

Laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos y emular microrredes

Flexible laboratory for testing electrical devices and emulating microgrids

PhD. Andrés Julián Saavedra Montes¹, Ing. Christian Hernández Lenis¹
PhD. Carlos Andrés Ramos Paja¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Medellín, Antioquia, Colombia.

Correspondencia: ajsaaved@unal.edu.co

Recibido: 01 julio 2024. **Revisado:** 26 noviembre 2024. **Aceptado:** 16 diciembre 2024. **Publicado:** 01 enero 2025.

Cómo citar: A. J. Saavedra Montes, C. Hernández Lenis, y C. A. Ramos Paja, «Laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos y emular microrredes», RCTA, vol. 1, n.º 45, pp. 216–224, ene.2025.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3477>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: El análisis del comportamiento eléctrico de microrredes que incluyan fuentes renovables, dispositivos de almacenamiento, cargas no lineales y componentes tradicionales, es de suma importancia para investigar y formar nuevos profesionales en sistemas de energía. Este artículo presenta el diseño e implementación de un laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos modernos y emular microrredes reales. El diseño del laboratorio comienza con el diseño de varios dispositivos, seguido de la estructuración e implementación de un bus para conectar los dispositivos. La integración incluye interruptores, contactores, barras de cobre, conexión a tierra, PLC y conectores de seguridad. El laboratorio flexible se valida experimentalmente probando un convertidor monofásico, cargando y descargando tres baterías VRLA, replicando un perfil de descarga y emulando una microrred real instalada en Isla Fuerte, Colombia. Los resultados se utilizan para evaluar la operación de los dispositivos y para analizar el comportamiento de una microrred, demostrando la utilidad del laboratorio en educación e investigación.

Palabras clave: convertidores de potencia, dispositivos de almacenamiento, emulación de microrredes, fuentes renovables, investigación y educación, laboratorio de potencia.

Abstract: The analysis of the electrical behavior of microgrids including renewable sources, storage devices, nonlinear loads, and traditional components, is of paramount importance for researching and educating new professionals in energy systems. This paper presents the design and implementation of a flexible laboratory for testing modern electrical devices and emulating real microgrids. The laboratory design begins with the selection of several devices, followed by the structuring and implementation of a bus to connect the devices. The bus includes circuit breakers, contactors, copper bars, a ground connection, PLCs, and safety terminals. The flexible laboratory is experimentally validated by testing a single-phase converter, charging, and discharging three VRLA batteries, replicating a discharge profile and emulating a real microgrid installed on Isla Fuerte, Colombia. The results are used to evaluate the operation of the devices and to analyze the behavior of a real microgrid, demonstrating the usefulness of the laboratory in education and research.

Keywords: microgrids emulation, power converters, power laboratory, renewable sources, research and education, storage devices.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de energía tradicionales se han convertido en sistemas de energía modernos debido a la integración de nuevas fuentes, dispositivos de almacenamiento, electrónica de potencia y tecnologías de la información y la comunicación. Estos sistemas requieren de los mejores escenarios para realizar investigaciones y formar a los nuevos profesionales que requiere la industria. Por estas razones, se requiere el desarrollo de laboratorios que emulen los sistemas modernos de energía y permitan probar convertidores, baterías, etc.

Las microrredes son sistemas modernos de energía que se adoptan en todo el mundo y, en consecuencia, varios investigadores han diseñado e implementado laboratorios de microrredes para estudiar su comportamiento [1], [2], [3], [4], [5]. En [1] se presenta un laboratorio educativo de microrredes, los autores se centran en la integración de la infraestructura eléctrica y de comunicaciones, demostrando la utilidad de los laboratorios de microrredes para enseñar conceptos modernos a los estudiantes de ingeniería eléctrica. Por otro lado, se presenta un emulador de generador diésel para enseñar análisis de frecuencia en una microrred a escala de laboratorio, los autores de [2] emulan el generador diésel mediante un inversor equipado con bucles de control de voltaje y corriente. El trabajo presentado en [2] es un ejemplo de cómo implementar generadores en microrredes de CA o CA/CC.

En [3], los autores diseñan, modelan, implementan y operan una microrred con fuentes de energía renovables y el enfoque de la microrred a escala de laboratorio es enseñar el flujo de energía de las energías renovables. Otro ejemplo de un laboratorio de microrredes con fines educativos y de investigación se presenta en [4]. Los autores destacan las ventajas de los laboratorios de microrredes para estudiar y comprender el comportamiento de las microrredes antes de implementarlas en proyectos definitivos. Además, el trabajo enfatiza el uso de emuladores que permiten implementar diferentes fuentes de energía renovable en un laboratorio, pero también el uso de dispositivos comerciales, como inversores, para obtener una idea del comportamiento real.

En [5], los autores utilizan el concepto de hardware-in-the-loop para implementar un sistema de energía moderno y enseñar a los estudiantes. En ese caso, la educación experimental se utiliza como estrategia para enseñar sobre los sistemas de energía modernos. Los últimos trabajos ilustran la importancia de implementar microrredes a escala de laboratorio para enseñar e investigar sobre los sistemas eléctricos modernos.

Un concepto importante en los sistemas eléctricos modernos es su capacidad de almacenamiento; Por lo tanto, un sistema a escala de laboratorio que permita enseñar y probar dispositivos de almacenamiento es de suma importancia. Las baterías VRLA se utilizan ampliamente como sistemas de almacenamiento en múltiples aplicaciones; por lo tanto, algunos autores han centrado su investigación en el modelado y prueba de baterías VRLA [6], [7]. Una forma de evaluar el rendimiento de la batería VRLA y enseñar sobre esos dispositivos es construir un modelo de simulación con varios objetivos [6]. Sin embargo, construir el modelo de simulación requiere experimentos para comprender el comportamiento real de las baterías y estimar los parámetros del modelo.

Por otro lado, los experimentos son necesarios cuando una batería VRLA se somete a condiciones de operación específicas, por ejemplo, métodos de carga rápida [7]. Los autores de [7] presentaron un método de carga rápida de baterías VRLA porque la carga rápida es requerida por varias aplicaciones. Los resultados mostraron que el método de carga rápida es beneficioso para el ciclo de vida de las baterías VRLA. Los últimos trabajos muestran que es necesario un laboratorio flexible con la capacidad de realizar experimentos y validar modelos detallados de dispositivos eléctricos como celdas y conjuntos de baterías.

El objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño e implementación de un laboratorio flexible de sistemas de energía para la enseñanza y la investigación. Se pueden lograr varias topologías para emular aplicaciones del mundo real como un banco de pruebas para operar convertidores de potencia, un banco de pruebas para cargar y descargar baterías y microrredes. La integración

exitosa de varios dispositivos implica conocer sus características eléctricas y su funcionamiento; por lo tanto, se deben adquirir conocimientos sobre comportamiento eléctrico, software de gestión, protocolos de comunicación y seguridad. La principal ventaja de esta plataforma es que los investigadores y estudiantes de sistemas de energía pueden analizar diferentes sistemas a partir de sus características reales.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: El diseño del laboratorio flexible se presenta en la Sección II, que incluye la descripción de todos los dispositivos y elementos, y el cálculo de las resistencias de las barras principales. La Sección III presenta tres aplicaciones diferentes del laboratorio flexible: probar un convertidor de potencia de puente completo en vacío y con carga, aplicar un perfil de descarga de baterías y emular una microrred del mundo real. Finalmente, la Sección IV presenta las conclusiones del trabajo.

2. ESTRUCTURA Y ELEMENTOS PRINCIPALES DEL LABORATORIO

2.1. Selección de los elementos para el laboratorio flexible

El laboratorio fue diseñado considerando la interoperabilidad de componentes bajo múltiples condiciones, como por ejemplo las pruebas de operación de equipos y la emulación de sistemas eléctricos. Para llevar a cabo los experimentos se implementó un barraje de doce circuitos monofásicos, el cual permite la conexión de fuentes o cargas, cada circuito cuenta con conectores banana de 4mm en sus terminales. El control para conectar y desconectar las fuentes o cargas al barraje se centralizó en un gabinete principal con un selector de tres posiciones asociado a cada circuito: Automático, Apagado y Manual. Además, dentro de la tarjeta se instalaron cuatro PLCs que pueden conectar o desconectar las fuentes o cargas de forma remota cuando el selector se encuentra en la posición Automático. Además, en el gabinete se colocaron los contactores y protecciones de 32A asociados a cada circuito.

Se adquirieron fuentes de poder DC para operar en un amplio rango de voltajes y corrientes. Un emulador de panel solar con rango de operación hasta 600V 8.5A, dos fuentes de poder una de 20V 10A y otra de 30V y 5A. Por otro lado, se utilizaron nueve paneles solares de 65W cada uno, con conectores banana de 4mm por panel que permiten

realizar arreglos en serie o paralelo según se requiera. Asimismo, se seleccionó un sistema de almacenamiento compuesto por seis baterías VRLA de 12V y 35Ah.

En cuanto a las cargas eléctricas, se seleccionaron los siguientes componentes: Una carga electrónica DC programable de 600W, dos reóstatos de 47 Ω , 5A y 1000W cada uno, un reflector LED de 100W y tres lámparas con dos tubos LED T8 de 29W cada una. Para el uso de las lámparas de laboratorio como cargas eléctricas durante los experimentos, se instaló un tablero bypass, el cual selecciona la fuente de energía, ya sea de la red eléctrica del edificio o de alguna de las fuentes del laboratorio.

Para la conversión y gestión de energía, se adquirió el siguiente equipo: Un módulo de potencia Full Bridge de 2.4kVA que puede operar como inversor, convertidor Buck/Boost o rectificador. Un inversor trifásico dual de 5.5 kW con sensores y controladores integrados. Un kit para la gestión de la energía desde y hacia las baterías, compuesto por un inversor/cargador de 5,5kVA. Un inversor de onda senoidal pura de 1.5 kVA, 120V o 220V. Para la gestión de la energía entregada por los paneles solares se adquirió un controlador solar con capacidad de 48V y 45A, que opera con un dispositivo de protección por falla a tierra.

Los equipos seleccionados para la medición y registro de variables en el laboratorio son: un medidor de potencia digital con rango de medición en DC y AC de hasta 600V y 30A, valores expandibles hasta 1200V y 60A mediante un kit de sensado de alto voltaje y un transformador de corriente de ultra-alta precisión respectivamente, dos multímetros, un termómetro infrarrojo con rango de -40°C a 550°C y un osciloscopio.

Se eligió un microcontrolador para gestionar las señales de los sensores y generar las señales de control como las señales PWM para accionar el módulo de potencia tipo puente completo. Por otro lado, se diseñó un filtro LC para la eliminación de señales de alta frecuencia compuesto por un inductor toroidal de 950uH y un capacitor de 11uF construido a partir de cinco capacitores de poliéster de 2.2uF, este filtro se ubica en los terminales de salida del módulo de potencia tipo puente completo para la operación del inversor. En cuanto al equipo de cómputo se seleccionaron y utilizaron dos estaciones de trabajo. En la Fig. 1 se muestran los principales componentes del laboratorio flexible.

2.2. Estimación de las resistencias eléctricas de los circuitos conectados al barraje principal

Se utilizó el método voltímetro-amperímetro (caída de potencial) [8] para estimar la resistencia eléctrica de cada circuito conectado al bus principal. Se cortocircuitaron dos terminales del circuito utilizando un cable 14 AWG, luego se utilizó una fuente de poder con una corriente de salida limitada a 10A y voltaje a 2V. Se registraron los datos de voltaje y corriente entregados por la fuente de poder, además de la temperatura en sus terminales utilizando un termómetro infrarrojo.

La Fig. 2 muestra el esquema para estimar la resistencia eléctrica del circuito 7. Al final de las pruebas, se calculó la resistencia total del circuito en operación considerando los valores de voltaje y corriente después de 60 minutos. El mismo método se aplicó para estimar la resistencia de los cables de la fuente y del cortocircuito. Luego, se calculó la resistencia eléctrica del circuito 7 y se dividió por la longitud del cable obteniendo la resistencia por unidad de longitud 8.114 mΩ/m. Con este valor se calculó la resistencia eléctrica de todos los circuitos del bus principal, la Tabla I presenta la resistencia eléctrica de cada circuito en el bus principal.

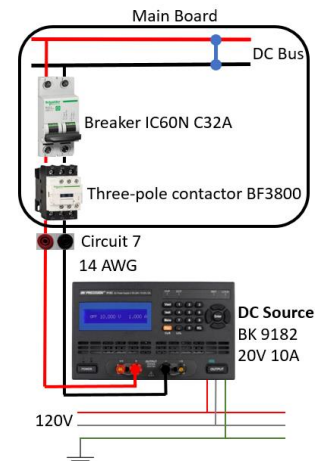


Fig. 2. Ensayo voltímetro-amperímetro (Caída de potencial).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1: Resistencia eléctrica de cada circuito en el conductor principal

Circuito	mΩ	Circuito	mΩ
1	67.325	7	51.719
2	64.793	8	54.378
3	62.216	9	66.223
4	56.134	10	69.776
5	54.051	11	76.311
6	51.719	12	80.028

Fuente: elaboración propia.

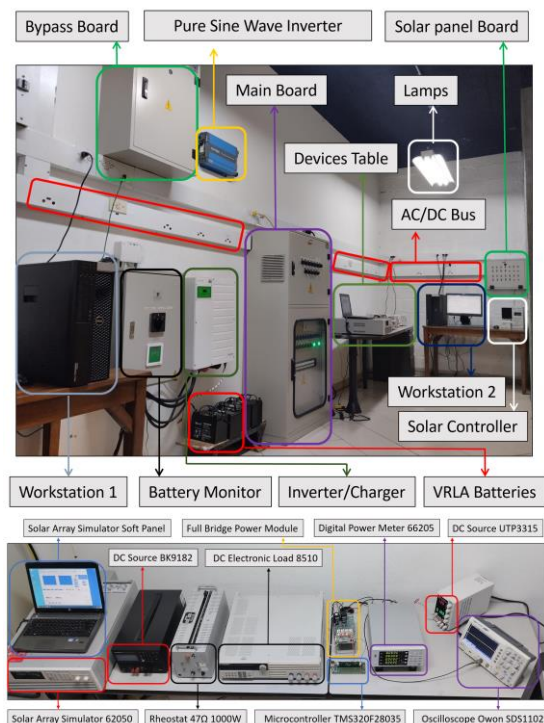


Fig. 1. Laboratorio Flexible con múltiples componentes.
Fuente: elaboración propia.

3. APLICACIONES DE EL LABORATORIO FLEXIBLE

Tres aplicaciones diferentes del laboratorio flexible son presentadas en esta sección: ensayo de un convertidor de potencia de puente completo en vacío y en plena carga, descarga de baterías tras la aplicación de un perfil común y la emulación de una microrred real.

3.1. Pruebas experimentales de un convertidor de potencia comercial de puente completo

Se adquirió por el laboratorio un módulo de potencia de puente completo SPM-FB. El convertidor consta de cuatro semiconductores que deben operar secuencialmente en pares UH, VL y VH, UL. Para ello, un driver GDC 7A4S1 gestiona las señales PWM recibidas desde un controlador, ya sea gestionando cuatro señales PWM, una por cada semiconductor o direccionando solo dos señales recibidas, una señal PWM y una señal PWM invertida. Se seleccionó el segundo método para operar el convertidor. Para ingresar las señales PWM al driver se utilizó el microcontrolador TMS320F28035 programado desde MATLAB. Se instaló el *Embedded Coder Support Package* para

Texas Instruments, que permite el uso de bloques especializados en Simulink. Para probar el convertidor de potencia de puente completo se realizaron dos experimentos, uno en operación sin carga donde se varió la frecuencia y el ciclo de trabajo. Y el otro en funcionamiento con carga, donde se replicó y comparó la curva de potencia-frecuencia proporcionada por el fabricante.

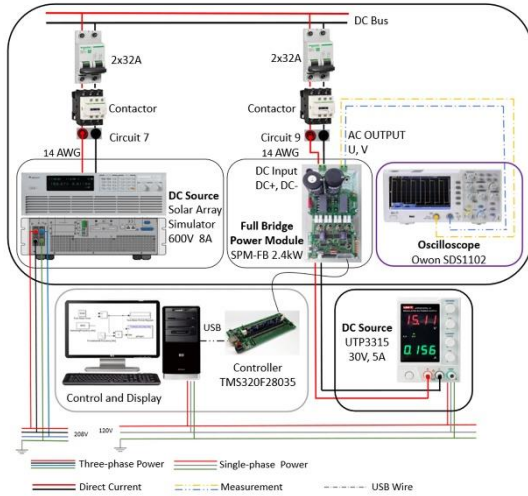


Fig. 3. Setup experimental para probar el convertidor en la operación en vacío. **Fuente:** elaboración propia.

En el primer experimento, se utilizó el simulador de paneles solares como fuente a 50 V DC y se observó la salida del puente con el osciloscopio. La Fig 3 muestra la configuración implementada en el laboratorio utilizando el bus principal, dos fuentes DC, el convertidor de puente completo, el microcontrolador y el osciloscopio. El ciclo de trabajo constante se estableció en 50% y se observó el comportamiento del voltaje de salida del convertidor en los terminales UV. Se programaron cuatro frecuencias de conmutación diferentes desde Simulink; 2, 20, 100 y 180 kHz, ver Fig. 4. Aquí solo se presenta la variación de la frecuencia para favorecer la brevedad. En el segundo experimento, donde se replica y compara la curva de frecuencia-potencia del fabricante, fue necesario calcular un filtro LC para obtener el voltaje terminal como una forma de onda sinusoidal. Además, se agregó una carga resistiva a la configuración experimental para cargar el convertidor de potencia. El filtro se calculó para un voltaje de salida $V_{DC} = 205$ V, una corriente de salida $I_{DC} = 9$ A y una frecuencia de conmutación $f_s = 20$ kHz. El inductor se diseñó siguiendo (1) y limitando la ondulación de corriente del inductor al 20 %:

$$L = \frac{V_{DC}(rms)}{4 \cdot I_L \cdot f_s} = \frac{205}{4 \cdot 1.8 \cdot 20 \times 10^3} = 1.4 \text{ mH} \quad (1)$$

La frecuencia de corte se diseñó para que fuera una década menor que la frecuencia de conmutación $f_c \leq f_s / 10$, $f_c \leq 2$ kHz. Se seleccionó 1.2 kHz como frecuencia de corte. Luego, se estimó el capacitor para garantizar la frecuencia de corte siguiendo (2):

$$C = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.2 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{1.4 \times 10^{-3}} = 12.356 \mu F \quad (2)$$

Se obtuvo un capacitor de 12.356 μF . Con los datos teóricos del inductor igual a 1.4 mH y el capacitor de 12.356 μF , se obtuvieron los elementos prácticos. Se conectaron en paralelo cinco capacitores comerciales de poliéster de 2.2 μF para obtener un capacitor de 11 μF , y el inductor se construyó utilizando un núcleo amarillo toroidal T-157 y un cable AWG 16, obteniendo un inductor de 0.956 mH. La Fig. 5 muestra el montaje experimental que incluye el filtro LC y la carga eléctrica que está compuesta por resistencias variables. La Fig. 6 muestra el voltaje de salida del convertidor una vez conectado el filtro. Se obtuvo un voltaje sinusoidal y se aplicó a la carga. Cuando se agrega un filtro LC a la salida del convertidor y se programa la señal PWM para producir una frecuencia fundamental de 60 Hz, el módulo de potencia de puente completo SPM-FB actúa como un inversor de forma de onda sinusoidal pura; por lo tanto, las cargas se alimentan desde una fuente de voltaje libre de armónicos.

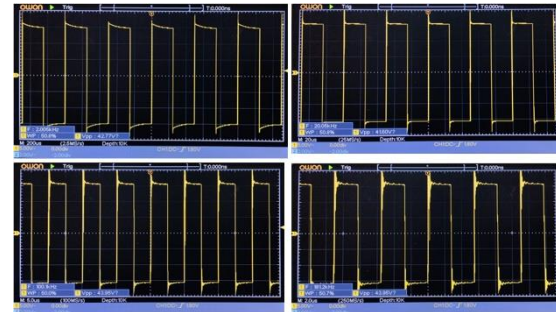


Fig. 4. Voltaje de salida del convertidor en vacío durante la variación de frecuencia. **Fuente:** elaboración propia.

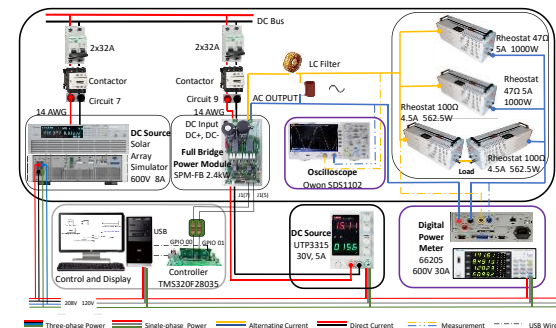


Fig. 5. Setup experimental para probar el convertidor de potencia en la operación con carga. **Fuente:** elaboración propia.

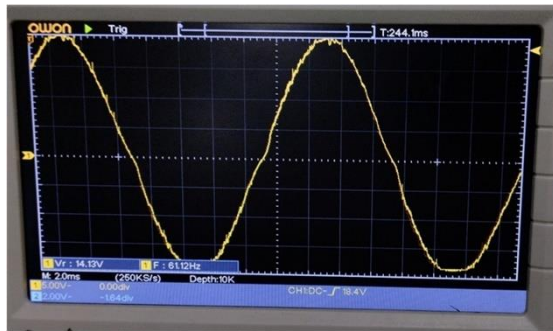


Fig. 6. Voltaje de salida del módulo de potencia tipo Puente completo SPM-FB operando como un inversor. **Fuente:** elaboración propia.

Utilizando el montaje experimental de la Fig. 5, se cargó el convertidor y se varió la frecuencia de conmutación de 20 kHz a 140 kHz. La Fig. 7 muestra el comportamiento temporal de la potencia activa durante el experimento. La potencia se reduce críticamente cuando se aumenta la frecuencia de conmutación; sin embargo, el convertidor funciona correctamente durante todo el rango. Además, la comparación de la potencia aparente muestra una correspondencia de los resultados obtenidos por el fabricante y los resultados obtenidos en el laboratorio flexible. Con los dos últimos experimentos, se probó el convertidor de potencia de puente completo.

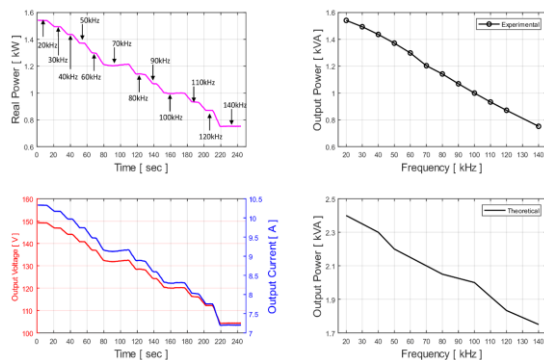


Fig. 7. Potencia vs frecuencia de conmutación durante la operación con carga del módulo de potencia puente completo. **Fuente:** elaboración propia.

3.2 Pruebas experimentales de baterías: Descarga de baterías VRLA frente a un perfil común

La segunda aplicación del laboratorio de potencia flexible consiste en cargar y descargar baterías VRLA para probar su funcionamiento. Se probaron tres baterías VRLA de 12 V y 35 Ah. De fábrica, cuando el voltaje de una batería alcanza los 10 V, esa batería está descargada, y si una batería está bajo descarga profunda, < 9.5 V, su vida útil se reducirá. Primero, las baterías se inspeccionaron visualmente

para reconocer su integridad; luego, las baterías se cargaron y descargaron verificando el comportamiento de las variables de la batería; voltaje, corriente y potencia. Debido a que estas curvas son casi estándar, no se presentan aquí por razones de brevedad. En contraste, se implementó un perfil bien conocido para descargar las baterías y analizar su comportamiento [9]. La Fig. 8 muestra la configuración experimental implementada para aplicar el perfil de referencia y probar las baterías VRLA. La configuración está compuesta por una carga electrónica de DC para extraer la corriente, el medidor de potencia digital para registrar y almacenar las variables y la batería bajo prueba.

La Tabla 2 presenta el perfil de descarga programado en la carga electrónica DC. Las dos primeras columnas incluyen el tiempo y la corriente demandada por la carga I_{Profile} . Las otras dos columnas presentan dos corrientes escaladas para descargar dos baterías VRLA: I_{Battery1} e I_{Battery2} . Las corrientes fueron escaladas debido a que en el perfil original los valores son menores en contraste con el valor nominal de las baterías en prueba, 35 Ah.

La Fig. 9 presenta el voltaje, la corriente y la potencia de las baterías durante el experimento. Para la batería 1, el voltaje inicial comenzó por encima de los 12 V y al final de la prueba estuvo cerca de los 11,4 V, lo que significa que había más energía almacenada que la consumida. La batería 1 suministró energía durante el perfil de descarga; sin embargo, debido a que la batería 2 se sometió a una corriente más alta que la batería 1, el voltaje de descarga se alcanzó en la mitad del perfil, en ese caso el perfil no se completó.

El último experimento destaca la capacidad del laboratorio flexible para probar baterías. Las baterías se inspeccionaron visualmente, luego se descargaron y cargaron con una corriente constante y, finalmente, se sometieron a un perfil de referencia.

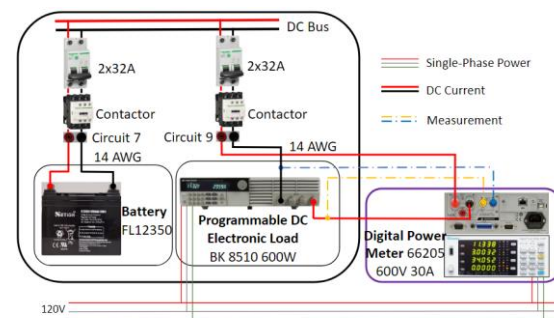
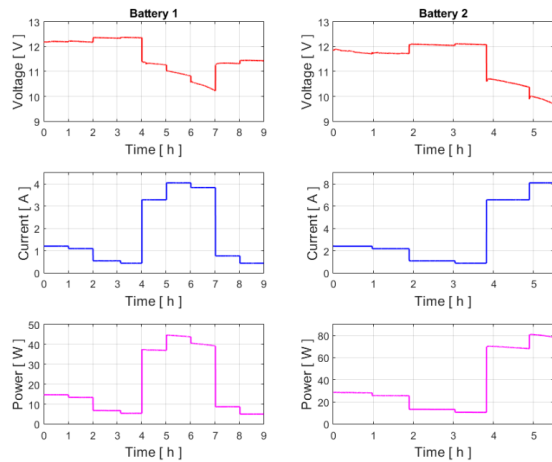


Fig. 8. Setup experimental para descargar las baterías bajo una prueba con un perfil de referencia. **Fuente:** elaboración propia.

Tabla 2: Perfil de descarga aplicado a dos baterías VRLA

Time [h]	I _{Profile} [A]	I _{Battery1} [A]	I _{Battery2} [A]
0-1	0.55	1.203	2.406
1-2	0.50	1.094	2.187
2-3	0.25	0.547	1.094
3-4	0.20	0.437	0.857
4-5	1.50	3.281	6.561
5-6	1.85	4.046	8.092
6-7	1.75	3.827	7.655
7-8	0.35	0.765	1.531
8-9	0.20	0.437	0.857

Fuente: elaboración propia.

**Fig. 9.** Voltaje, corriente y potencia de dos baterías bajo una prueba con un perfil de referencia. Fuente: elaboración propia.

3.3 Emulación de una microrred real: caso rural colombiano

La tercera aplicación del laboratorio de potencia flexible consiste en emular una microrred existente en una zona rural o urbana de Colombia. La microrred no está conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN). La ventaja de emular esos sistemas reales consiste en conocer su comportamiento y proponer soluciones adecuadas a sus problemas. El sistema eléctrico fue seleccionado con base en un “Reporte mensual de telemetría, marzo de 2023” y la “Codificación de la división político-administrativa de Colombia”. La zona seleccionada es el corregimiento de Isla Fuerte que pertenece al municipio de Cartagena en el departamento de Bolívar, Colombia. Tiene una población de 2000 habitantes que tienen como principales actividades económicas la pesca y el turismo. Isla Fuerte se localiza en la longitud -76.179141 y latitud: 9.381067, se encuentra impactada por una radiación de 4.72 kWh/m², una precipitación media anual de 4000 - 5000 mm, y una temperatura media anual de 28 °C. La Fig. 10 presenta las curvas de irradiación solar promedio diaria para 4 meses del año.

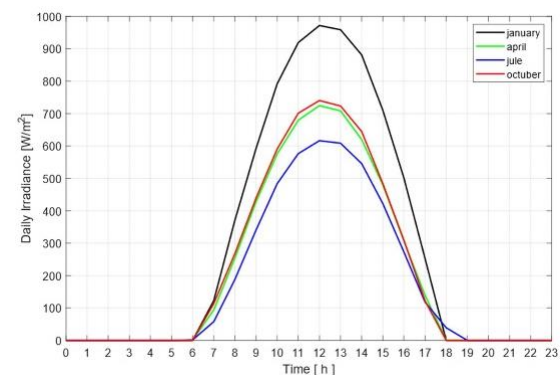
La ubicación de la localidad ofrece a los habitantes una cantidad de energía solar que se aprovecha a través de paneles fotovoltaicos; el resto del requerimiento de potencia se suple con combustibles fósiles. Por otra parte, la demanda energética de la población se caracteriza por una potencia máxima mensual de 190.64 kW, potencia real mensual de 62498 kWh, y 13 h 34 min de media diaria de servicio de energía eléctrica.

La Fig. 11 presenta la curva de demanda promedio, la cual se encuentra escalada en una proporción de 1:3000, y la curva de irradiancia promedio diaria del mes de julio. El sistema eléctrico que abastece a Isla Fuerte está compuesto por dos generadores diésel de 400 kW, dos transformadores de 300 kVA, un generador solar de 175 kWp y 432 baterías con capacidad de 3850 Ah y 2 V. La Fig. 12 presenta un esquema de la microrred que opera en Isla Fuerte.

La microrred se emula en dos partes: el comportamiento de potencia, Fig. 11, y el sistema físico, Fig. 12. Para emular el comportamiento de potencia de Isla Fuerte se eligieron 24 puntos, uno cada hora, se aplicó una escala de 1:3000 para obtener valores en el rango [0-55] Wh. Luego, la curva de carga escalada presentada en la parte superior de la Fig. 11 se dividió en dos etapas:

Etapla 1 en el rango de tiempo de 6:00-18:00 [h], donde ocurren dos condiciones de operación simultáneamente, la primera condición es la carga de las baterías con los paneles solares, y la segunda condición, donde la energía es suministrada por el generador diésel a la carga.

La etapa 2 ocurre en el rango de tiempo de 18:00-23:00 [h] y 0:00-5:00 [h], cuando las baterías proporcionan energía al circuito de carga.

**Fig. 10.** Curvas de irradiación de cuatro meses del año en Isla Fuerte, Colombia. Fuente: elaboración propia.

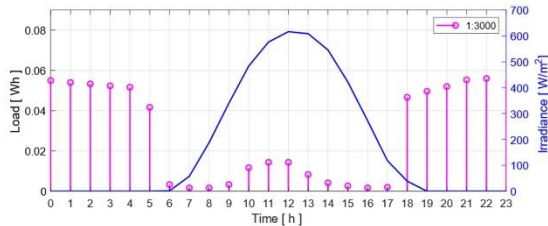


Fig. 11. Curva escalada de demanda promedio de Isla Fuerte y curva de irradiación promedio de Julio. **Fuente:** elaboración propia.

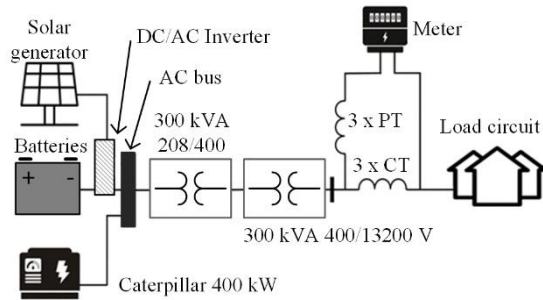


Fig. 12. Esquemático de la microrred que opera en Isla Fuerte. **Fuente:** elaboración propia.

La segunda parte de la emulación consiste en representar la microrred real con dispositivos del laboratorio. El generador solar se emula con el emulador de paneles solares; los generadores diésel se emulan con la fuente DC BK; las baterías se representan con tres baterías VRLA conectadas en serie. El inversor necesario para conectar el generador solar, las baterías y los generadores al transformador se representa con el módulo de potencia de puente completo con el filtro LC. Los dos transformadores y el alimentador de distribución se representan con un transformador elevador de 55:220 V, el circuito de carga se emula utilizando dos reóstatos de 48Ω, uno de 82Ω, tres de 100Ω, uno de 120Ω y uno de 500Ω. Finalmente, el medidor se representa con el medidor digital de potencia y la unidad de comunicación no se implementó de forma independiente, los datos se registraron utilizando la capacidad de almacenamiento de dispositivos como el emulador solar y el medidor digital de potencia. La Fig. 13 presenta la microrred que se implementó en el laboratorio flexible. Para emular los valores de demanda se impusieron las dos etapas explicadas anteriormente con el sistema implementado en la Fig. 13, se variaron los reóstatos hasta alcanzar la potencia escalada demandada por la carga. Para cada valor de los 24 puntos se almacenaron 100 muestras por segundo.

La Fig. 14 presenta los valores de estado estable de voltaje, corriente y potencia en la carga durante la emulación de la microrred representando 24 horas.

En dicha figura, se encuentran los valores medidos y promedio; los valores medidos son los valores registrados durante el experimento y su valor promedio correspondiente. En la parte inferior de la Fig. 14 se presenta la comparación con la carga escalada en la microrred real, demostrando la capacidad del laboratorio flexible para emular microrredes reales o pequeños sistemas eléctricos. También se presentan la corriente y el voltaje de carga, ofreciendo a estudiantes, profesores e investigadores la oportunidad de visualizar y comprender los sistemas con más información.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló el diseño e implementación de un laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos modernos y emular microrredes reales. La flexibilidad se validó implementando tres plataformas diferentes. En la primera plataforma, se probó un nuevo convertidor de potencia tipo puente completo en vacío y a plena carga. Durante la prueba en vacío, la frecuencia de conmutación se varió de 2 a 180 kHz, y durante la prueba a plena carga, la frecuencia de conmutación se varió de 20 a 140 kHz. Para la prueba de plena carga, se calculó y conectó un filtro en la salida del convertidor, un capacitor de 11 μF y un inductor de 0,956 mH.

La comparación de los resultados experimentales con los datos del fabricante demostró el funcionamiento satisfactorio del dispositivo. La segunda plataforma se implementó para cargar y descargar baterías VRLA. Un conjunto de baterías se descargó mediante la carga electrónica DC, que exigió un perfil de referencia. Debido al medidor digital de potencia, se registraron, almacenaron y luego analizaron varias variables. Finalmente, una microrred real instalada en Vigía del Fuerte y su comportamiento eléctrico fueron emulados para una vez más validar la flexibilidad del laboratorio.

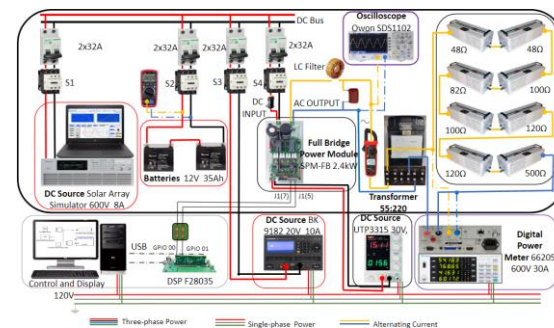


Fig. 13. Microrred de laboratorio emulando la microrred real de Isla Fuerte. **Fuente:** elaboración propia.

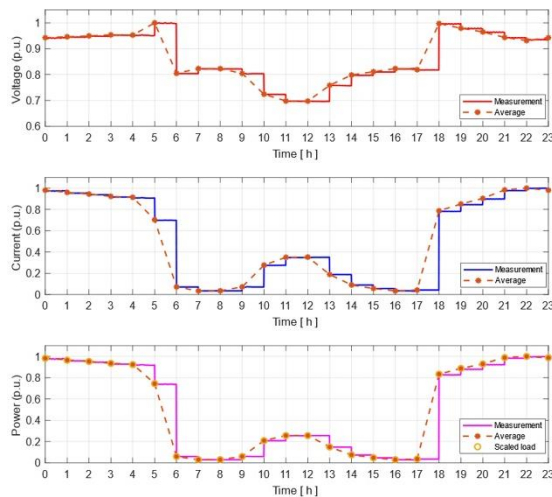


Fig. 14. Voltaje, corriente y potencia en la carga de la microrred emulada de Isla Fuerte. **Fuente:** elaboración propia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Minciencias, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Valle y el Instituto Tecnológico Metropolitano bajo el proyecto de investigación “Dimensionamiento, planeación y control de sistemas eléctricos basados en fuentes renovables no convencionales, sistemas de almacenamiento y pilas de combustible para incrementar el acceso y la seguridad energética de poblaciones colombianas” (código Minciencias 70386), que pertenece al programa de investigación “Estrategias para el desarrollo de sistemas energéticos sostenibles, confiables, eficientes y accesibles para el futuro de Colombia” (código Minciencias 1150-852-70378, código Hermes 46771).

REFERENCIAS

- [1] M. Abedini *et al.*, “Smart microgrid educational laboratory: An integrated electric and communications infrastructure platform,” *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 5, pp. 2552–2565, 2022, doi: 10.24200/sci.2020.55942.4483.
- [2] M. S. Mahdavi, A. Ghasemi, H. Azizi, and G. B. Gharehpetian, “Design and Implementation of a Simple Diesel Generator Emulator for Frequency Analysis of Laboratory-Scale Microgrids,” in *2018 Smart Grid Conference (SGC)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SGC.2018.8777811.
- [3] A. N. Akpolat, Y. Yang, F. Blaabjerg, E. Dursun, and A. E. Kuzucuoğlu, “Design Implementation and Operation of an Education Laboratory-Scale Microgrid,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57949–

- 57966, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072899.
- [4] C. Patrascu, N. Muntean, O. Cornea, and A. Hedes, “Microgrid laboratory for educational and research purposes,” in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555682.
- [5] P. C. Kotsampopoulos, V. A. Kleftakis, and N. D. Hatzigargyriou, “Laboratory Education of Modern Power Systems Using PHIL Simulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3992–4001, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2633201.
- [6] P. E. Pascoe and A. H. Anbuky, “A VRLA battery simulation model,” *Energy Convers Manag*, vol. 45, no. 7, pp. 1015–1041, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.014>.
- [7] V. Svoboda, H. Doering, and J. Garche, “The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries,” *J Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 244–254, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.026>.
- [8] “IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement,” *IEEE Std 118-1978*, pp. 1–20, May 1978, doi: 10.1109/IEEESTD.1978.80821.
- [9] S. Armstrong, M. E. Glavin, and W. G. Hurley, “Comparison of battery charging algorithms for stand alone photovoltaic systems,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1469–1475. doi: 10.1109/PESC.2008.4592143.