control de la corriente.

Tarjetas STEVAL-IHM023V3: Funcionan como módulos de potencia trifásica. Reciben las señales SPWM desde los STM32 y las amplifican para emular cargas reales a través de los transformadores de salida.

Transformadores de baja tensión (115 V – 9 V): Conectados en las salidas de las tarjetas STEVAL, permiten adecuar los niveles de tensión antes de alimentar los transformadores de corriente. Su configuración en delta facilita la entrega equilibrada de corriente hacia las fases simuladas.

Transformadores de corriente (TC 100 A – 5 A): Permiten transformar la corriente generada a niveles medibles por el medidor multifuncional. La inserción de espiras adicionales en el núcleo de estos transformadores fue una estrategia utilizada en pruebas para amplificar la corriente sin carga real conectada.

Medidor trifásico TTAMG: Dispositivo encargado de registrar los parámetros eléctricos generados por el sistema, incluyendo corriente, tensión, factor de potencia y potencia por fase. Este medidor actúa como validación de las señales emitidas por el emulador.

Tomas de alimentación (monitor y CPU): Se incluye en el esquema la conexión de los suministros de energía para el monitor y el CPU, alimentados desde la misma red de entrada del sistema, lo cual facilita su operación en campo sin fuentes externas adicionales.

Este esquema representa la interconexión lógica y física de todos los componentes, y sirve como base documental para futuras expansiones, mantenimiento del sistema o integración con nuevas plataformas. El esquema eléctrico presentado en la Figura 9 muestra de manera estructurada la interconexión entre los distintos módulos del sistema emulador. Se destacan dos microcontroladores STM32 (MCU), cada uno conectado a una tarjeta STEVAL encargada de amplificar la señal modulada para emular cargas eléctricas. A la izquierda, se visualiza el punto de entrada de los valores de referencia a través de un convertidor RS-485/USB, desde donde se comunican las instrucciones de corriente o voltaje a los microcontroladores.

Cada STM32 genera señales SPWM que son transmitidas a sus respectivas tarjetas de potencia (A, B, C) y desde allí se conectan hacia transformadores conectados en delta para simular las salidas de carga. En el lado derecho del esquema se encuentran los elementos de salida: conexiones de fase (F, N, G), así como tomas de corriente para el monitor y el CPU del sistema.

Este diagrama ilustra con claridad cómo se interrelacionan los componentes de control, potencia y supervisión. La organización jerárquica del diseño y la identificación de cada bloque hacen de este esquema una herramienta valiosa para una futura expansión o integración del sistema con futuras plataformas de medición.

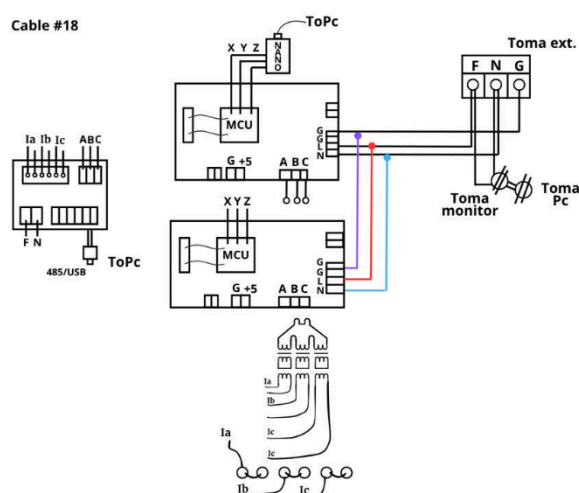


Figura 9. Esquema eléctrico general del emulador.

Fuente. Diseño propio (2025).

El prototipo desarrollado alcanza un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) 4, correspondiente a la etapa de validación en laboratorio de componentes integrados. Esto indica que el sistema ha sido probado en condiciones controladas y ha demostrado funcionar según lo esperado, aunque aún requiere la implementación de una interfaz completa de usuario y validación extensiva con dispositivos IoT reales para alcanzar niveles superiores de integración y preparación para su uso en campo.

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de validación demuestran un comportamiento estable y controlado por parte del emulador ante las condiciones eléctricas impuestas. Las señales de corriente generadas a través de los microcontroladores STM32, moduladas mediante SPWM y amplificadas por las tarjetas STEVAL, se mantuvieron dentro de los rangos establecidos, evidenciando un alto grado de precisión respecto a los perfiles de carga programados, validando la efectividad del sistema en la generación de señales senoidales mediante el control de los IGBT integrados en los módulos de potencia.

Durante las pruebas, se logró replicar corrientes de hasta 80 amperios mediante el uso de transformadores de corriente y técnicas de realimentación física (uso de espiras adicionales), sin necesidad de conectar una carga real.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que el prototipo cumple con los criterios de funcionalidad definidos y puede considerarse como una plataforma sólida para el desarrollo de ensayos técnicos, prácticas de laboratorio y proyectos de validación de equipos eléctricos en micro redes inteligentes. Finalmente, en la Figura 10 se presenta el diseño físico final del emulador de carga, ensamblado dentro de una maleta de transporte rígida tipo industrial. Esta disposición está pensada para facilitar tanto el uso en laboratorio como el traslado y operación en campo. En la parte superior se encuentra instalada una pantalla HDMI de 10,1 pulgadas, fijada con soportes ajustables. Debajo de la pantalla se ubica el medidor trifásico TTAMG, el cual recibe las señales desde los transformadores de corriente y permite visualizar en tiempo real los valores de voltaje, corriente y potencia por fase. También, se incluyen tomas de alimentación AC y salidas tipo banana para conexión externa, todos montados en una base de acrílico. El cableado interno se encuentra ordenado mediante abrazaderas plásticas, lo que mejora la estética, y facilita la modificación del prototipo. Este diseño modular y estructurado permite al usuario acceder fácilmente a cada componente y realizar pruebas específicas sin necesidad de desmontar el sistema completo, reforzando su valor como herramienta educativa y de ensayo técnico.



Figura 10. Diseño emulador final.

Fuente. Diseño propio (2025).

7. Conclusiones

Se logró implementar un sistema funcional capaz de emular cargas tipo RLC mediante el uso de microcontroladores STM32, logrando una separación clara de tareas entre el control de voltaje y el de corriente. Además, la técnica de modulación SPWM permitió una generación precisa de señales sinusoidales a 60 Hz, lo cual es fundamental para la correcta representación de condiciones reales en micro redes. A su vez, el uso de la tarjeta STEVAL como interfaz de potencia demostró ser eficiente para transferir la señal de control al entorno físico, mostrando buena estabilidad y respuesta ante variaciones de parámetros.

Se logró establecer una estructura funcional para la visualización y supervisión del sistema mediante una pantalla HDMI conectada al CPU. Esta interfaz permitió verificar el comportamiento del emulador en tiempo real, evidenciando la generación controlada de señales de corriente y voltaje según parámetros definidos. La arquitectura del sistema, basada en microcontroladores STM32, quedó preparada para integrar a futuro una interfaz de control remota. De este modo, se sientan las bases para una emulación precisa y programable de distintos perfiles de carga, alineando el diseño con los requerimientos de aplicaciones industriales e investigativas.

Se llevaron a cabo pruebas funcionales del emulador mediante la generación de señales de corriente moduladas utilizando transformadores y variacs, alcanzando valores de hasta 80 A con una frecuencia estable de 60 Hz. Estas pruebas permitieron verificar la capacidad del sistema para reproducir condiciones eléctricas reales y dinámicas, alineadas con las exigencias típicas de entornos industriales. Los resultados obtenidos confirman que el emulador posee el desempeño técnico necesario para ser utilizado como plataforma de prueba en sistemas de medición inteligente, cumpliendo con los requerimientos operacionales esperados.

8. Recomendaciones

Se recomienda integrar un sistema de supervisión y adquisición de datos (DAQ) para monitorear en tiempo real las variables eléctricas, lo que facilitaría el análisis de resultados y el desarrollo de algoritmos de control avanzados.

Se sugiere crear una aplicación con incorporación de comunicación inalámbrica entre los módulos de control para facilitar el escalado del sistema y su integración en entornos de prueba más complejos.

Se sugiere realizar ensayos con distintas configuraciones de carga y comparar el desempeño del emulador frente a cargas físicas reales, con el fin de validar aún más su comportamiento.

A futuro, podría considerarse este proyecto como modelo para realizar análisis de calidad de energía, incluyendo sistemas mas robustos y analizadores mas avanzados.

9. Referencias bibliográficas

Arias Pacheco, A. C., & Pérez López, L. E. (2017). *Desarrollo de una interfaz para control remoto de motores usando un dispositivo embebido* (Bachelor's thesis, Espol).

Changoluisa, D., Jácome, G., Tasiguano, C., & Pozo, M. (2017). *Emulación de cargas en sistemas industriales por medio del control de accionamientos eléctricos*. En XXVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela Politécnica Nacional (EPN). Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23908/1/2017AJIEE-12.pdf>

Ferrer Castro, A. (2024, 12 de julio). *Protocolo Modbus: qué es, tipos y cómo funciona*. Cuerva Energía. Recuperado de <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/construccion-e-instalacion/protocolo-modbus/>

Felkl, L. (2023, octubre 24). *Emulación y simulación en SCM*. SCDA. Recuperado de <https://www.supplychaindataanalytics.com/es/emulacion-y-simulacion-en-scm/>

Flores García, E., Quezada Quezada, J. C., Solís Galindo, A. E., Calderón Medina, H., & Mendoza-Jiménez, E. (s.f.). *Implementación de protocolo MODBUS RTU en la comunicación de un PAC y un variador de velocidad para el control automático de motores eléctricos*. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 5(9). Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tizayuca/n5/p7.html>

Fortinet. (s.f.). *¿Qué es la tecnología operativa (TO)?* Recuperado de <https://www.fortinet.com/industries/what-is-ot-security>

HDMI Licensing Administrator, Inc. (s.f.). *HDMI Specification Overview*. Recuperado de <https://www.hdmi.org/>

Lasseter, R. H. (2011). *Smart distribution: Coupled microgrids*. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 1074-1082.

Modbus Organization. (s.f.). *Modbus Protocol Specification*. Recuperado de <https://modbus.org/>

Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications* (4th ed.). Pearson Education.

Riverdi. (s.f.). *¿Por qué STM32? Introducción a Riverdi STM32 Embedded Displays*. Recuperado de <https://riverdi.com/es/blog/por-que-stm32-introduccion-a-riverdi-stm32-embedded-displays>

Santos Vidal, M. D. (2010). *Estudio comparativo de sistemas de virtualización de ordenadores, por software, de distribución libre, para desarrollar una infraestructura de servidores virtuales en la EIS-ESPOCH* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Riobamba, Ecuador.

SDI Industrial. (s.f.). *Control de motores: ¿Qué es, sus beneficios y funciones?* Recuperado de <https://sdindustrial.com.mx/blog/control-de-motores-que-es/>

Serrano, J. J., Fernández-Navajas, J., & Saldaña, J. M. (2013). *Aplicación al Ámbito Académico de un entorno de Simulación/Emulación de Arquitecturas de Red*. En *XI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2013): Libro de ponencias* (p. 577). Universidad de Granada.

STMicroelectronics. (2014, abril). *UM1724: User manual – STM32 Nucleo boards*.

Tautz-Weinert, J., & Watson, S. J. (2017). *Using SCADA data for wind turbine condition monitoring - A review*. En *IET Renewable Power Generation (Vol. 11, Issue 4, pp. 382–394)*. Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0248>

Thomas, M. S., & McDonald, J. D. (2017). *Power system SCADA and smart grids*. CRC Press.

Universidad Europea. (2024, 6 de mayo). *¿Qué es y cómo funciona un microcontrolador?* Recuperado de <https://universidadeuropea.com/blog/que-es-microcontrolador/>

Universidad Nacional de La Plata. (s.f.). *Medición de corriente, voltaje y factor de potencia*. Recuperado de <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/51/27751/5c5a8f71c013ea9277e46bcf4b1658b2.pdf>

Wang, J., Yang, L., Ma, Y., Wang, J., Tolbert, L. M., Wang, F., & Tomsovic, K. (2015). *Static and dynamic power system load emulation in a converter-based reconfigurable power grid emulator*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4), 3239–3251.

Weis, O. (2021, 19 de octubre). *Guía de comunicación RS-485: conceptos básicos y aplicación*. Eltima Software. Recuperado de <https://www.eltima.com/es/article/rs485-communication-guide/>

Zayas Sierra, G. (2014). *Desarrollo de una aplicación software para laboratorios remotos: control remoto de un motor*.

XM S.A. E.S.P. (2025). Históricos de demanda. <https://www.xm.com.co/consumo/historicos-de-demanda>

Amazon. (s.f.). *Monitor pequeño de 10.1 pulgadas HDMI para Raspberry Pi*. <https://www.amazon.com/-/es/dp/B0DP28KHNK>

