

Implementación y verificación de la operación de un módulo configurable de cargas para
una microrred experimental

Miguel Yesid Sánchez Mejía

Cristian Leonardo Gelvez Moreno

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Oscar Alexis Galvis Díaz

Ingeniero Electricista

Codirector

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi mamá y a mi papá, por su amor incondicional, sacrificios silenciosos y por ser mi fuerza, mi guía y mi refugio en cada paso de este camino.

A Luciano, cuya presencia sigue viva en mi corazón y me inspira cada día a seguir adelante.

A mi nona, por sus oraciones, su ternura y su amor incondicional que siempre me sostuvo.

A Dayanna, Alex, Cristian y Manuel, por acompañarme con su amor sincero en los momentos más desafiantes y en los más felices.

Miguel Yesid Sánchez Mejía

A mis padres y abuelos, por ser el pilar fundamental de mi vida, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la honestidad. Esta meta alcanzada es también de ustedes, porque en cada paso que he dado ha estado presente su apoyo incondicional, sus consejos sabios y su amor constante.

A mis compañeros Miguel, Manuel y Sergio, por caminar a mi lado en esta etapa, por su esfuerzo, compromiso y por demostrar que compartir el camino hace más valioso el destino.

Cristian Leonardo Gelvez Moreno

Agradecimientos

A mi familia, por su amor, paciencia y por ser mi mayor motivación en este camino.

A mis docentes, por su entrega y cada enseñanza que dejó huella en mí.

A mis compañeros, por el apoyo, la amistad y todos los momentos compartidos.

A Juan Manuel, por su guía y acompañamiento en este proceso.

Y de manera muy especial, a Cristian, por su dedicación, apoyo constante y por ser una parte fundamental de este logro.

A todos, gracias de corazón.

Miguel Yesid Sánchez Mejía

A mis padres, abuelos y familia por estar siempre ahí, con su amor incondicional, sus palabras sabias y su apoyo silencioso. Ustedes han sido mi impulso cuando flaqueé y mi alegría en cada avance.

A Dios por darme la vida, la fortaleza y la luz en los momentos difíciles. Sin tu guía, este camino no habría sido posible.

A mis amigos por cada momento compartido, por las risas, los consejos y por hacer que este camino no solo fuera más llevadero, sino también más bonito.

Al profesor Juan Manuel Rey López por su guía, exigencia y compromiso, fundamentales en la consolidación de este proyecto.

A Miguel por caminar a mi lado en este reto, por su entrega, sus ideas, su amistad. Trabajar juntos hizo que este logro fuera más significativo.

Cristian Leonardo Gelvez Moreno

Tabla de contenido

Introducción	11
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. Levantamiento del prototipo existente.....	15
3.1 Evaluación técnica del prototipo existente	15
3.2 Composición estructural y disposición física.	16
3.3 Elementos y cableado eléctrico.....	17
3.4 Funcionalidad y operabilidad sistema.....	18
3.5 Condiciones de seguridad.	19
4. Requerimientos del usuario final	21
4.1. Requerimientos físicos y de diseño.....	21
4.2. Requerimientos de seguridad.....	21
4.3. Requerimientos funcionales y operativos	22
4.4 Requerimientos de documentación técnica.....	22
5. Adecuaciones y actualización del diseño.....	23
5.1. Puesta a tierra.....	23
5.2. Malla de seguridad.....	23
5.3. Etiquetado y distancias de seguridad	24
5.4. Operabilidad.....	25
6. Pruebas de validación	27
6.1 Pruebas Generales.....	27

6.1.1 Pruebas de continuidad eléctrica.....	28
6.1.2 Verificación de indicadores LED.....	29
6.1.3 Verificación de funcionamiento de ventiladores.....	29
6.1.4 Verificación del funcionamiento de termocuplas.....	30
6.2 Pruebas de potencia.....	30
6.2.1 Medición y análisis de potencia.....	31
6.2.1.1 Módulo de carga global.....	32
6.2.1.2 Módulo de cargas locales.....	34
6.2.1.3 Conexión desbalanceada.....	36
7. Manual técnico.....	38
8. Conclusiones.....	39
Referencias.....	41
Apéndices.....	42

Lista de figuras

Figura 1 <i>Esquema y ubicación de la microrred experimental en el LIE</i>	12
Figura 2 <i>Modelo 3D de los módulos de cargas.</i>	16
Figura 3 <i>Vista general del prototipo del módulo configurable de cargas antes de su intervención</i>	17
Figura 4 <i>Componentes activos del módulo sin protección física</i>	19
Figura 5 <i>Puesta a tierra del módulo configurable de cargas</i>	23
Figura 6 <i>Malla de seguridad del módulo configurable de cargas</i>	24
Figura 7 <i>Módulo configurable de cargas con señalización y distancias mínimas de seguridad</i>	25
Figura 8 <i>Implementación de stickers en el módulo configurable de cargas</i>	26
Figura 9 <i>Forma de onda de potencia activa (500 por fase) para la carga global</i>	32
Figura 10 <i>Potencia activa medida por la fuente Chroma para el escenario 1 de la carga global</i>	33
Figura 11 <i>Forma de onda de potencia activa (100 por fase) para la carga local 3</i>	34
Figura 12 <i>Potencia activa medida por la fuente Chroma.</i>	35
Figura 13 <i>Forma de onda de potencia activa por fase para carga desbalanceada con neutro</i> ..	36

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE para el escenario 1 de la carga global</i>	33
Tabla 2 <i>Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 500 W en la carga global</i>	34
Tabla 3 <i>Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE</i>	35
Tabla 4 <i>Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 100 W en la carga local 3</i>	35
Tabla 5 <i>Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE</i>	37

Lista de Apéndices

Apéndice A. Diagramas unifilares	42
Apéndice B. Diseño de stickers para el módulo configurable de cargas	44
Apéndice C. Escenarios de prueba y resultados para la carga global	45
Apéndice D. Escenarios de prueba y resultados para las cargas locales	47
Apéndice E. Mapas de calor	50
Apéndice F. Manual de usuario	51

Resumen

Título: Implementación y verificación de la operación de un módulo configurable de cargas para una microrred experimental*

Autor: Miguel Yesid Sánchez Mejía, Cristian Leonardo Gelvez Moreno**

Palabras Clave: Microrred, Módulo de cargas, Seguridad eléctrica.

Descripción: El presente trabajo de grado tuvo como objetivo implementar y validar un módulo configurable de cargas, diseñado para evaluar el comportamiento de una microrred experimental bajo distintas condiciones de operación. La metodología contempló tres etapas: la caracterización del prototipo existente, la actualización técnica del sistema y la validación mediante pruebas visuales, eléctricas y análisis especializados con instrumentación dSPACE. Como resultado, se obtuvo un módulo funcional capaz de simular diversos perfiles de carga, fortaleciendo la infraestructura del laboratorio y aportando una herramienta útil para la investigación y formación en microrredes.

Esta investigación se desarrolló en el Laboratorio de Integración Energética (LIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en el marco de un proyecto de investigación financiado por MinCiencias orientado al estudio de sistemas fotovoltaicos multifuncionales en redes con alta penetración de energías renovables. Además, se elaboró un manual técnico que documenta sus especificaciones, procedimientos y recomendaciones de uso.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Alexis Galvis Díaz. Ingeniero Electricista. Codirector: Juan Manuel Rey López. Doctor en Ingeniería Electrónica.

Abstract

Title: Implementation and Verification of the Operation of a Configurable Load Module for an Experimental Microgrid*

Author(s): Miguel Yesid Sánchez Mejía, Cristian Leonardo Gelvez Moreno **

Key Words: Microgrid, Load module, Electrical Safety.

Description: This undergraduate research project aimed to implement and validate a configurable load module designed to evaluate the behavior of an experimental microgrid under various operating conditions. The methodology included three main stages: characterization of the existing prototype, technical upgrade of the system, and validation through visual inspections, electrical tests, and specialized analysis using dSPACE instrumentation. As a result, a fully functional module was developed, capable of simulating diverse load profiles, thereby strengthening the laboratory's infrastructure and providing a valuable tool for research and education in microgrid systems.

This work was carried out at the Energy Integration Laboratory (LIE) of the Industrial University of Santander (UIS), as part of a research project funded by MinCiencias focused on the study of multifunctional photovoltaic systems in networks with high penetration of renewable energy. Additionally, a technical manual was developed to document the module's specifications, procedures, and usage recommendations.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering Advisor: Oscar Alexis Galvis Díaz, Electrical Engineer Co-advisor: Juan Manuel Rey López, Ph.D. in Electronic Engineering.

Introducción

Las microrredes eléctricas han emergido como una solución clave en la modernización de los sistemas energéticos, al permitir una gestión más eficiente, resiliente y sostenible de la energía. Se definen como “una pequeña porción de un sistema de distribución energética con generación distribuida, dispositivos de almacenamiento y cargas controladas, lo cual puede dar lugar a un sistema energético autosuficiente” (Cagnano et al., 2020). Su arquitectura flexible les permite operar tanto conectadas a la red como en modo isla, lo que ha favorecido su implementación en diversos contextos, desde zonas rurales hasta complejos industriales y entornos urbanos inteligentes (Lasseter, 2011; Hatziargyriou, 2014).

Su relevancia radica en su capacidad para mejorar la seguridad energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y facilitar la integración de energías renovables (Guerrero et al., 2013; Liu et al., 2020). En América Latina, se han adoptado como estrategia para fortalecer la resiliencia ante fenómenos naturales y avanzar en la transición energética (IRENA, 2022).

En el contexto colombiano, donde más del 60 % de la capacidad instalada proviene de generación hidroeléctrica (Acolgen, 2023), las microrredes representan una alternativa para diversificar la matriz energética y llevar electricidad confiable a zonas no interconectadas (ZNI), promoviendo el desarrollo social y la sostenibilidad (CIGRE, 2020; UPME, 2022).

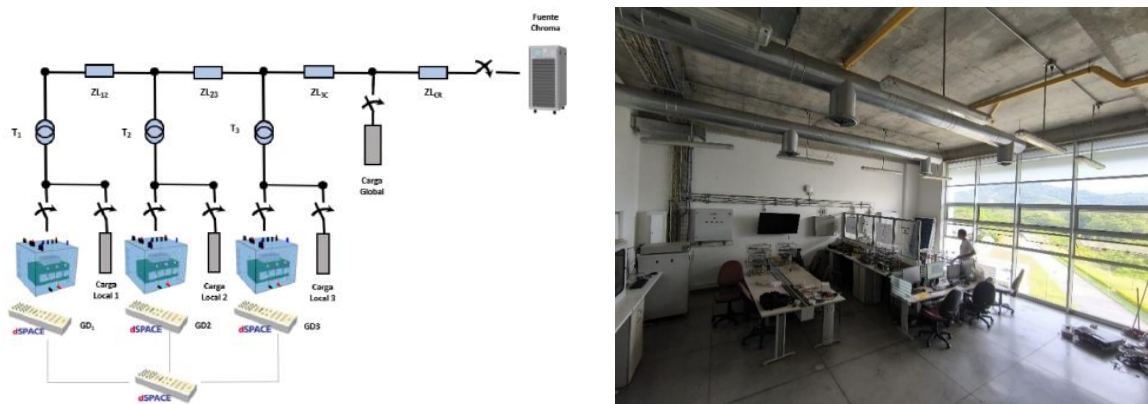
Para impulsar la investigación en este campo, el grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica GISEL de la UIS, se encuentra implementando una microrred experimental en el Laboratorio de Integración Energética (LIE), ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará. Esta infraestructura ha sido financiada, entre otras fuentes, por el proyecto “Diseño de estrategias alternativas de operación y control para sistemas fotovoltaicos multifuncionales en redes de

distribución con alta penetración de energías renovables”, enmarcado en el programa nacional de tecnologías emergentes para microrredes inteligentes, apoyado por MinCiencias.

La microrred experimental del LIE proporcionará un entorno de prueba controlado para validar tecnologías energéticas, analizar estrategias de control distribuido y simular perfiles de carga con generación renovable. En la Figura 1 se presenta su esquema general y su ubicación física dentro del laboratorio.

Figura 1

Esquema y ubicación de la microrred experimental en el LIE



Uno de los aspectos fundamentales en la operación de microrredes es la gestión de la demanda eléctrica, ya que la variabilidad de las cargas puede afectar significativamente la estabilidad y operación del sistema (Lasseter, 2011; Liu et al., 2020). Para evaluar distintos escenarios operativos, es útil contar con un módulo configurable de cargas que permita simular distintos perfiles de consumo y analizar su impacto en la microrred experimental.

Un módulo configurable de cargas permite ajustar la demanda, simulando desde condiciones de baja carga hasta picos de consumo elevados. Esto facilitará la validación de estrategias de gestión energética, estabilidad del sistema y respuesta ante variaciones en la demanda. Su incorporación al entorno experimental del laboratorio facilitará un análisis más detallado del comportamiento eléctrico del sistema, fortaleciendo el proceso de validación y diseño de soluciones aplicables a contextos reales.

El presente trabajo tiene como objetivo principal la implementación y verificación de un módulo configurable de cargas, partiendo de un prototipo inicial. Esta implementación se realiza considerando las necesidades específicas del usuario final, el cumplimiento de normativas técnicas vigentes y su integración segura con la infraestructura de la microrred experimental. A través de este estudio, se busca validar su funcionamiento en condiciones controladas y garantizar su utilidad como herramienta de investigación en sistemas eléctricos inteligentes, contribuyendo al desarrollo de estrategias avanzadas para la gestión eficiente de la energía en microrredes.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Implementar y verificar la operación de un módulo configurable de cargas para una microrred experimental, tomando como base un prototipo existente y cumpliendo con los requerimientos del usuario final.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un levantamiento del diseño y estado del prototipo del módulo considerando tanto las características físicas como eléctricas que definan su comportamiento y rendimiento actual.
- Actualizar el diseño del módulo conforme a los requerimientos de los usuarios del laboratorio y la normativa vigente.
- Realizar las adecuaciones necesarias para la integración del módulo en la microrred experimental, asegurando su compatibilidad eléctrica y operativa.
- Validar el funcionamiento y el cumplimiento normativo del módulo mediante pruebas operativas en diferentes escenarios simulados.
- Elaborar un manual técnico detallado y socializar los resultados obtenidos, documentando tanto el uso y operación segura, como las pruebas realizadas y sus resultados.

3. Levantamiento del prototipo existente

El Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos (GISEL) desarrolló un prototipo inicial de módulo configurable de cargas, con el propósito de simular distintas condiciones de demanda en una microrred experimental, bajo un entorno controlado de laboratorio. Su diseño incluía cargas trifásicas balanceadas, lo que permitía estudiar el comportamiento del sistema ante diferentes escenarios operativos de forma segura y reproducible.

No obstante, este prototipo no fue sometido a un proceso de validación técnica ni cumplía con las normativas vigentes, lo que limitó su aprovechamiento en actividades académicas y de investigación. Su uso se restringió a pruebas puntuales en algunos proyectos de posgrado, sin que existiera una caracterización detallada de sus componentes, funcionalidades o riesgos operativos.

Dado lo anterior, se identificó la necesidad de realizar un levantamiento técnico integral que permitiera evaluar su estado actual —físico, eléctrico y normativo— con el fin de identificar posibles deficiencias y oportunidades de mejora. Este diagnóstico constituye la base para su adecuación estructural, estandarización e integración segura a la microrred del Laboratorio de Integración Energética (LIE).

3.1 Evaluación técnica del prototipo existente

Como parte del proceso de caracterización, se realizó una evaluación técnica detallada del módulo configurable de cargas, analizando sus aspectos estructurales, eléctricos y de seguridad. Esta revisión permitió identificar la forma en que fueron diseñados e implementados los componentes principales del módulo, así como las condiciones reales de su instalación en el entorno de laboratorio. El análisis abarcó tanto la composición física y funcional de los módulos

como su adecuación normativa y el nivel de preparación del sistema para operar de forma segura y confiable.

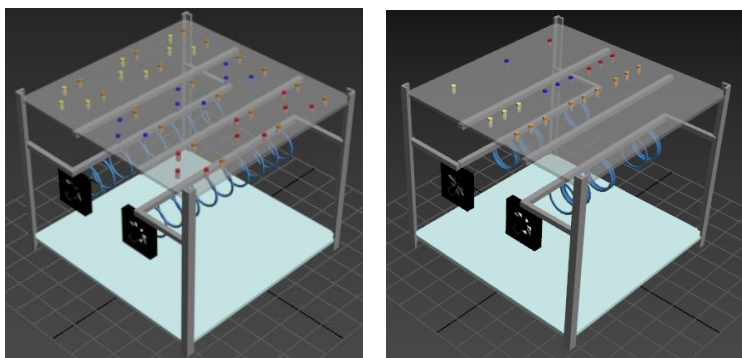
3.2 Composición estructural y disposición física. Su diseño está compuesto por dos módulos físicamente independientes y eléctricamente dependientes, denominados módulo de carga global y módulo de cargas locales, estos tienen una estructura metálica de soporte construida en acero inoxidable, material que brinda estabilidad estructural y resistencia a condiciones de manipulación constante, humedad ambiental y presencia de polvo.

El módulo de carga global contiene un conjunto de resistencias de 200 W, 500 W y 1000 W por fase, distribuidas de forma visible y montadas sobre soportes metálicos fijos. Este módulo tiene como propósito simular perfiles de consumo trifásico de mediana y alta potencia.

Por su parte, el módulo de cargas locales integra tres conjuntos de cargas trifásicas independientes, denominados Carga local 1, Carga local 2 y Carga local 3, cada uno compuesto por resistencias de 100 W y 200 W por fase. Esta sección está diseñada para representar condiciones de carga más fragmentada o distribuida. En la Figura 2 se muestra el modelo 3D resultante del levantamiento realizado sobre el prototipo.

Figura 2

Modelo 3D de los módulos de cargas.



Nota. Modelo hecho en Autodesk 3ds max.

El prototipo físico del módulo configurable de cargas antes de ser intervenido puede verse a continuación.

Figura 3

Vista general del prototipo del módulo configurable de cargas antes de su intervención



3.3 Elementos y cableado eléctrico. A nivel interno, el módulo configurable de cargas presenta una disposición ordenada de sus componentes eléctricos, con conductores distribuidos mediante bandejas tipo canaleta. Esta canalización permite separar las trayectorias eléctricas, reducir interferencias mecánicas, facilitar la ventilación y mantener una presentación estructurada del sistema, útil durante inspecciones visuales o intervenciones menores.

Las resistencias de carga están conectadas en configuración Y, sin presencia de conductor neutro, lo que implica un sistema trifásico trifilar.

No obstante, se identificaron deficiencias relevantes en términos de seguridad eléctrica. El sistema carece de conexión a tierra funcional y no presenta derivaciones ni enlaces equipotenciales en la estructura metálica. Esta omisión representa un riesgo grave para los

operadores y constituye un incumplimiento directo del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2023), ya que una falla de aislamiento podría electrificar la estructura sin una ruta segura de descarga.

En cuanto al sistema térmico, el módulo incorpora cuatro ventiladores distribuidos entre los compartimientos de carga, que disipan el calor generado durante la operación. Además, se integraron dos termocuplas para medir y mostrar la temperatura en puntos estratégicos, permitiendo un monitoreo térmico en tiempo real y reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento.

Para complementar esta descripción, el Apéndice A incluye los diagramas unifilares de los módulos y del sistema de control térmico, facilitando su comprensión, mantenimiento y documentación.

3.4 Funcionalidad y operabilidad sistema. Durante la inspección del módulo configurable de cargas se evidenció que, aunque cuenta con indicadores LED asociados a cada resistencia, varios no funcionaban correctamente: algunos no se encendían al activar la carga y otros permanecían iluminados sin relación con el circuito. Esta inconsistencia afecta su función como herramienta de supervisión visual y genera incertidumbre operativa.

La interfaz visible del módulo, compuesta por una lámina de acrílico perforada con borneras de conexión, carece de rotulado o esquemas de referencia que faciliten la identificación de fases o resistencias. Esta ausencia impide un uso intuitivo del sistema, especialmente para quienes no participaron en su diseño original.

En consecuencia, el módulo se convierte en un sistema cerrado, poco accesible para su uso académico, donde se requiere claridad operativa, autonomía del usuario y facilidad de identificación.

En resumen, aunque el módulo presenta elementos visuales básicos y una estructura accesible, la falta de fiabilidad en los indicadores y la ausencia de una interfaz operativa clara limitan severamente su funcionalidad.

3.5 Condiciones de seguridad. Durante la revisión del módulo configurable de cargas se identificaron deficiencias significativas en sus condiciones de seguridad, que afectan directamente la protección del usuario frente a componentes expuestos. Uno de los aspectos más críticos es la ausencia de cubiertas, mallas o barreras que impidan el contacto accidental con elementos energizados, como bornes de conexión, terminales de resistencias o secciones activas del sistema.

Tanto el módulo de carga global como el módulo de cargas locales presentan una estructura completamente abierta, sin paneles frontales ni tapas laterales que resguarden los componentes eléctricos, como se observa en la Figura 4. Esta exposición representa un riesgo elevado de electrocución o quemaduras.

Figura 4

Componentes activos del módulo sin protección física



IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MÓDULO CONFIGURABLE DE CARGAS20

Adicionalmente, no se evidencian señales físicas como etiquetas de advertencia o símbolos de riesgo eléctrico. Esta ausencia dificulta la identificación de zonas peligrosas, aumenta la probabilidad de errores y reduce la percepción del riesgo por parte del usuario.

La falta de estos mecanismos contradice las buenas prácticas de diseño en entornos experimentales y vulnera principios establecidos en normativas como el RETIE y la Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo, que exigen barreras físicas y señalización visible en equipos con interacción humana directa.

En su estado actual, el módulo no es seguro para uso autónomo, y su operación sin supervisión representa un riesgo inaceptable para estudiantes, investigadores o personal técnico. La incorporación de protecciones físicas debe ser una prioridad para garantizar su viabilidad operativa en el LIE.

El levantamiento técnico realizado permitió caracterizar el estado actual del módulo configurable de cargas, identificando tanto sus capacidades como sus limitaciones estructurales, operativas y de seguridad. Si bien el sistema cuenta con una base funcional, presenta deficiencias que impiden su uso seguro y accesible en entornos académicos.

4. Requerimientos del usuario final

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron dos grupos clave de usuarios en el uso del módulo configurable de cargas: los estudiantes que visitarán en LIE, cuyo uso estará enfocado en prácticas de laboratorio y los miembros del grupo GISEL, que utilizarán el módulo para realizar actividades investigativas. Aunque estos grupos de usuarios tienen enfoques distintos, tienen en común la necesidad de contar con un sistema confiable, seguro y fácil de operar, adaptado al entorno académico. A partir de reuniones, observaciones en el laboratorio y normativas vigentes, se definieron cuatro categorías de requerimientos comunes, que guiaron las adecuaciones realizadas y las pruebas de validación del prototipo. A continuación, se describen dichas categorías

4.1. Requerimientos físicos y de diseño

El diseño del módulo configurable de cargas debe ser robusto, estable y organizado, adaptado al entorno real del laboratorio. Debe soportar un uso frecuente sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad, ajustarse al espacio disponible en el LIE y contar con un acabado visual limpio y profesional, que facilite su uso tanto en actividades experimentales como formativas.

4.2. Requerimientos de seguridad

La seguridad eléctrica del módulo es prioritaria para su uso en el laboratorio. Debe contar con puesta a tierra, elementos de protección física (como mallas o cubiertas), y señalización clara y duradera que advierta sobre riesgos eléctricos y delimite distancias de seguridad y áreas de trabajo, conforme a los lineamientos de las normativas vigentes y las buenas prácticas de laboratorio.

4.3. Requerimientos funcionales y operativos

El módulo debe garantizar confiabilidad operativa para permitir simulaciones precisas y reproducibles, fundamentales en investigación. Una interfaz intuitiva y una disposición organizada de los componentes facilitan su uso, reducen errores y agilizan el diagnóstico y mantenimiento durante las pruebas.

4.4 Requerimientos de documentación técnica

Para garantizar su uso adecuado y sostenido, el módulo debe contar con documentación técnica clara y un manual estructurado que describa su funcionamiento, configuraciones y medidas de seguridad. Este material facilita la formación de nuevos usuarios y asegura su mantenimiento en condiciones óptimas.

En resumen, los requerimientos de los usuarios finales destacaron la necesidad de un módulo funcional, seguro y documentado, acorde con un entorno académico y experimental. Estas directrices, junto con el levantamiento técnico del prototipo, guiaron las adecuaciones estructurales, eléctricas y operativas descritas en el siguiente capítulo, orientadas a garantizar su uso eficiente y su aporte a la microrred del LIE

5. Adecuaciones y actualización del diseño

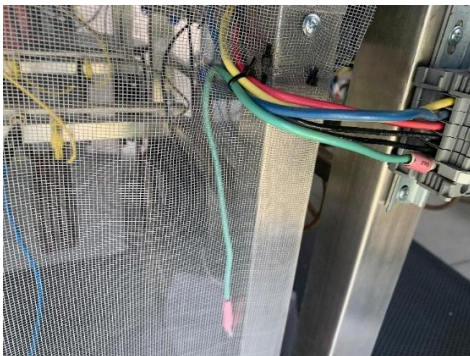
Con los criterios de mejora identificados anteriormente, se llevaron a cabo medidas de adecuación y actualización del módulo configurable de cargas. Estas acciones fueron diseñadas con el objetivo de proporcionar una solución integral, coherente y eficiente que aborde tanto los aspectos técnicos como operativos del sistema. A continuación, se describen en detalle las adecuaciones realizadas al módulo de cargas.

5.1. Puesta a tierra

Con el objetivo de proteger tanto al personal operativo como a los componentes del módulo y cumplir con la normativa vigente, se ejecutó la adecuación del sistema de conexión a tierra utilizando conductores de cobre calibre 10 AWG, como se muestra en la Figura 5. Se emplearon cables de alta conductividad y conexiones de baja impedancia, asegurando un camino continuo y reforzado hacia la estructura del módulo. Esta modificación resolvió la deficiencia detectada, proporcionando una derivación segura y eficiente de las corrientes de falla hacia tierra

Figura 5

Puesta a tierra del módulo configurable de cargas



5.2. Malla de seguridad

Con el objetivo de prevenir el acceso accidental a partes activas o puntos potencialmente peligrosos del sistema, se implementó una malla de seguridad física que rodea el módulo, como

se muestra en la Figura 6. Esta barrera, fabricada en fibra de vidrio, asegura una separación adecuada entre los usuarios y los componentes energizados, reduciendo significativamente el riesgo de contacto directo. Su presencia proporciona una protección mecánica permanente durante la operación, en cumplimiento del Artículo 267 de la Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo.

Figura 6

Malla de seguridad del módulo configurable de cargas



5.3. Etiquetado y distancias de seguridad

Con el fin de garantizar un entorno operativo seguro y funcional, se establecieron distancias mínimas entre los componentes del módulo y las estructuras circundantes, conforme a los criterios de accesibilidad y circulación definidos en la Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo. Estas separaciones aseguran una circulación fluida del personal y facilitan las labores de mantenimiento de los equipos. Asimismo, se implementó un sistema de señalización mediante etiquetas estandarizadas, orientado a advertir sobre riesgos eléctricos y a delimitar zonas de acceso restringido, promoviendo una operación controlada y segura dentro del laboratorio. Esta medida responde a lo establecido en el Artículo 281 de la Resolución 2400 de 1979, así como a las disposiciones del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

y la norma NTC 1461, relacionadas con la prevención de accidentes mediante señalización visible y adecuada. Estas medidas se pueden evidenciar a continuación.

Figura 7

Módulo configurable de cargas con señalización y distancias mínimas de seguridad



5.4. Operabilidad

Se realizaron mejoras en el aspecto visual del módulo, orientadas a lograr una disposición ordenada y clara de sus componentes, facilitando la identificación visual de las conexiones y elementos por parte del usuario, mejorando así su operabilidad. Se empleó un diseño que contribuye a una apariencia profesional y funcional, el cual se puede observar con mayor detalle en el Apéndice B. Estas adecuaciones favorecen la integración estética del módulo en el entorno del laboratorio, manteniendo criterios de ergonomía, claridad operativa y coherencia con la presentación institucional. A continuación, se evidencia su implementación.

Figura 8

Implementación de stickers en el módulo configurable de cargas



Tras la implementación de las adecuaciones estructurales, eléctricas y operativas, el módulo configurable de cargas cumple con los requerimientos técnicos, normativos y funcionales establecidos. La instalación de un sistema de puesta a tierra adecuado, mallas de protección, señalización conforme a la NTC 1461 y detalles de organización visual del panel han mejorado significativamente la seguridad y usabilidad.

Estas mejoras permiten afirmar que el módulo, en su estado actual, es operable de forma autónoma y segura en entornos académicos. Su integración en la microrred experimental del LIE lo consolida como una herramienta válida para pruebas, formación técnica y validación de estrategias energéticas, con un nivel de desempeño tangible y óptimo.

6. Pruebas de validación

Con el propósito de comprobar el comportamiento funcional, operativo y térmico del módulo configurable de cargas, se diseñó y ejecutó una serie de pruebas en el LIE. Estas pruebas fueron fundamentales para verificar que las adecuaciones estructurales, eléctricas y de seguridad realizadas al prototipo fueran efectivas y que el sistema respondiera conforme a los requerimientos técnicos establecidos por los usuarios finales.

El objetivo de esta etapa fue validar la funcionalidad, operabilidad y seguridad del módulo configurable de cargas en condiciones reales de uso. Se buscó confirmar que las resistencias pudieran conectarse y operar de forma individual por fase, según el valor de potencia requerido; que el sistema permitiera configuraciones tanto balanceadas como su diseño original lo indica; que los indicadores LED, ventiladores y termocuplas respondieran adecuadamente; y que los mecanismos de protección implementados, es decir, la puesta a tierra y las mallas de seguridad, cumplieran su función.

Para cumplir con esto, se estableció una metodología dividida en dos niveles de validación, con un enfoque progresivo que permitió evaluar desde las condiciones funcionales más generales hasta el comportamiento del sistema bajo operación real. A continuación, se describen las dos etapas implementadas durante la fase de validación.

6.1 Pruebas Generales.

En esta primera fase de validación se llevaron a cabo pruebas visuales orientadas a verificar el comportamiento físico y funcional de los elementos visibles del módulo configurable de cargas. Estas pruebas permitieron identificar de manera directa el correcto funcionamiento de los sistemas de señalización, ventilación y monitoreo térmico, asegurando así que las

ajustes realizados subsanaran las deficiencias previamente identificadas en el levantamiento técnico.

6.1.1 Pruebas de continuidad eléctrica.

En esta etapa se realizaron pruebas orientadas a verificar la integridad eléctrica y la correcta interconexión de los componentes del sistema, haciendo énfasis en la continuidad de los circuitos de potencia, el aislamiento respecto a la estructura metálica y la verificación de la puesta a tierra.

La prueba de continuidad permitió corroborar tres aspectos fundamentales del sistema:

- **Verificación de la conexión de los componentes eléctricos**

Se comprobó que todas las conexiones correspondientes a las resistencias de carga, los indicadores LED y los conductores asociados se encontraban correctamente enlazadas. La prueba confirmó la existencia de continuidad eléctrica entre cada resistencia y su testigo luminoso, asegurando así la funcionalidad básica del sistema de cargas.

- **Confirmación del aislamiento respecto a la estructura metálica**

Mediante la prueba de continuidad también se verificó que no existiera contacto eléctrico entre los elementos conductores del sistema y la estructura metálica del módulo. Esta condición es indispensable para garantizar el aislamiento adecuado de los componentes activos, lo cual refuerza la seguridad eléctrica del sistema y previene la circulación de corrientes no deseadas a través del chasis metálico.

- **Verificación de la conexión de la puesta a tierra**

Finalmente, se utilizó la misma prueba para confirmar la continuidad entre las estructuras metálicas de ambos módulos (carga global y cargas locales), asegurando que ambos compartieran una conexión efectiva a tierra. Esta continuidad estructural es esencial para

garantizar que cualquier corriente de falla sea derivada de manera segura, cumpliendo con los lineamientos del RETIE y asegurando la protección del personal operativo.

6.1.2 Verificación de indicadores LED.

Se realizó la comprobación individual del encendido de los indicadores LED correspondientes a cada una de las resistencias del sistema. Esta prueba tuvo como finalidad confirmar que cada LED se activara únicamente cuando su respectiva carga fuera energizada, garantizando una correspondencia clara y confiable entre la señal visual y el estado operativo real de la resistencia. Con ello, se logró subsanar la deficiencia funcional detectada anteriormente, donde algunos LED permanecían apagados o encendidos de manera errática. Tras la intervención, todos los indicadores respondieron correctamente, mejorando la supervisión visual y reduciendo el riesgo de errores operativos.

6.1.3 Verificación de funcionamiento de ventiladores.

Se evaluó el encendido y funcionamiento de los ventiladores integrados al sistema, los cuales cumplen una función crítica en la disipación de calor generado por las resistencias durante la operación. Además de confirmar su activación adecuada al energizar las cargas, se verificó que la dirección del flujo de aire fuera coherente y uniforme entre todos los ventiladores, es decir, que el aire caliente fuese expulsado en un mismo sentido. Esta alineación en el sentido de extracción es fundamental para asegurar un flujo continuo de ventilación, lo cual contribuye a mantener temperaturas operativas seguras en el módulo.

Video: <http://bit.ly/4lpHizu>

6.1.4 Verificación del funcionamiento de termocuplas.

Durante la operación del sistema se realizó una verificación del comportamiento de las termocuplas instaladas. Se tomó como referencia la temperatura ambiente al inicio de la prueba y se monitoreó la evolución térmica en tiempo real conforme se activaban las resistencias. Se observó una variación progresiva y coherente de la temperatura registrada, lo que confirma el funcionamiento correcto de los sensores térmicos y su capacidad de respuesta frente al incremento de carga térmica en el sistema. Este monitoreo es esencial para prevenir sobrecalentamientos y preservar la integridad de los componentes.

Video: <https://bit.ly/4lds0gY>

Como cierre del proceso de validación, se realizó una prueba integral en condiciones reales, donde se confirmó el funcionamiento conjunto de los componentes del módulo, destacando la operación de indicadores, ventiladores, monitoreo térmico y medidas de seguridad. Los resultados evidencian un desempeño confiable y su utilidad en el estudio de microrredes.

Video: <https://bit.ly/40ek1rG>

6.2 Pruebas de potencia

Como parte del proceso de validación del módulo configurable de cargas, se llevaron a cabo pruebas específicas orientadas a medir y analizar la potencia trifásica activa en condiciones reales de operación. Estas pruebas permitieron observar el comportamiento del sistema ante diferentes configuraciones de carga, utilizando instrumentación especializada para la adquisición de datos eléctricos en tiempo real.

A continuación, se presenta el enlace al video explicativo que documenta la metodología empleada para la adquisición de datos en condiciones de operación. En este se detalla la

configuración completa del sistema, que, incluyendo la topología de conexión entre el módulo configurable de cargas, la fuente programable Chroma, el banco de sensores y el sistema de adquisición dSPACE. El video permite observar cómo se estructuró el montaje experimental y se sincronizó la medición de variables eléctricas relevantes para validar el comportamiento del módulo bajo distintas condiciones de carga.

Video: <http://bit.ly/44CjkJU>

6.2.1 Medición y análisis de potencia.

El procedimiento experimental permitió establecer una configuración de medición precisa y estructurada entre los diferentes elementos del sistema. La fuente programable Chroma suministró una tensión nominal de 110 V, mientras que el módulo configurable de cargas fue conectado en condiciones operativas estándar. Entre estos componentes se integró un módulo de censado, encargado de extraer las señales de tensión y corriente de cada fase, las cuales fueron dirigidas al sistema dSPACE.

Esta arquitectura de conexión fue fundamental para garantizar la integridad de los datos y la sincronización de las señales. Gracias a este diseño, fue posible capturar la potencia activa entregada al sistema en tiempo real, sin interferir con la operación eléctrica del módulo.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a dos escenarios representativos para cada módulo de carga: por un lado, el módulo de cargas locales, y por otro, el módulo de carga global. Para cada caso, se realiza un análisis detallado de la potencia activa, comparando el valor teórico, correspondiente a la tensión nominal teórica, frente a dos valores experimentales: el primero, registrado directamente desde la fuente programable; y el segundo, obtenido a partir del procesamiento de las señales adquiridas por el sistema dSPACE. Esta

comparación permite evaluar la precisión del sistema de medición y la consistencia operativa del módulo configurable de cargas.

6.2.1.1 Módulo de carga global

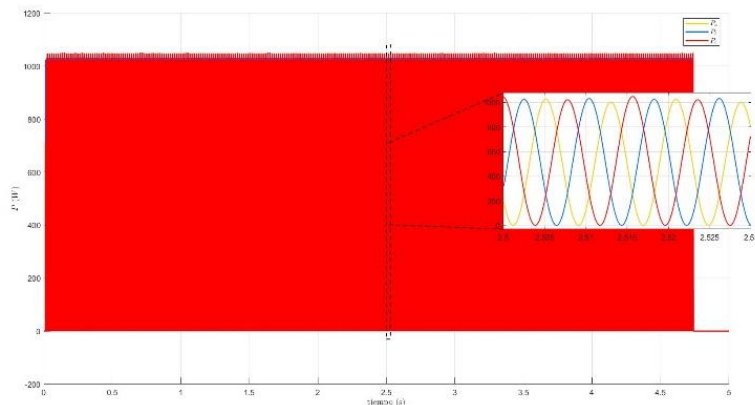
- **Escenario 1: Configuración de 500 W por fase**

Se conectaron resistencias de 500 W en las tres fases, con el objetivo de observar la respuesta del sistema bajo una carga balanceada. En la Figura 9 se puede observar la forma de onda, para cada fase, en tiempo real para esta configuración.

Video: <https://bit.ly/3TuySKQ>

Figura 9

Forma de onda de potencia activa (500 por fase) para la carga global



Con el propósito de verificar el comportamiento real de las resistencias de potencia utilizadas en el módulo configurable de cargas, se realizó una comparación entre la potencia activa registrada experimentalmente y los valores teóricos nominales establecidos para cada resistencia.

IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MÓDULO CONFIGURABLE DE CARGAS33

En la Figura 10 se presentan los valores de potencia activa entregados por la fuente programable Chroma, mientras que en la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos mediante el banco de sensores y la plataforma dSPACE, posteriores a su procesamiento en MATLAB. Ambas mediciones permiten observar el comportamiento real del consumo de potencia en las resistencias bajo condiciones operativas.

Figura 10

Potencia activa medida por la fuente Chroma para el escenario 1 de la carga global



Tabla 1

Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE para el escenario 1 de la carga global.

Fase A [W]	Fase B [W]	Fase C [W]
479.02	486.05	489.44

A partir de estos resultados, se calculó el porcentaje de error de cada medición con respecto al valor nominal teórico de potencia esperado para cada resistencia. La Tabla 2 presenta dicho análisis, lo cual permite identificar la precisión real del comportamiento eléctrico de las resistencias durante las pruebas.

Tabla 2

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 500 W en la carga global

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	500	509.5	479.02	1.900	4.196
B	500	516.8	486.05	3.360	2.790
C	500	518.7	489.44	3.740	2.112

Se identificaron errores atribuibles a la longitud de los conductores —por la distancia entre la fuente y el módulo— y al margen de error de los instrumentos. Estas variaciones, esperadas en el contexto experimental, resaltan la importancia de considerar factores físicos y técnicos al interpretar registros eléctricos.

Este análisis se realizó igualmente para los demás escenarios de carga definidos, es decir, para los casos de 200 W y 1000 W por fase. Debido a que los procedimientos y resultados obtenidos en dichos casos siguen la misma metodología y estructura de presentación, los datos correspondientes se han incluido en el Apéndice C.

6.2.1.2 Módulo de cargas locales.

- **Escenario 1: Configuración de 100 W por fase**

Se energizaron resistencias de 100 W en las tres fases utilizando la carga local 3. En la Figura 11 se puede observar la forma de onda, para cada fase, en tiempo real para esta configuración.

Video: <https://bit.ly/460Ddgg>

Figura 11

Forma de onda de potencia activa (100 por fase) para la carga local 3

IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MÓDULO CONFIGURABLE DE CARGAS35

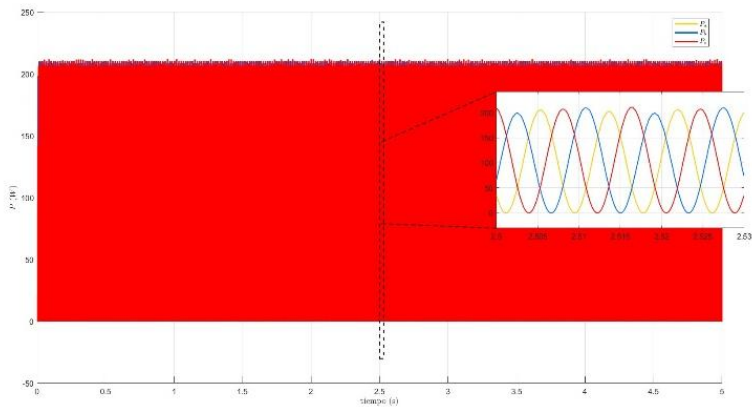


Figura 12

Potencia activa medida por la fuente Chroma.

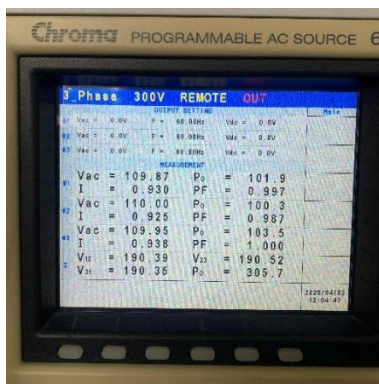


Tabla 3

Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE

Fase A [W]	Fase B [W]	Fase C [W]
101.26	100.11	102.14

Tabla 4

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 100 W en la carga local 3

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	100	101.9	101.26	1.900	1.260
B	100	100.3	100.11	0.300	0.110
C	100	103.5	102.14	3.500	2.140

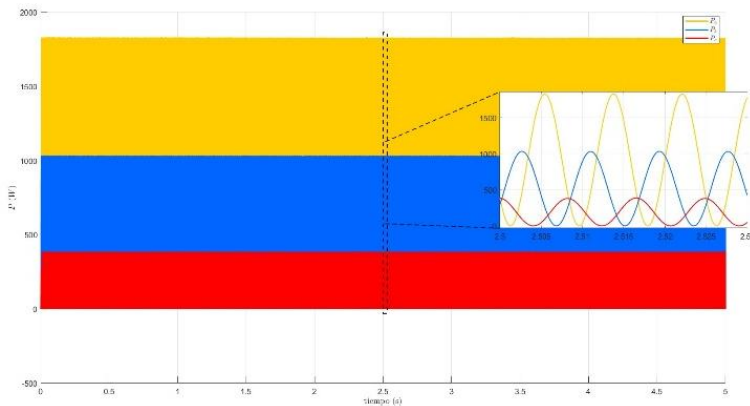
Este análisis se realizó igualmente para los demás escenarios de carga definidos, es decir, para las 3 cargas locales y sus correspondientes resistencias de 100 W y 200 W por fase. Debido a que los procedimientos y resultados obtenidos en dichos casos siguen la misma metodología y estructura de presentación, los datos correspondientes se han incluido en el Apéndice D.

6.2.1.3 Conexión desbalanceada. Con el objetivo de estimar de forma más práctica la potencia activa correspondiente a cada fase en condiciones de carga desbalanceada, se implementó una prueba con la incorporación provisional de un conductor neutro al sistema, el cual fue diseñado originalmente como un sistema trifilar. Esta adaptación permitió analizar el comportamiento del módulo ante un escenario asimétrico con referencia de neutro, condición que facilita una medición más precisa y realista de la potencia por fase.

Para esta prueba, se aplicó una carga desbalanceada configurada de la siguiente manera: Fase A: 1000 W, Fase B: 500 W y Fase C: 200 W. A continuación, se presentan la forma de onda de la potencia activa por fase en tiempo real y los valores promedio de potencia obtenidos a partir de los datos adquiridos con dSPACE.

Figura 13

Forma de onda de potencia activa por fase para carga desbalanceada con neutro

**Tabla 5**

Potencia promedio calculada a partir de los datos adquiridos con dSPACE

Fase A [W]	Fase B [W]	Fase C [W]
913.34	515.52	192.04

Como se observa en los resultados, la incorporación del conductor neutro permitió un comportamiento estable y coherente del sistema frente al desbalance de carga. Las mediciones obtenidas mostraron una alta concordancia con los valores esperados, validando así la capacidad del módulo para operar de manera confiable en condiciones asimétricas cuando se cuenta con una referencia de neutro.

7. Manual técnico

Como parte del proceso de implementación y verificación del módulo configurable de cargas, se desarrolló un manual técnico que orienta su uso adecuado y operación segura. Este documento responde directamente a una necesidad identificada por los usuarios del LIE, quienes manifestaron la importancia de contar con una documentación técnica clara y estructurada que facilite la manipulación correcta del módulo.

El manual recopila un conjunto de directrices de seguridad y recomendaciones operativas diseñadas para preservar la integridad del módulo, extender su vida útil y garantizar condiciones óptimas durante su uso en entornos académicos y experimentales. Su contenido se basa en los resultados obtenidos durante las fases de prueba, incluyendo mediciones eléctricas, verificación funcional de los componentes y la elaboración de mapas de calor que permitieron identificar el comportamiento térmico del sistema bajo distintas condiciones de operación. Estos mapas se presentan en el Apéndice E, como material complementario para la interpretación térmica del módulo.

El manual de usuario se encuentra disponible en el Apéndice F y está pensado como una guía práctica para quienes interactúan con el módulo en el laboratorio. Su contenido busca facilitar una operación segura y eficiente del sistema, promoviendo un manejo responsable que contribuya al aprovechamiento óptimo de esta herramienta en entornos académicos y de investigación.

8. Conclusiones

La implementación exitosa del módulo configurable de cargas, desarrollado a partir de un prototipo con deficiencias operativas, estructurales y normativas, fortalecerá significativamente la infraestructura del Laboratorio de Integración Energética (LIE), consolidándolo como un recurso pedagógico y científico confiable, seguro y alineado con los requerimientos académicos y de investigación.

El levantamiento técnico permitió identificar y corregir falencias críticas como la ausencia de puesta a tierra, la exposición de componentes activos, la falta de señalización y la carencia de documentación técnica. Las adecuaciones realizadas —incluyendo mallas de seguridad, mejoras visuales, señalización conforme a la norma y la puesta a tierra— garantizaron la seguridad eléctrica y mecánica del módulo, cumpliendo con los lineamientos del RETIE y la Resolución 2400 de 1979.

Las pruebas de validación confirmaron el correcto desempeño del módulo en configuraciones de carga balanceadas, coherentes con su diseño original trifilar. No obstante, de forma experimental se evaluó la integración de un conductor neutro para observar su comportamiento bajo cargas desbalanceadas. Esta modificación mejoró la estabilidad del sistema en condiciones asimétricas, por lo que se sugiere considerar su incorporación en futuras versiones, en caso de que se requiera operar con cargas desbalanceadas. De lo contrario, el módulo debe seguir utilizándose exclusivamente con cargas balanceadas, como fue concebido inicialmente.

La instrumentación mediante dSPACE y la fuente programable Chroma permitió una caracterización precisa de la potencia activa, validando tanto el rendimiento de los elementos de carga como la exactitud de las mediciones. Adicionalmente, la elaboración del manual técnico

proporciona una guía clara para su uso seguro y eficiente por parte de estudiantes, docentes e investigadores.

Durante las mediciones, se evidenció que los porcentajes de error se mantuvieron dentro de márgenes válidos y confiables para todas las fases y cargas locales, con excepción de la resistencia de 1000 W correspondiente a la fase C de la carga global, la cual presentó un error significativamente elevado. Por esta razón, se recomienda su reemplazo para evitar desviaciones que puedan afectar la confiabilidad del sistema.

En conclusión, este proyecto ofrece una solución funcional y normativa que fortalece las capacidades experimentales para el estudio de microrredes eléctricas, consolidando un recurso útil para la formación y la investigación, en coherencia con las tendencias actuales de transición energética en Colombia.

Referencias

- Acolgen. (2023). Informe de gestión del sector eléctrico colombiano. Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica. <https://acolgen.org.co>
- Cagnano, A., De Tuglie, E., & Mancarella, P. (2019). Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. *Applied Energy*, 258, 114039.
- CIGRE. (2020). Microgrids for Rural Electrification: A Guide for Development and Implementation. Working Group C6.22. <https://www.cigre.org>
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE transactions on industrial electronics (1982)*, 58(1), 158–172.
- Hatziargyriou, N. (Ed.). (2014). *Microgrids: Architectures and Control* (1a ed.). John Wiley & Sons.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Renewable energy in Latin America and the Caribbean: Status and prospects*. <https://www.irena.org/publications>
- Lasseter, R. H. (2011). Smart Distribution: Coupled Microgrids. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 99(6), 1074–1082.
- Liu, X., Wang, P., & Loh, P. C. (2011). A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2), 278–286.
- UPME. (2022). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura Eléctrica 2022–2026. Unidad de Planeación Minero Energética. <https://www1.upme.gov.co>

Apéndices

Apéndice A. Diagramas unifilares

Figura 14

Diagrama unifilar del módulo de carga global

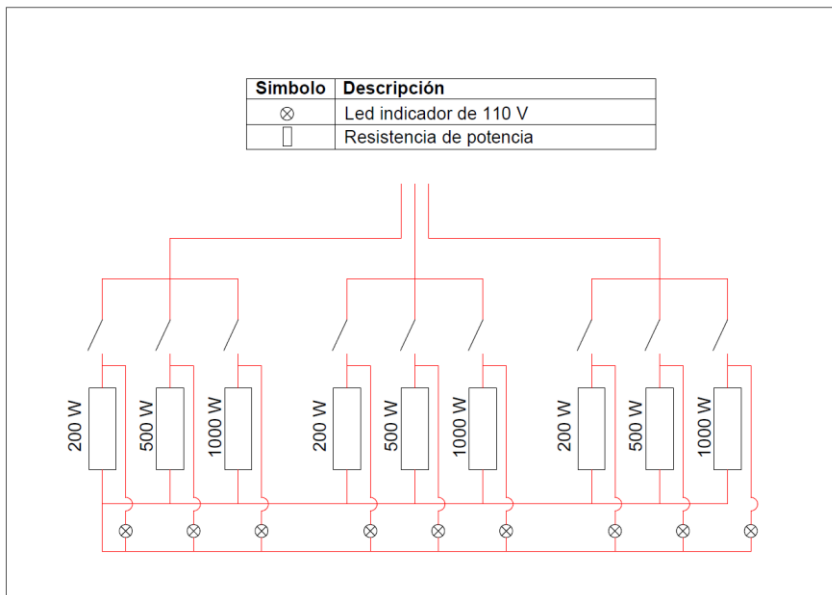


Figura 15

Diagrama unifilar del módulo de cargas locales

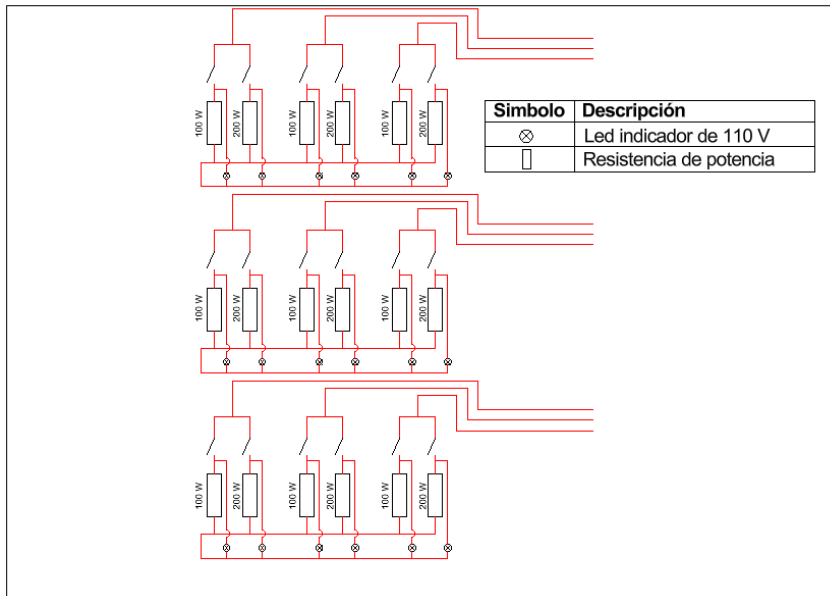
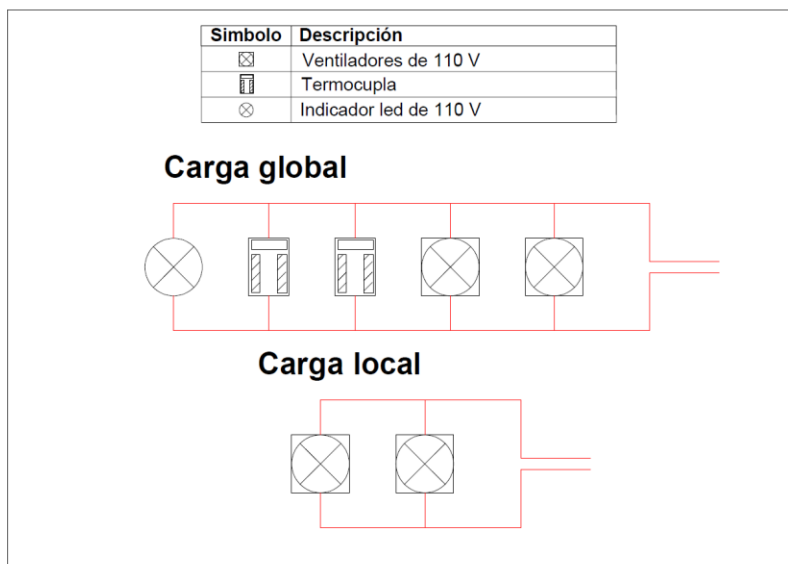


Figura 16

Diagrama unifilar de control térmico (ventiladores y termocuplas)



Apéndice B. Diseño de stickers para el módulo configurable de cargas

Figura 17

Diseño de sticker para carga local

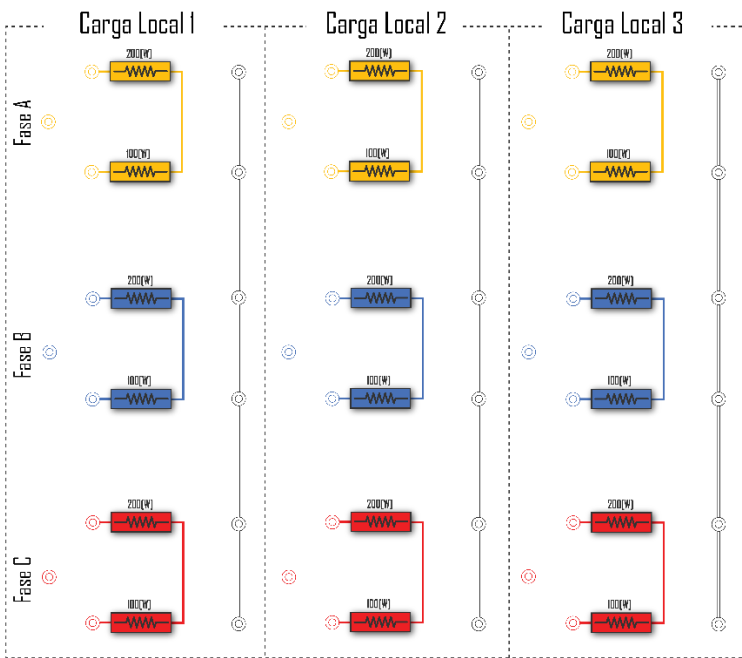
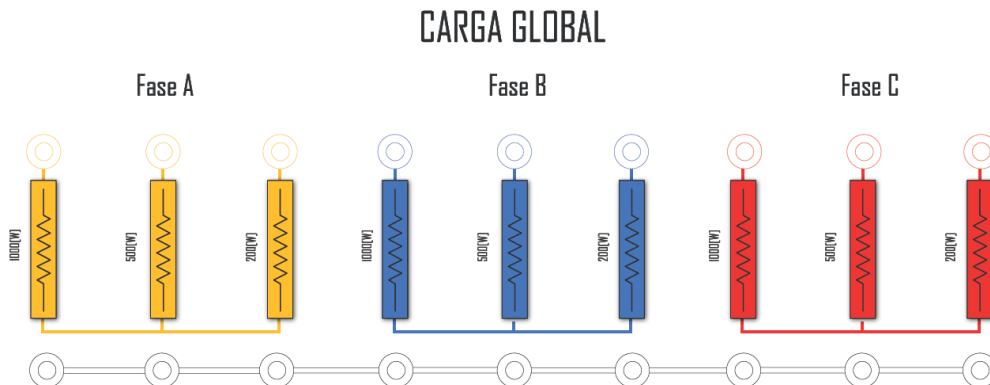


Figura 18

Diseño de sticker para carga global



Apéndice C. Escenarios de prueba y resultados para la carga global

- Escenario 2: Configuración de 200 W por fase

Figura 19

Forma de onda de potencia activa (200 por fase) para la carga global

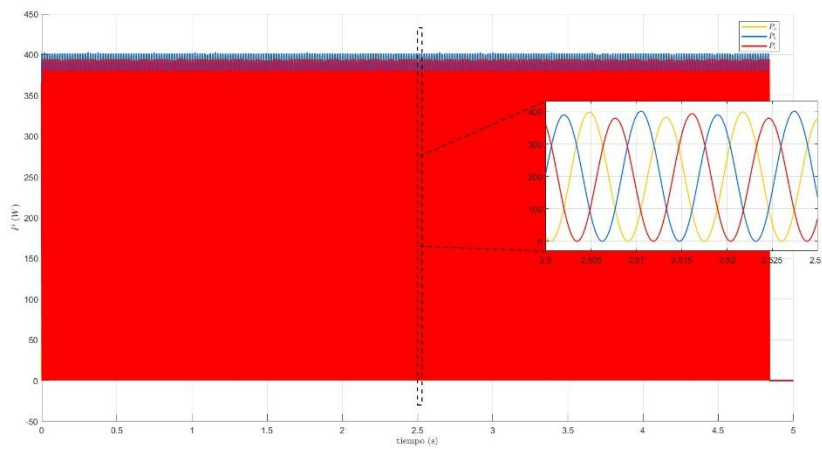


Tabla 6

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 200 W en la carga global

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	200	195.6	189.07	2.200	5.465
B	200	197.7	191.56	1.150	4.220
C	200	196.6	187.27	1.700	6.365

- **Escenario 3: Configuración de 1000 W por fase**

Figura 20

Forma de onda de potencia activa (1000 por fase) para la carga global

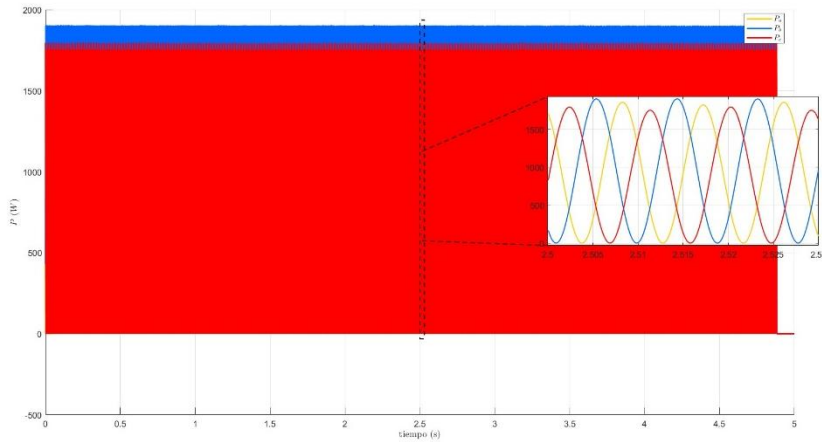


Tabla 7

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 1000 W en la carga global

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	1000	931.5	897.6	6.850	10.240
B	1000	961.5	928.38	3.850	7.162
C	1000	893.1	866.96	10.690	13.304

Apéndice D. Escenarios de prueba y resultados para las cargas locales

- **Escenario 2: Configuración de 100 W por fase para la carga local 1**

Figura 21

Forma de onda de potencia activa (100 por fase) para la carga local 1

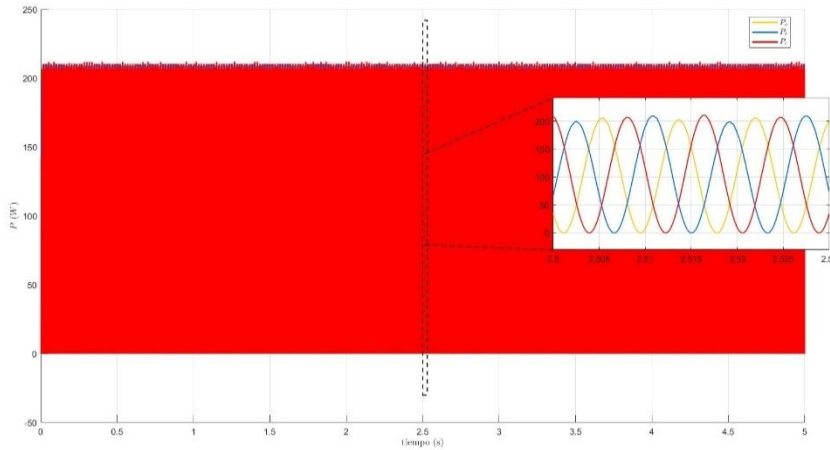


Tabla 8

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 100 W en la carga local 1

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	100	102.0	101.71	2.000	1.710
B	100	102.0	101.82	2.000	1.820
C	100	104.5	103.24	4.500	3.240

- **Escenario 3: Configuración de 200 W por fase para la carga local 1**

Figura 22

Forma de onda de potencia activa (200 por fase) para la carga local 1

IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MÓDULO CONFIGURABLE DE CARGAS48

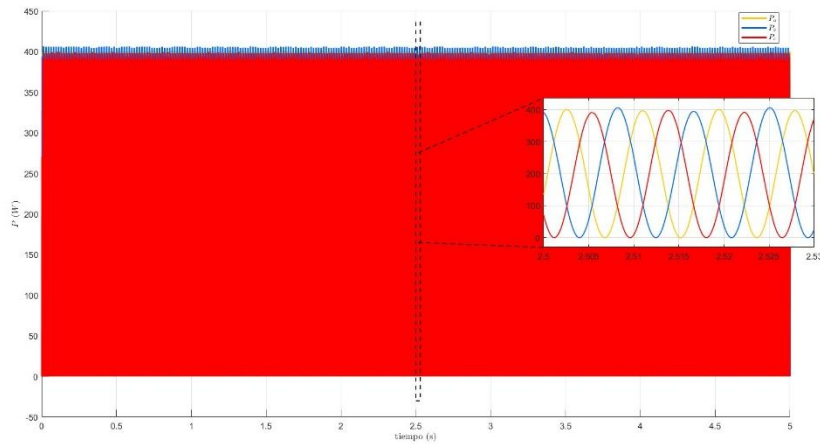


Tabla 9

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 200 W en la carga local 1

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	200	198.7	199.14	0.650	0.430
B	200	199.2	199.74	0.400	0.130
C	200	194.2	196.95	2.900	1.525

- **Escenario 4: Configuración de 100 W por fase para la carga local 2**

Figura 23

Forma de onda de potencia activa (100 por fase) para la carga local 2

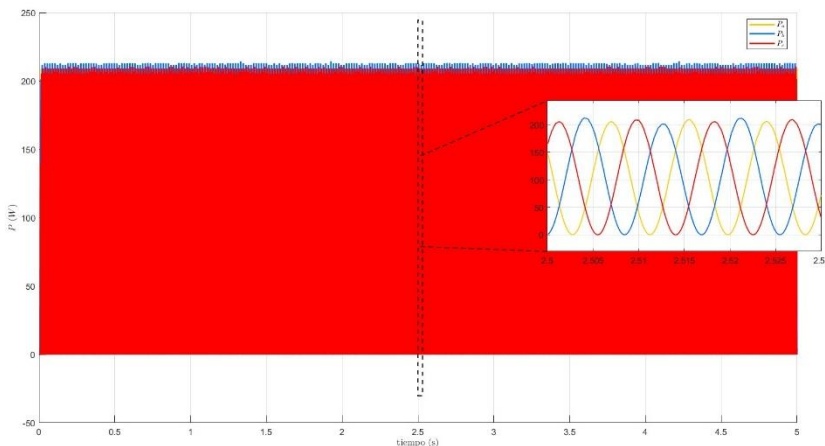


Tabla 10

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 100 W en la carga local 2

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	100	103.6	103.4	3.600	3.400
B	100	103.3	103.24	3.300	3.240
C	100	104.6	103.38	4.600	3.380

- **Escenario 5: Configuración de 200 W por fase para la carga local 2**

Figura 24

Forma de onda de potencia activa (200 por fase) para la carga local 2

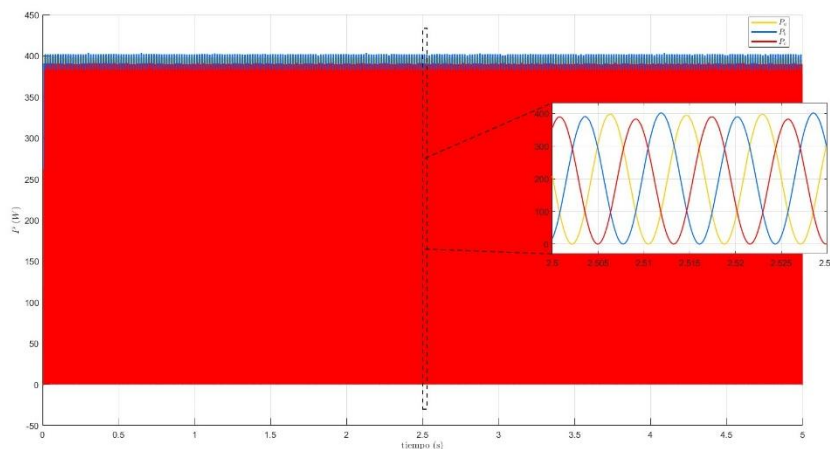


Tabla 11

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 200 W en la carga local 2

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	200	198.3	197.63	0.850	1.185
B	200	197.5	197.42	1.250	1.290
C	200	192.8	192.6	3.600	3.700

- **Escenario 6: Configuración de 200 W por fase para la carga local 3**

Figura 25

Forma de onda de potencia activa (200 por fase) para la carga local 3

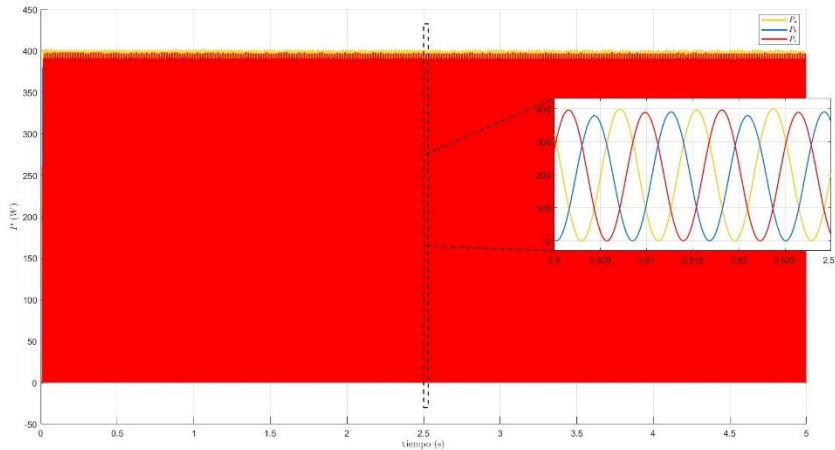


Tabla 12

Porcentaje de error relativo entre la potencia activa medida y el valor teórico nominal de cada resistencia de 200 W en la carga local 3

Fase	Potencia Nominal [W]	Potencia Chroma [W]	Potencia dSPACE [W]	%E _{Chroma}	%E _{dSPACE}
A	200	199.9	198.79	0.050	0.605
B	200	192.6	192.10	3.700	3.950
C	200	198.0	195.93	1.000	2.035

Apéndice E. Mapas de calor

Figura 26

Mapa de calor de Carga global a 30 segundos de uso

IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MÓDULO CONFIGURABLE DE CARGAS51

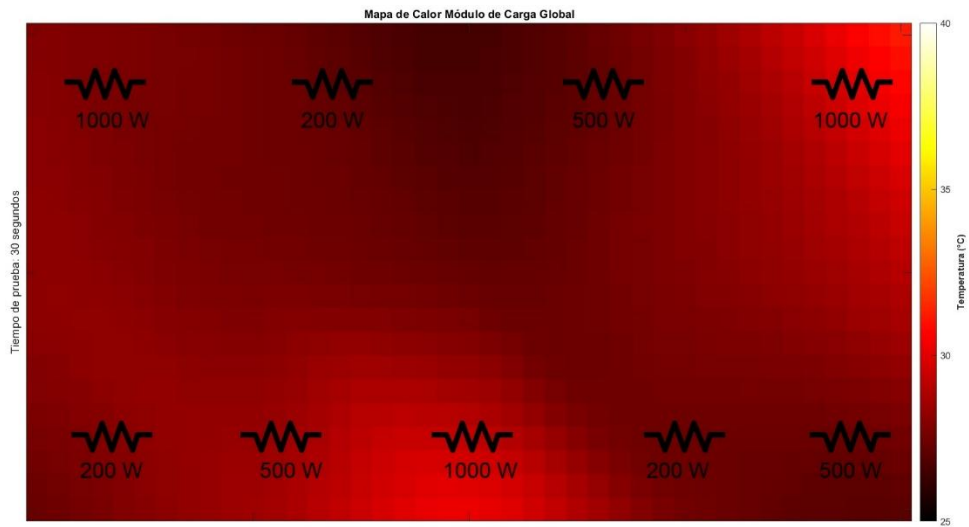
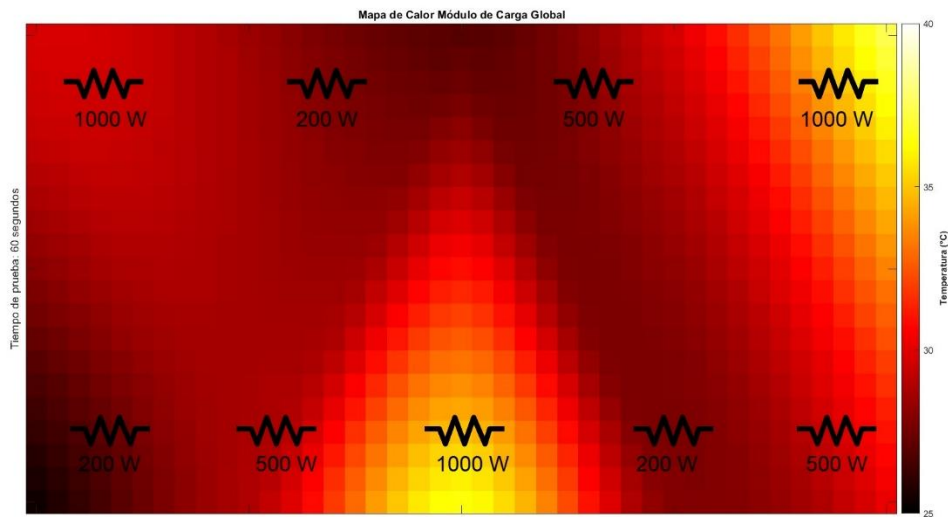


Figura 27

Mapa de calor de Carga global a 60 segundos de uso



Apéndice F. Manual de usuario