# DISEÑO DE UN NODO DE CONEXIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

**ROBINSON CANO CALLE**
**ALEXIS GUTIÉRREZ SÁNCHEZ**
**MARTÍN EDUARDO URREGO RIÓS**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**
**MEDELLÍN**
**2026**

# DISEÑO DE UN NODO DE CONEXIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

**ROBINSON CANO CALLE**
**ALEXIS GUTIÉRREZ SÁNCHEZ**
**MARTÍN EDUARDO URREGO RIÓS**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Eléctrica**

**Asesor técnico:**
**Carlos Mario Moreno Paniagua**
**Ingeniero eléctrico**

**Asesora metodológica:**
**Karen Lemmel Vélez**
**MSc en automatización y control**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**
**MEDELLÍN**
**2026**

**Contenido**

1. Planteamiento del problema ..... 14
1.1 Descripción ..... 14
1.1.2 Limitaciones ..... 16
1.1.3 Consecuencias ..... 16
1.2 Formulación ..... 17
2. Justificación ..... 18
3. Objetivos ..... 21
3.1 Objetivo general ..... 21
3.2 Objetivos específicos ..... 21
4. Referentes teóricos ..... 22
4.1 Integración fotovoltaica y arquitectura del nodo de conexión en microredes 22
4.2 Control y sincronización: seguimiento de red, formación de red y anti-isla 23
4.2.1. Protección y coordinación en microredes con alta electrónica de potencia 24
4.2.2. Calidad de energía y armónicos en el PCC ..... 24
5. Metodología ..... 27
5.1 Tipo de proyecto ..... 27
5.2 Método ..... 28
5.3 Instrumentos de recolección de información. ..... 29
5.3.1. Fuentes primarias ..... 29
5.3.2. Fuentes secundarias ..... 30
6. Resultados ..... 32
6.1 Normativa Internacional ..... 37
**Descripción:** ..... 37
**Aplicación práctica:** ..... 37
6.2 Normativa colombiana (CREG, CON, UOME) ..... 37

6.3 Aplicación práctica para microredes FV a BT en Colombia ..... 38
6.4 Tablas comparativas ..... 39
6.5 Resumen del flujo operativo ..... 45
6.6 Recomendaciones para el ensamble del nodo FV ..... 47
6.7 Operación del bus Modbus para el control de operaciones del emulador de red 49
6.8 Calculo de la caída de tensión en las bobinas de filtrado ..... 49
6.9 Listado de componentes para el ensamble del nodo FV. ..... 50
7. Conclusiones ..... 53
8. Recomendaciones ..... 54
9. Referencias bibliográficas ..... 55
10. Bibliografía ..... 58
11. Anexos ..... 59

## Lista de figuras

Ilustración 1 Relación fase-fase. Fuente de origen: Notas de clase ..... 62
Ilustración 2 Relación fase-desfasada-. Fuente de origen: Notas de clase..... 63
Ilustración 3 Relación Fase-Neutro. Fuente de origen: Notas de clase ..... 63

## Lista de tablas

**Pág.**

Tabla 1. ..... 35

## Resumen

# DISEÑO DE UN NODO DE CONEXIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA MICRORED DIDÁCTICA DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

**ROBINSON CANO CALLE**
**ALEXIS GUTIÉRREZ SÁNCHEZ**
**MARTÍN EDUARDO URREGO RIÓS**

El presente trabajo de grado tiene como objetivo diseñar un nodo de conexión para integrar un sistema de generación solar fotovoltaica a la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, garantizando el cumplimiento de los requisitos técnicos, normativos y de seguridad vigentes en Colombia, así como una operación estable, segura y con calidad de energía en los modos conectado a red y en isla. La metodología empleada corresponde a un proyecto de desarrollo experimental, en el cual se realizó la revisión de referentes teóricos y normativos (entre ellos la Resolución CREG 174 de 2021, RETIE e IEEE 1547-2018), la definición de requisitos funcionales, el dimensionamiento de componentes, la selección de equipos y la definición de estrategias de control, protección y medición adecuadas para sistemas con alta penetración de electrónica de potencia. Como resultado, se obtuvo el diseño integral del nodo, el cual contempla la arquitectura del sistema, esquemas de control GFL/GFM, filtrado de armónicos, esquemas de protección coordinada, cálculos eléctricos detallados y el listado de componentes necesarios. Se concluye que el nodo diseñado cumple con todas las exigencias regulatorias y técnicas, permitiendo su implementación física y su uso como plataforma pedagógica para el desarrollo de competencias en ingeniería eléctrica, al reproducir condiciones reales de operación, transición entre modos y gestión de recursos energéticos distribuidos en un entorno controlado y seguro.

Palabras clave: Microrred didáctica, Generación fotovoltaica, Nodo de conexión, Calidad de energía, Normativa CREG.

## Abstract

This degree project aims to design a connection node to integrate a solar photovoltaic generation system into the educational microgrid of the Pascual Bravo University Institution, ensuring compliance with current technical, regulatory, and safety requirements in Colombia, as well as stable, safe operation with power quality in both grid-connected and islanded modes. The methodology corresponds to an experimental development project, which included a review of theoretical and regulatory frameworks (such as CREG Resolution 174 of 2021, RETIE, and IEEE 1547-2018), the definition of functional requirements, component sizing, equipment selection, and the definition of control, protection, and measurement strategies suitable for systems with high power electronics penetration. As a result, the comprehensive design of the node was obtained, covering system architecture, GFL/GFM control schemes, harmonic filtering, coordinated protection schemes, detailed electrical calculations, and the required component list. It is concluded that the designed node meets all regulatory and technical requirements, enabling its physical implementation and use as an educational platform for developing skills in electrical engineering, by reproducing real operating conditions, mode transitions, and distributed energy resource management within a controlled and safe environment.

Keywords: Educational microgrid, Photovoltaic generation, Connection node, Power quality, CREG regulation.

# Glosario

**AGPE**: Acrónimo de Autogenerador de Energía Eléctrica. Usuario que produce energía para su propio consumo, pudiendo entregar excedentes a la red, regulado en Colombia por la Resolución CREG 174 de 2021.

**AMI**: Acrónimo de Advanced Metering Infrastructure. Infraestructura de Medición Avanzada. Sistema de medición digital bidireccional que permite registrar, transmitir y gestionar datos de consumo y generación en tiempo real, obligatorio según normativa CREG a partir de 2026.

**Anti-isla**: Conjunto de funciones de protección y control diseñadas para detectar y desconectar una fuente de generación cuando la red principal se desconecta, evitando que una zona siga energizada de forma no intencional y garantizando la seguridad.

**BESS**: Acrónimo de Battery Energy Storage System. Sistema de almacenamiento de energía en baterías, utilizado para brindar soporte de tensión y frecuencia, cubrir transitorios y gestionar energía en la microrred.

**BT**: Abreviatura de Baja Tensión. Nivel de tensión eléctrica igual o inferior a 1000 V, rango en el que opera la microrred didáctica y el nodo de conexión diseñado.

**Calidad de energía**: Conjunto de características de la energía eléctrica que determinan su aptitud para ser utilizada, incluyendo niveles de tensión, frecuencia, distorsión armónica y ausencia de perturbaciones.

**CNO**: Consejo Nacional de Operación. Entidad encargada de coordinar la operación segura, confiable y económica del Sistema Interconectado Nacional en Colombia, definiendo requisitos de supervisión y operación para generadores.

**CREG**: Comisión de Regulación de Energía y Gas. Entidad estatal que define las normas, reglas y condiciones técnicas, económicas y de seguridad para el sector eléctrico colombiano.

**DER**: Acrónimo de Distributed Energy Resources. Recursos Energéticos Distribuidos. Fuentes de generación, almacenamiento o gestión de energía conectadas directamente a la red de distribución, como el sistema fotovoltaico de este proyecto.

**Filtro LCL**: Dispositivo pasivo compuesto por inductores y capacitores, instalado a la salida de los inversores para reducir la distorsión armónica, mejorar la forma de onda de corriente y cumplir con los límites de calidad de energía.

**FV**: Abreviatura de Fotovoltaico. Tecnología que convierte la radiación solar directamente en energía eléctrica mediante el uso de paneles o módulos solares.

**GD**: Generación Distribuida. Fuentes de generación de energía conectadas a la red de distribución, cercanas a los puntos de consumo, con potencias reguladas y reglas específicas de conexión.

**GFM**: Acrónimo de Grid-Forming. Modo de operación de convertidores electrónicos donde el inversor actúa como fuente de tensión, estableciendo la referencia de tensión y frecuencia del sistema, fundamentalmente en modo isla.

**GFL**: Acrónimo de Grid-Following. Modo de operación de convertidores electrónicos donde el inversor se sincroniza y sigue la referencia de tensión y frecuencia impuesta por la red principal o por una fuente formadora de red.

**IEEE**: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Organismo internacional que desarrolla y publica estándares técnicos, como la norma IEEE 1547, base para la interconexión de recursos distribuidos.

**Isla**: Estado de operación de una microrred o de una parte del sistema eléctrico que funciona desconectada y aislada de la red principal, manteniendo su propio suministro de energía de forma autónoma.

**LPSP**: Acrónimo de Loss of Power Supply Probability. Probabilidad de pérdida del suministro de potencia. Índice de evaluación de desempeño que mide la fiabilidad con la que un sistema de generación cubre la demanda energética.

**Microrred**: Conjunto integrado de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento que opera como una sola unidad controlable, capaz de funcionar conectada a la red o en modo isla.

**PCC**: Acrónimo de Point of Common Coupling. Punto Común de Acoplamiento. Punto físico donde el sistema de generación o la microrred se conecta con la red de distribución principal o con otra parte del sistema eléctrico.

**PLL**: Acrónimo de Phase-Locked Loop. Bucle de enganche de fase. Sistema electrónico de control utilizado para sincronizar la frecuencia y el ángulo de fase del inversor con los de la red eléctrica.

**PWM**: Acrónimo de Pulse Width Modulation. Modulación por Ancho de Pulso. Técnica de conmutación utilizada en los convertidores de potencia para regular el flujo de energía y generar las formas de onda deseadas.

**RETIE**: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Norma colombiana que establece los requisitos esenciales de seguridad para garantizar que las instalaciones eléctricas cumplan con condiciones de seguridad contra riesgos eléctricos.

**Ride-through**: Capacidad de los equipos electrónicos de potencia para permanecer conectados y operativos durante perturbaciones o caídas de tensión en la red, sin desconectarse innecesariamente, contribuyendo a la estabilidad del sistema.

**SAIDI**: Acrónimo de System Average Interruption Duration Index. Índice de duración promedio de interrupción del sistema. Indicador de desempeño que mide la continuidad del servicio eléctrico, calculando el tiempo promedio que los usuarios estuvieron sin suministro.

**SAIFI**: Acrónimo de System Average Interruption Frequency Index. Índice de frecuencia promedio de interrupción del sistema. Indicador que cuantifica cuántas veces en promedio se interrumpe el servicio eléctrico para los usuarios de la red.

**THD**: Acrónimo de Total Harmonic Distortion. Distorsión Armónica Total. Índice que mide la desviación de la forma de onda real de tensión o corriente respecto a la onda sinusoidal ideal, indicador clave de la calidad de energía.

**UPME**: Unidad de Planeación Minero Energética. Entidad encargada de planificar el desarrollo del sector eléctrico y minero en Colombia, definiendo lineamientos y metas para la integración de energías renovables.

**Volt-VAR**: Estrategia de control implementada en inversores que permite gestionar la inyección o absorción de potencia reactiva en función de los niveles de tensión, con el fin de mantenerla dentro de los límites permitidos y mejorar la estabilidad.

# Introducción

En los últimos años, las microrredes han pasado de ser una idea conceptual para convertirse en plataformas concretas para la integración de fuentes renovables, el ensayo de esquemas de control avanzados y la formación de talento en ingeniería eléctrica. En ese escenario, las instituciones de educación superior requieren infraestructuras didácticas que permitan reproducir, a una escala controlada, las condiciones reales de operación de los sistemas de potencia, de manera que el estudiantado pueda comprender la interacción entre generación, carga, protección y calidad de energía desde una perspectiva sistémica (Vínicios Moreno Sanches, 2026). La microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo se inscribe en esta lógica, al ofrecer un entorno donde es posible estudiar configuraciones de red, flujos de potencia y efectos de la integración de fuentes renovables, con un nivel de riesgo acotado y bajo la supervisión de personal académico especializado.

En ese marco, la integración de un sistema de generación solar fotovoltaica plantea exigencias técnicas y normativas que van más allá de la simple conexión de un inversor a una barra de baja tensión. La normatividad colombiana vigente para autogeneración y generación distribuida establece requisitos de conexión, protección, medición y operación que condicionan el diseño de cualquier punto de acoplamiento entre una fuente renovable y la red, aun cuando se trate de una microrred de carácter didáctico (CREG C. d., 2021). Además, la literatura reciente sobre microrredes educativas enfatiza que los laboratorios de este tipo deben reflejar, en la medida de lo posible, las restricciones técnicas, los procedimientos de conexión y las métricas de desempeño que se aplican en sistemas reales, de forma que el aprendizaje no se limite a ensayos aislados, sino que reproduzca escenarios de operación con relevancia profesional (Farheen Bano, 2024). De allí surge la necesidad de concebir un nodo de conexión específico para el sistema fotovoltaico, que articule de manera coherente exigencias regulatorias, criterios de seguridad eléctrica y objetivos de formación.

La problemática central que aborda este trabajo radica en la ausencia, dentro de la microrred didáctica, de un nodo de conexión fotovoltaico diseñado como interfaz estructurada entre el campo solar, la electrónica de potencia y el resto de la red. Sin un nodo definido con claridad, la integración del recurso fotovoltaico tiende a resolverse

mediante montajes ad hoc, con capacidades limitadas para gestionar la transición entre nodo conectado e isla, coordinar protecciones, controlar la potencia reactiva o evaluar la calidad de energía en el punto común de acoplamiento. Además, la evolución de los convertidores de potencia hacia nodos de operación “grid-following” y “grid- forming” exige considerar funciones adicionales en el nodo, como el soporte de tensión y frecuencia, la detección adecuada de isla y la limitación de corriente de falla, todo ello en coherencia con el comportamiento global de la microrred (Sara Anttila J. S., 2022). La falta de una solución integrada limita tanto el potencial pedagógico del laboratorio como la posibilidad de realizar investigación aplicada en condiciones representativas.

En respuesta a este contexto, el trabajo de grado plantea el diseño, implementación y validación de un nodo de conexión para la integración de un sistema de generación solar fotovoltaica en la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El proyecto se orienta a definir los requisitos técnicos y normativos del nodo, modelar y simular su comportamiento dentro de la microrred, seleccionar y montar los componentes necesarios, y verificar su desempeño mediante pruebas controladas de laboratorio. El documento se organiza de forma que, tras esta introducción y el planteamiento del problema, se presenta la justificación y los objetivos, se desarrolla un marco de referentes teóricos sobre microrredes, integración fotovoltaica, control y protección, y se expone la descripción técnica del nodo propuesto. Posteriormente, se detalla la metodología de desarrollo experimental, los recursos necesarios, el cronograma de actividades y los resultados esperados, de modo que la propuesta quede debidamente fundamentada y lista para su ejecución en el entorno académico de la microrred didáctica.

# 1. Planteamiento del problema

## 1.1 Descripción

De acuerdo con (Dan T. Ton, 2012), las microrredes se definen como “un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos dentro de límites eléctricos claramente definidos”, capaces de operar de forma conectada a la red principal o en modo isla, según las condiciones del sistema y los requerimientos de operación. En este contexto, el problema central que aborda este trabajo radica en la necesidad de especificar, diseñar y materializar un nodo de conexión estructurado que permita integrar un sistema de generación fotovoltaica a la microrred didáctica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, garantizando seguridad eléctrica, conformidad regulatoria, continuidad operativa y calidad de energía, tanto en escenarios reales como simulados.

Actualmente, la microrred didáctica no cuenta con una interfaz o punto de acoplamiento diseñado bajo criterios técnicos estandarizados. La integración de fuentes renovables se ha resuelto mediante montajes provisionales, con capacidades limitadas para gestionar la transición segura entre modos de operación conectado e isla, coordinar esquemas de protección, controlar la inyección de potencia reactiva o evaluar parámetros de calidad de energía en el Punto Común de Acoplamiento (PCC). Esta carencia genera incertidumbre técnica, restringe el potencial pedagógico del laboratorio y limita la posibilidad de realizar investigación aplicada en condiciones representativas de la realidad industrial (Sara Anttila J. S., 2022).

En términos operativos, el nodo debe resolver la transición entre nodos conectados a red y en isla, gestionar flujos bidireccionales de potencia y asegurar protecciones selectivas que eviten corrientes de falla propagadas y energización inadvertida. Esta necesidad responde a la definición funcional de la microrred como entidad controlable en sus límites eléctricos y exige un punto de acoplamiento técnicamente gobernado para pruebas, con medición, aislamiento visible y sincronismo para reconexión segura ((IEEE), 2018).

En el contexto normativo colombiano, la CREG, actualizó el régimen de autogeneración y generación distribuida con la Resolución CREG 174 de 2021, que derogó la resolución CREG 030 de 2018 y definió reglas y procedimientos de conexión, medición

y operación para AGPE/GD. La falta de alineación del nodo con esta regulación expone el proyecto a incumplimientos en metrología, protecciones, límites de aportes de cortocircuito y responsabilidades operativas con el Operador de Red (CREG C. d., 2021).

Adicionalmente, la política de transición energética nacional, consolidada en la Ley 2099 de 2021 —que modifica la Ley 1715—, reconoce y regula la integración de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) en el Sistema Interconectado Nacional. Esta normativa exige que cualquier punto de conexión cumpla con criterios técnicos que garanticen la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico. Un nodo mal definido o no estandarizado impide demostrar conformidad con estos requisitos vigentes, afectando la trazabilidad académica y el aprendizaje basado en evidencia y normativa legal (Colombia, 2021).

Por otra parte, las exigencias de interconexión e interoperabilidad para recursos energéticos distribuidos establecidas por IEEE 1547-2018 —incluida la posibilidad de islas intencionales y la coordinación con el operador del sistema— determinan capacidades mínimas del punto de conexión: respuesta en tensión y frecuencia, ride-through, anti-islanding, coordinación con reconectadores y límites de inyección de corriente continua y armónicos. Cuando el nodo no incorpora estas funciones y criterios, la microrred queda limitada a prácticas de laboratorio sin equivalencia con condiciones reales de red (Flores-Espino, 2020).

Asimismo, el RETIE y el Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 condicionan el diseño físico del nodo: dispositivos de seccionamiento con corte visible, coordinación de protecciones, puesta a tierra efectiva, canalizaciones, identificación y distancias de seguridad, además de rotulado y documentación técnica. En un entorno didáctico, el incumplimiento de estos requisitos incrementa el riesgo eléctrico y reduce la validez de los ensayos desde la perspectiva de seguridad y de replicabilidad (Ministerio de Minas y Energía de Colombia).

NREL sintetiza que, frente a la versión de 2003 y su enmienda de 2014, la revisión de 2018 exige nuevas capacidades en inversores y sistemas de control en el punto de conexión: “El sistema de generación distribuida (DER) deberá proporcionar capacidad de regulación de voltaje mediante cambios en la potencia reactiva”, además de ride-through de perturbaciones y respuesta de frecuencia según categorías de desempeño. Por ello, el nodo

debe prever medición, ajuste y verificación de nodos volt-VAR, watt-VAR y coordinación con el operador de la microrred para parametrización y pruebas (David Narang, 2019)

Finalmente, el componente metrológico y de tramitación es parte del problema: la conexión didáctica debe reproducir expedientes de solicitud, estudios, ensayos de conformidad y esquemas de medición bidireccional que hoy exigen los operadores en AGPE/GD, de modo que el nodo sirva como plataforma de práctica para diagnóstico, puesta en servicio y operación normal de un recurso fotovoltaico en baja tensión. Sin este enfoque, el laboratorio pierde su correspondencia con procesos reales de conexión y no desarrolla competencias reglamentarias (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

### 1.1.2 Limitaciones

El proyecto presenta las siguientes limitaciones, definidas por el alcance técnico, normativo y de infraestructura:

No incluye el diseño mecánico ni la construcción física del campo de paneles solares, centrándose exclusivamente en el punto de acoplamiento y acondicionamiento de potencia.

No abarca el diseño de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS), aunque el nodo contemplará la compatibilidad para su futura integración.

No se considerarán condiciones de operación en niveles de tensión superiores a 1000 V, ni aplicaciones para el Sistema Interconectado Nacional en niveles de transmisión o subtransmisión.

La validación experimental estará sujeta a las características y disponibilidad de los equipos de medición y simulación con que cuente el laboratorio de la institución.

Se trabajará bajo la normativa vigente hasta la fecha de desarrollo del proyecto, sin cubrir modificaciones regulatorias que se expidan con posterioridad a la etapa de recolección de información.

### 1.1.3 Consecuencias

La ausencia de un diseño estructurado para el nodo de conexión genera consecuencias técnicas, académicas y de seguridad relevantes:

**Riesgo eléctrico y operativo:** El uso de configuraciones improvisadas aumenta la probabilidad de fallas de aislamiento, coordinación deficiente de protecciones, operación en isla no intencional y exposición de personal a riesgos eléctricos, contraviniendo principios fundamentales del RETIE.

**Desactualización académica:** Si la enseñanza no refleja los requisitos actuales de la Resolución CREG 174 de 2021 ni las funciones modernas de los inversores inteligentes, la formación de los estudiantes pierde pertinencia, ya que egresan sin conocer los procedimientos y exigencias que encontrarán en el ejercicio profesional.

**Limitación en investigación:** Sin una plataforma estandarizada, no es posible realizar estudios reproducibles sobre calidad de energía, estabilidad o estrategias de control, limitando el desarrollo de semilleros de investigación y la capacidad de la institución para generar conocimiento aplicado.

**Incompatibilidad técnica:** Diseños no alineados con la norma IEEE 1547 pueden generar problemas de interoperabilidad, distorsión de la señal y comportamientos inestables que dañen los equipos de la microrred o impidan su funcionamiento conjunto.

## 1.2 Formulación

¿Cómo diseñar, implementar y validar, en la microrred didáctica de la I.U. Pascual Bravo, un nodo de conexión para un sistema de generación solar fotovoltaico que cumpla los requisitos técnicos y regulatorios vigentes en Colombia y asegure operación segura, calidad de energía y capacidad de ensayo en nodos conectados a red e isla?

## 2. Justificación

La intervención propuesta se justifica en primer lugar por su valor formativo. Un nodo de conexión entre un sistema fotovoltaico y una microrred didáctica crea un entorno controlado para desarrollar competencias profesionales en análisis de sistemas eléctricos, protección, calidad de energía y operación en nodos conectados a red e isla. En el ámbito de la enseñanza de la ingeniería, disponer de un punto de acoplamiento gobernado permite que el aprendizaje sea situado, reproducible y evaluable. La microrred deja de ser un conjunto aislado de equipos y se convierte en un sistema coherente donde el estudiantado y el profesorado contrastan especificaciones, validan hipótesis y documentan resultados con trazabilidad. La pertinencia pedagógica se refuerza al articular la práctica con contenidos de conversión de potencia, protecciones, normatividad y gestión de la seguridad, integrando teoría y laboratorio en un mismo dispositivo de ensayo.

En segundo término, la justificación es regulatoria y de conformidad técnica. El nodo de conexión es la pieza donde se expresan y verifican requisitos exigibles al acoplar recursos energéticos distribuidos: límites de inyección, coordinación de protecciones, medición adecuada y responsabilidades operativas. Diseñarlo conforme al marco colombiano reduce riesgos de incumplimiento en autogeneración y generación distribuida, y permite simular expedientes y pruebas que después se exigen en campo. Armonizar el diseño con la Resolución CREG 174 de 2021 y con las prescripciones de seguridad eléctrica aporta validez externa a los ejercicios académicos y habilita la transferencia de resultados a contextos reales de baja tensión (CREG G. N., 2021).

En tercer lugar, la pertinencia es operativa y económica. La ausencia de un nodo estandarizado limita el uso de la microrred a prácticas fragmentadas y encarece la preparación de montajes ad hoc, mientras que un punto de conexión diseñado como “banco de prueba” estabiliza procedimientos, acorta tiempos de alistamiento y disminuye reprocesos. La solución propuesta facilita la depuración de secuencias de maniobra, la evaluación de curvas de respuesta de inversores, la comprobación de esquemas anti–isla y la verificación de perturbaciones típicas, lo que reduce incertidumbre técnica y mejora el rendimiento pedagógico del laboratorio. También permite documentar costos y

requerimientos de implementación, información clave para decisiones de inversión y para proyectos de extensión con pymes o instituciones educativas.

Además, el proyecto se alinea con la transición energética y con la evolución normativa de las fuentes no convencionales. Diseñar el nodo como plataforma de pruebas y formación fortalece capacidades locales para integrar generación distribuida con criterios de seguridad, continuidad y calidad, contribuyendo a la preparación del talento que el sector requiere. La Ley 2099 de 2021 actualiza el marco de promoción y adopción de tecnologías limpias y crea un contexto de mayor despliegue de sistemas fotovoltaicos; por tanto, una microrred académica que reproduce vínculos, procedimientos y requisitos regulatorios agrega pertinencia social y académica a la formación en ingeniería (Colombia, 2021).

Por otra parte, la justificación es técnica en sentido estricto: el nodo permite instrumentar y evaluar funciones de interconexión hoy esperables en recursos energéticos distribuidos, incluyendo respuesta volt–VAR, ride–through y coordinación de reconexión. Incorporar estas capacidades en el punto de acoplamiento habilita prácticas de ensayo comparables con condiciones reales y potencia en la investigación aplicada en calidad de energía, control y protecciones. Disponer de un dispositivo que permita parametrizar, medir y contrastar estas funciones dentro de un entorno seguro y reproducible fortalece el cierre de brechas entre aula, laboratorio y exigencias de campo (David Narang, 2019).

Finalmente, la población que se beneficia es amplia y diferenciada. En el núcleo, se benefician estudiantes de pregrado y posgrado en ingeniería eléctrica, electrónica y afines, quienes consolidan conocimientos operativos y normativos sobre conexión de generación distribuida. El profesorado dispone de una plataforma estable para diseñar prácticas, proyectos integradores y evaluación por competencias. Los semilleros y grupos de investigación ganan un banco reproducible para probar algoritmos de control, esquemas de protección y estrategias de gestión de energía. Hacia fuera, operadores de red, empresas instaladoras y pequeñas organizaciones pueden participar en actividades de extensión y formación continua, accediendo a evidencia experimental y a protocolos que reducen

riesgos en implementación. En conjunto, la microrred con nodo de conexión dota a la comunidad académica y al entorno productivo de un recurso tangible para acelerar la adopción segura de tecnologías fotovoltaicas.

# 3. Objetivos

## 3.1 Objetivo general

Diseñar un nodo de conexión para integrar un sistema de generación solar fotovoltaico a la microrred didáctica de la I.U. Pascual Bravo, con cumplimiento de requisitos técnicos y regulatorios vigentes, operación segura, calidad de energía y capacidad de ensayo en nodos conectado a la red e isla.

## 3.2 Objetivos específicos

Especificar los requisitos técnicos, funcionales y regulatorios del nodo de conexión, con parámetros de protección, medición, sincronismo y criterios de calidad de energía aplicables a la microrred didáctica.

Implementar el nodo de conexión en la microrred didáctica mediante la selección de equipos, cableado, disposición física, documentación de maniobras y de seguridad eléctrica.

Validar el desempeño del nodo de conexión en modos conectado a red e isla mediante protocolos de prueba y registro de resultados sobre continuidad operativa, selectividad de protecciones y métricas de calidad de energía

# 4. Referentes teóricos

## 4.1 Integración fotovoltaica y arquitectura del nodo de conexión en microredes

Con base a: (Sara Anttila J. S., 2022), la creciente penetración de recursos basados en convertidores obliga a que el punto de acoplamiento común (PCC) y los nodos de conexión de generación distribuida asuman funciones de regulación primaria, soporte de tensión y frecuencia en topologías de microrred, donde coexisten convertidores “grid-following” (GFL) y “grid-forming” (GFM) en modo conectado e isla. En su revisión se afirma que “Los inversores formadores de red amortiguan las fluctuaciones de frecuencia en el sistema eléctrico, mientras que los inversores seguidores de red pueden agravar los problemas de frecuencia con una mayor penetración” (p. 1), de modo que el diseño del nodo de conexión debe contemplar control local, medición en el PCC y coordinación con almacenamiento para cubrir reservas de regulación. Además, en un sistema 100% basado en convertidores, los GFM fijan la referencia de tensión y frecuencia en la microrred y requieren energía despachable, generalmente de baterías, lo que condiciona el dimensionamiento del nodo de conexión y su interfaz DC/AC. En síntesis, el nodo integra: i) seccionamiento y protección en media/baja tensión, ii) medición fasorial y estimación de estado local, iii) control del inversor y sus límites de corriente, por último, iv) sincronización y funciones de soporte (volt-var y freq-watt).

En términos operativos, este nodo implementa estrategias de control primario utilizadas de forma extendida en microrredes de corriente alterna, donde el reparto de potencias puede representarse con relaciones de caída (droop): $\omega = \omega_0 - m_p (P - P_0)$ y $V = V_0 - nq(Q - Q_0)$. Estas relaciones permiten que varias unidades compartan carga sin comunicación rápida, a costa de pequeños desvíos de frecuencia y tensión que luego corrige el control secundario. Por otra parte, la clasificación funcional de convertidores —GFL como fuentes de corriente sincronizadas mediante PLL y GFM como fuentes de tensión con impedancia de salida baja— orienta la selección de algoritmos, filtros LCL y esquemas de transición conectado/isla requeridos en el nodo para asegurar continuidad de servicio. Este encuadre, ampliamente documentado en la literatura reciente, justifica que el diseño del

nodo incorpore trayectorias de operación explícitas para modos GFL y GFM y su conmutación segura

## 4.2 Control y sincronización: seguimiento de red, formación de red y anti-isla

Por su parte, (Alexandre Serrano-Fontova, 2022),sostienen que la detección y mitigación de isla no intencional sigue siendo un requisito técnico relevante para nodos con inversores conectados a microrredes, pues “La perturbación inyectada puede degradar la calidad de la energía durante el funcionamiento conectado a la red” (p. 2); en su revisión comparan técnicas pasivas, activas e híbridas y su impacto sobre la calidad de energía y el tamaño de zonas no detectadas, lo cual incide en la selectividad de protección. En nodos con alto acoplamiento electrónico, la sincronización basada en PLL del convertidor GFL condiciona la estabilidad transitoria: perturbaciones de secuencia negativa, distorsión armónica o debilidad de red pueden forzar pérdidas de sincronismo si el lazo externo y los límites de corriente no están coordinados con el control interno. Estas consideraciones conducen a especificar, en el nodo, rangos de impedancia vista desde el PCC, límites de corriente, y curvas volt-var/freq-watt consistentes con la microrred.

Adicionalmente, la literatura reciente sobre estabilidad transitoria de convertidores GFL enfatiza la necesidad de modelar acoples entre lazos (corriente, potencia y PLL) y las no linealidades que introducen los limitadores de corriente durante fallas. (Yang Liu, Transient Synchronization Stability in Grid-Following Converters: Mechanistic Insights and Technological Prospects—A Review, 2025) sistematizan marcos de modelado y criterios de estabilidad que trasladan herramientas clásicas del generador síncrono — criterio de áreas iguales, retratos de fase y Lyapunov— a convertidores, y destacan que los análisis que ignoran el acoplamiento con lazos externos o con otros convertidores pueden sobrestimar los márgenes de sincronización en redes con múltiples unidades en paralelo. Esta evidencia respalda que el nodo incorpore controladores con ganancias robustas frente a red débil y estrategias de “fault-ride-through” coordinadas con la protección de la microrred.

### 4.2.1. Protección y coordinación en microredes con alta electrónica de potencia

Asimismo, (Feras Alasali, 2023), describen que la irrupción de DER en redes de distribución rompe supuestos radiales y compromete la selectividad temporal y direccional de esquemas tradicionales; indican que, al migrar a topologías con microrredes e inversión elevada de inversion elevada de DER, “traditional protective schemes become inappropriate for modern DN interconnected to DERs” (p. 8). Para el nodo de conexión, esto implica que los niveles y sentidos de corriente de falla varían con la topología y el modo de operación (conectado/isla), por lo que debe preverse: i) coordinación entre sobrecorrientes direccionales y elementos de respaldo, ii) sensibilidad suficiente ante corrientes de falla limitadas por los inversores, iii) detección fiable de isla no intencional sin disparos espurios, por último, iv) verificación de los tiempos de despeje considerando la contribución dinámica del almacenamiento y los límites de corriente del inversor. En síntesis, la especificación del nodo debe alinearse con estrategias de protección adaptativa, que ajusten curvas tiempo-corriente, direccionalidad y umbrales en función del modo operativo y de los flujos bidireccionales característicos de microrredes.

De igual modo, las contribuciones de convertidores al cortocircuito —acotadas por control— pueden invisibilizar fallas para protecciones convencionales aguas abajo; el propio análisis de (Feras Alasali, 2023) recaba evidencias de ceguera de protección y pérdida de coordinación cuando múltiples fuentes inverter-based alimentan barras con cargas no lineales y variaciones de impedancia, recomendando relés de sobrecorriente direccional, elementos de distancia adaptativos o esquemas basados en componentes de secuencia para restaurar selectividad. En el nivel del nodo FV, esto se traduce en exigir curvas de límite de corriente y algoritmos de control que permitan tanto la contribución transitoria necesaria al “ride-through” como la rápida discriminación de contingencias locales sin disparos erráticos del resto de la microrred.

### 4.2.2. Calidad de energía y armónicos en el PCC

Además, la evidencia empírica reciente muestra que la distorsión armónica total (THD) en corriente y tensión en el PCC depende del nivel de generación FV, la robustez

del control del inversor y la composición de cargas. (E. Hernández-Mayoral, 2024), documentan en un caso con microrred híbrida que los armónicos de corriente asociados al sistema FV se correlacionan con el nivel de generación y pueden mantenerse por debajo de umbrales de referencia cuando la inyección es alta y el control del convertidor es efectivo; textualmente, “Los armónicos de corriente generados por el sistema fotovoltaico dependen en gran medida del nivel de generación; es decir, a un nivel de generación alto, la distorsión armónica es relativamente baja (<5%).”. Este tipo de resultados respalda que el nodo integre funciones volt-var, filtros pasivos o activos y, cuando proceda, compensación selectiva en bandas de supra armónicos.

Por otra parte, la interacción entre límites de corriente de convertidores GFM y la dinámica de red puede introducir armónicos durante y después de perturbaciones. (Nathan Baeckeland, 2024), sintetizan que los limitadores —directos o indirectos— protegen el hardware, pero “determinan el comportamiento del inversor durante y después de una perturbación fuera de nominal”, con “impacto profundo” en estabilidad transitoria, protección y recuperación, lo que obliga a diseñar y parametrizar al nivel de sistema, no solo del dispositivo (p. 14493). Para un nodo de conexión solar, esto implica especificar el tipo de limitador, su orientación reactiva efectiva y la coordinación con la estrategia volt-var para que la contención de corriente no degrade la amortiguación de oscilaciones ni la calidad de onda en el PCC, priorizando tiempos de recuperación y compatibilidad con la coordinación de protecciones de la microrred.

Finalmente, el control de seguimiento de red también condiciona la calidad en régimen transitorio. La revisión de (Yang Liu, Transient Synchronization Stability in Grid-Following Converters: Mechanistic Insights and Technological Prospects—A Review, 2025), resaltan que los modelos de estabilidad de sincronismo basados en PLL deben ampliarse para capturar el acoplamiento con lazos externos y el efecto de los limitadores, especialmente en sistemas con múltiples convertidores en paralelo, pues omitir estas interacciones conduce a valoraciones optimistas de estabilidad y, en consecuencia, a especificaciones del nodo que no cubren escenarios realistas de falla o red débil. En consecuencia, el esquema de conexión debe incluir pruebas tipo-hardware-in-the-loop o modelado en dominio de tiempo que validen el desempeño del nodo frente a desequilibrios,

distorsión y eventos de baja tensión, con criterios cuantitativos de THD, flicker y desequilibrios coherentes con la operación en microrred.

# 5. Metodología

## 5.1 Tipo de proyecto

En este trabajo de grado se asume el desarrollo como un proyecto de desarrollo experimental, en la medida en que se parte de teorías consolidadas sobre microrredes, conversión fotovoltaica y sistemas de protección eléctrica para materializarlas en un nuevo nodo de conexión solar aplicado a una microrred didáctica concreta. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2015), el desarrollo experimental se caracteriza por ser un trabajo sistemático que se apoya en conocimientos derivados de la investigación y de la experiencia práctica con el propósito de generar nuevos productos, procesos o servicios, o de mejorar significativamente los existentes. El proyecto no se limita a un análisis teórico, sino que formula especificaciones, realiza cálculos eléctricos, selecciona equipos, construye un prototipo y evalúa su desempeño en condiciones controladas, lo que se ajusta al carácter apropiado y orientado a un resultado tecnológico verificable propio de esta clase de proyectos.

Por otra parte, los productos del trabajo se alinean con la noción de laboratorio de microrred educativa, en el que se articulan recursos renovables, electrónica de potencia y esquemas de protección para fines de formación y experimentación. Como señalan (Gabriel Nasser Doyle de Doile, 2025), el diseño de una microrred de laboratorio para educación en ingeniería eléctrica implica un estudio de factibilidad técnico–económica, la selección de recursos de generación, el modelado del sistema y la implementación de una plataforma que permita reproducir condiciones de operación reales en un entorno académico. El nodo de conexión fotovoltaico propuesto se sitúa en esta lógica, ya que se concibe como un subsistema que debe cumplir requisitos de seguridad, calidad de energía y maniobrabilidad, y al mismo tiempo servir como herramienta práctica para el aprendizaje de conceptos de microrredes en la Institución Universitaria Pascual Bravo.

En síntesis, aunque el proyecto incorpora actividades típicas de la investigación aplicada, como la revisión del estado del arte y el análisis de normas técnicas, la estructura

central del trabajo responde a un desarrollo experimental: se definen requerimientos, se modela el sistema, se dimensionan componentes, se construye un prototipo y se someten sus funciones a verificación sistemática. Esta secuencia es coherente con la clasificación propuesta en el Manual de Frascati para proyectos que transforman conocimiento disponible en soluciones tecnológicas específicas y evaluables en un contexto definido, en este caso una microrred didáctica de baja tensión orientada a la enseñanza de sistemas de energía eléctrica.

## 5.2 Método

En relación con el primer objetivo específico, orientado a caracterizar los requerimientos técnicos, normativos y de operación del nodo de conexión solar en la microrred, el método contempla una fase inicial de identificación de condiciones de borde. En esta fase se recopilarán los parámetros eléctricos de la microrred didáctica existente (niveles de tensión, capacidad de cortocircuito, topología de barras, esquemas de protección y modos de operación conectado e isla), así como la información de los generadores y cargas asociados. De forma complementaria, se realizará una revisión de normas y guías técnicas aplicables a la conexión de generación distribuida fotovoltaica en microrredes de baja tensión, con especial atención a requisitos de calidad de energía, coordinación de protecciones y límites de inyección de potencia activa y reactiva. Esta revisión se articulará con el análisis de literatura reciente sobre evaluación del desempeño de microrredes, donde se definen capacidades y se clasifican métricas pertinentes para medir el comportamiento de sistemas con alta penetración de generación distribuida. A partir de este insumo se elaborará un pliego de requisitos del nodo, que incluirá niveles admisibles de tensión y corriente, condiciones de operación en régimen permanente y transitorio, y la compatibilidad con la infraestructura existente en el laboratorio.

Respecto al segundo objetivo específico, centrado en el diseño, modelado e implementación del nodo de conexión fotovoltaico, el método establece una serie de actividades encadenadas. En primer lugar, se modelará una microrred típica que represente la configuración de la instalación didáctica, incorporando barras, líneas, cargas, inversor

fotovoltaico y elementos de protección asociados al punto común de acoplamiento. Sobre este modelo se definirán las ecuaciones y tablas necesarias para dimensionar conductores, elementos de maniobra, dispositivos de protección y sistemas de medición, empleando criterios de capacidad de corriente, caída de tensión, selectividad y coordinación de protecciones. Posteriormente, se asignarán valores de trabajo a las fórmulas del modelo con base en los datos reales de los equipos disponibles y en escenarios representativos de irradiancia, temperatura y demanda de carga. Con estos resultados se seleccionarán los componentes comerciales del nodo, se elaborarán diagramas unifilares y de control, se procederá al montaje físico del prototipo en el laboratorio siguiendo procedimientos de seguridad eléctrica y protocolos institucionales para trabajo en baja tensión.

En cuanto al tercer objetivo específico, relativo a la validación del desempeño del nodo de conexión solar, el método combina simulación y ensayo experimental. Primero se simulará el modelo de la microrred con el nodo integrado, considerando distintos escenarios de operación: variación de irradiancia, conexión y desconexión del nodo, cambios en el nodo conectado–isla y perturbaciones simples en la red. A continuación, se definirá una campaña de pruebas de laboratorio que incluya la medición de tensiones, corrientes, potencias activa y reactiva, así como indicadores básicos de calidad de energía en el punto común de acoplamiento. Como señalan Rey et al. (2023), la evaluación del desempeño de microrredes requiere seleccionar métricas acordes con las capacidades que se desea analizar, tales como continuidad del suministro, estabilidad de tensión, aprovechamiento de recursos renovables y respuesta ante eventos de red. Con base en estas orientaciones se establecerán criterios de aceptación para el nodo, se registrarán los resultados en formatos estandarizados y se realizará un contraste entre el comportamiento simulado y el observado experimentalmente, identificando desviaciones y posibles ajustes de diseño.

## 5.3 Instrumentos de recolección de información.

### 5.3.1. Fuentes primarias.

Las fuentes primarias de información del proyecto estarán constituidas por los datos generados directamente en el proceso de diseño, implementación y validación del nodo de conexión fotovoltaico. En esta categoría se incluyen las mediciones eléctricas realizadas en el laboratorio sobre la microrred y el nodo, tales como registros de tensiones y corrientes en el punto común de acoplamiento, formas de onda durante eventos de conexión y desconexión, series temporales de potencias activa y reactiva en distintos escenarios de carga y generación.

Adicionalmente, se considerarán como fuentes primarias los archivos de simulación obtenidos con el software seleccionado (por ejemplo, modelos en entornos de análisis de sistemas de potencia), los cuales contienen las respuestas del sistema ante variaciones de parámetros y condiciones de operación. Estos datos se complementarán con bitácoras de ensayo, actas de pruebas, registros fotográficos del montaje, que permiten documentar decisiones de diseño, configuraciones de equipos y condiciones de las pruebas. En la medida en que estos instrumentos se integran con capacidades de monitoreo y comunicación, la experiencia reciente en el diseño de sistemas de supervisión para microrredes de laboratorio muestra que la definición sistemática de pruebas y la captura estructurada de datos son fundamentales para validar nuevas soluciones de control y operación

### **5.3.2. Fuentes secundarias**.

Las fuentes secundarias comprenden el conjunto de documentos materiales de consulta que sirven de soporte teórico, metodológico y normativo al desarrollo del proyecto. En este grupo se incluyen artículos científicos, capítulos de libro y revisiones sistemáticas sobre diseño, operación, control y evaluación de microrredes, con énfasis en trabajos recientes que abordan la integración de generación fotovoltaica, la selección de métricas de desempeño y la implementación de microrredes en contextos educativos. Igualmente, se emplearán como fuentes secundarias normas técnicas, reglamentos de conexión de generación distribuida y manuales de los fabricantes de equipos, que aportan criterios de diseño y operación aplicables al nodo de conexión.

Como señalan (Farheen Bano, 2024), la integración de microrredes en entornos académicos demanda combinar marcos conceptuales actualizados con herramientas de

modelado y experimentación, de modo que los estudiantes y desarrolladores puedan relacionar decisiones de diseño con el comportamiento real de los sistemas. Todos estos materiales serán organizados en una matriz bibliográfica y normativa que permita rastrear de forma explícita qué decisiones de diseño, selección de componentes, criterios de simulación o protocolos de ensayo se apoyan en cada referencia empleada.

# 6. Resultados

El proyecto propone un nodo de conexión que actúa como interfaz controlada entre un subsistema fotovoltaico y la microrred didáctica. El principio operativo se basa en la conversión DC/AC y en la gestión coordinada de potencia activa y reactiva en el punto de acoplamiento común. El nodo integra: i) etapa de acondicionamiento en corriente continua, con agrupación de cadenas FV y seguimiento del punto de máxima potencia; ii) bus de continua con almacenamiento opcional para soporte transitorio, iii) inversor bidireccional con filtros de salida y funciones de control primario, iv) gabinete de protección y seccionamiento con corte visible, sincronoscopio y verificación de ausencia de tensión; v) medición bidireccional de energía y de variables eléctricas de calidad de suministro; vi) unidad de control local con lógica de cambio de nodo y comunicaciones hacia el sistema de supervisión de la microrred. En operación normal, la energía generada por los módulos se regula en DC, se inyecta a través del convertidor y se gestiona en el PCC con consignas de factor de potencia o curvas volt-VAR, manteniendo límites de corriente y distorsión armónica establecidos para el laboratorio.

El nodo contempla dos regímenes principales de trabajo. En modo conectado a red, el inversor opera como seguidor de red sincronizando fase y frecuencia con el PCC, despachando potencia activa según disponibilidad solar y consignas, mientras modula potencia reactiva para soporte de tensión dentro de márgenes definidos. En modo isla, el inversor asume funciones de formación de red, establece una referencia de tensión y frecuencia para la microrred didáctica y reparte cargas con otras fuentes mediante leyes de caída, coordinándose con el almacenamiento para cubrir transitorios, arranques de cargas y eventos de cortas variaciones de irradiancia. La arquitectura prevé parámetros ajustables para ambas filosofías de control y un mecanismo de selección que evita conmutaciones intempestivas, de forma que los estados internos del convertidor y las condiciones del PCC permanezcan dentro de zonas seguras en cada transición.

La transición entre nodos se ejecuta siguiendo una secuencia de sincronización y transferencia que protege equipos y garantiza continuidad aceptable del servicio. Antes de acoplarse en paralelo con la microrred en modo conectado, el nodo verifica tensión, frecuencia y ángulo de fase dentro de tolerancias predefinidas, ajusta consignas y rampas de

corriente, y cierra el dispositivo de acople bajo condición de sincronismo. Para el desacople, la lógica ordena reducción progresiva de potencia, apertura del interruptor y estabilización del control interno. En reconexión desde isla, el inversor sincroniza su referencia con la red aguas arriba por seguimiento o forzando una condición de "soft-synchronization" que limita corrientes transitorias, y solo entonces transfiere el suministro a la condición conectada. El procedimiento incluye interbloqueos, temporizaciones y sondas de estado que impiden maniobras si no se cumplen los criterios eléctricos definidos.

El esquema de protección del nodo combina funciones independientes en continua y alterna con elementos de coordinación hacia la microrred. En el lado DC se incluyen seccionamiento por polo, protección contra sobrecorriente y sobretensión transitoria; supervisión de aislamiento frente a tierra; en el lado AC se instalan interruptores automáticos y/o reconectadores con unidades de protección programables para sobrecorriente, desequilibrio, subtensión y sobrefrecuencia, además de un sistema de detección de isla no intencional que cruza criterios locales de tensión, frecuencia y tasa de cambio con lógicas de soporte de red. La selectividad se define considerando que los convertidores limitan corrientes de falla, por lo que se privilegia temporización direccional, sensibilidad en baja corriente y elementos de respaldo que garanticen despeje en escenarios de red débil. Todo el conjunto se distribuye en tableros con barreras físicas, señalización de riesgo y accesos controlados para prácticas académicas.

El aseguramiento de calidad de la energía y la metrología se resuelve con filtrado, control y medición adecuados. El filtro de salida del inversor se dimensiona para cumplir con distorsión armónica total objetivo en el PCC y para restringir emisiones de supra armónicos dentro del entorno de laboratorio. Las funciones de control reactivo operan mediante curvas parametrizables para soporte de tensión, con límites que evitan saturación de corriente. La medición incluye energía activa y reactiva en ambas direcciones, así como registro de tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, distorsión y eventos, con almacenamiento local y transmisión a la plataforma de supervisión. El sistema de adquisición permite exportar series de tiempo para análisis de desempeño, estudios de coordinación de protecciones y evaluación de estrategias de control, proporcionando evidencias reproducibles para docencia e investigación.

La implementación física se organiza en módulos estandarizados y accesibles para prácticas, con canalizaciones, puesta a tierra funcional y distribución interna que reduzca acoplamientos no deseados. El gabinete principal aloja la electrónica de potencia, protecciones, medición y control, mientras que el campo FV y el eventual almacenamiento se conectan por bandejas y canaletas segregadas según nivel de tensión. La puesta en servicio sigue un plan de pruebas escalonado: verificación de continuidad y aislamiento, energización de control y comunicaciones, pruebas en vacío, ensayos con cargas resistivas y reactivas, validación de límites de corriente y de calidad de onda, y, por último, pruebas de transición conectado-isla y de reconexión. El resultado esperado es un nodo de conexión que opere con estabilidad en ambos modos, mantenga niveles de seguridad y calidad acordes con el laboratorio y brinde una plataforma de experimentación para diferentes escenarios de generación, carga y configuración de la microrred.

Como primer resultado, se proyecta la entrega del diseño integral del nodo de conexión para la microrred didáctica, con un conjunto de documentos técnicos coherentes y auditables. Este paquete incluirá el diagrama unifilar general y los esquemas de detalle en continua y alterna; la memoria de cálculo de corrientes, caídas de tensión, capacidad de interrupción y coordinación básica de protecciones; la especificación funcional del inversor y de los dispositivos de medición, seccionamiento y maniobra; la arquitectura de control para los nodos conectados a red e isla; y la matriz de requisitos de desempeño alineada con los criterios del laboratorio (tensiones nominales, rangos operativos, límites de distorsión y restricciones de corriente). Adicionalmente, quedará definido el listado de materiales con referencias equivalentes, criterios de instalación y pruebas de aceptación, así como el plan de puesta en servicio a nivel de banco de pruebas. Este bloque de resultados cerrará con un documento de trazabilidad que relacione cada requisito con su evidencia de diseño, de modo que la verificación posterior sea directa y reproducible.

En relación con el primer objetivo específico, orientado a caracterizar los requerimientos El límite establecido para hacer seguimiento de las capacidades nominales de los AGPE y GD en un mismo circuito de nivel de tensión 1 respecto de la capacidad del transformador, fue modificado en la propuesta de Resolución CREG 002 de 2021, y se aumentó del 15% (Resolución 030 de 2018) al 50% técnicos, normativos y de operación del nodo de conexión solar en la microrred, el método contempla una fase inicial de

identificación de condiciones de borde. En esta fase se recopilarán los parámetros eléctricos de los módulos de generación fotovoltaica (niveles de tensión, capacidad de cortocircuito, topología de barras, esquemas de protección y modos de operación conectado e isla), así como la información de los generadores y cargas asociados.

Tabla 1.
*Resultados del proyecto*

| Ja Solar | |
|---|---|
| Referencia | JAM66D45595/lb |
| Potencia [W] | 595 |
| Voc [V] | 47,5 |
| Vmp [V] | 39,27 |
| Shirt Circuit Current ISC [A] | 15,9 |
| Maximum Power Current Imp [A] | 15,15 |
| Eficiencia [%] | 22 |

Fuente. Diseño propio

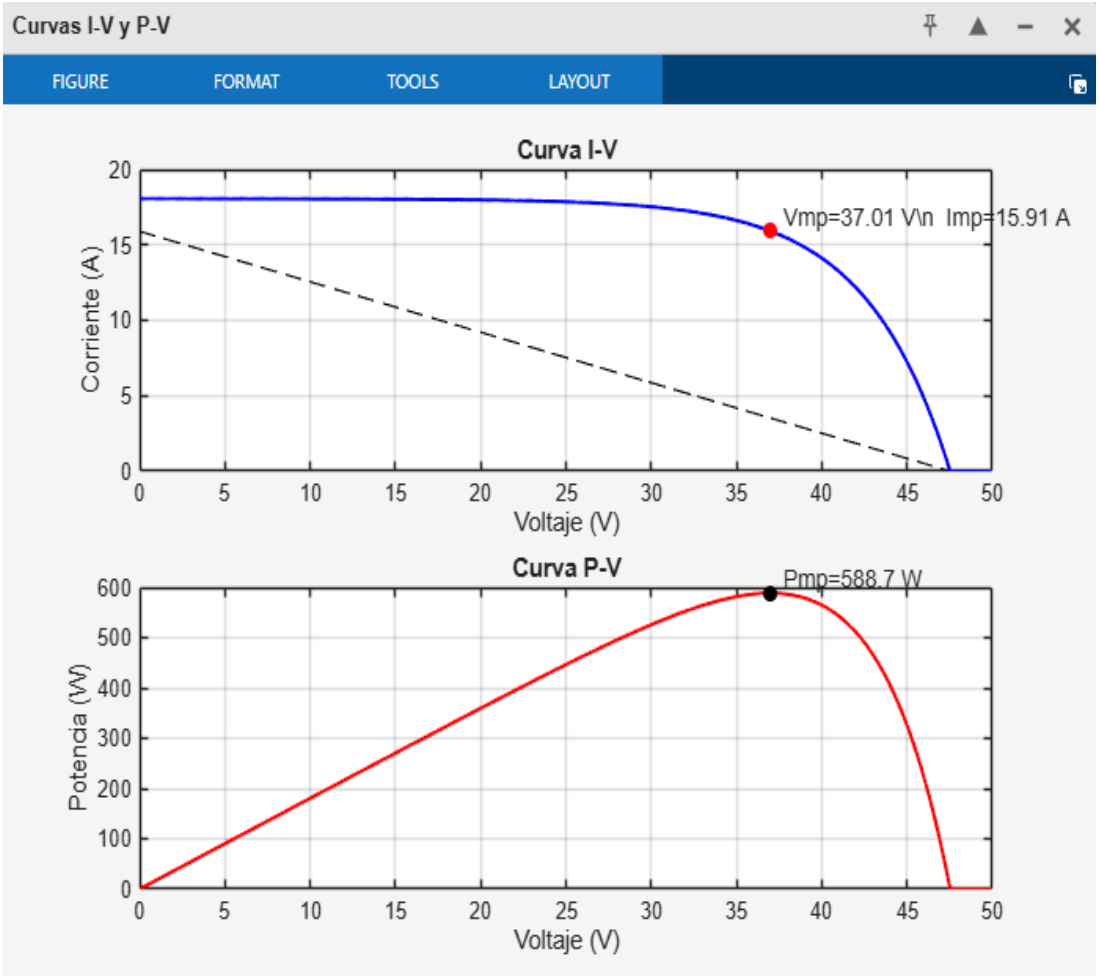
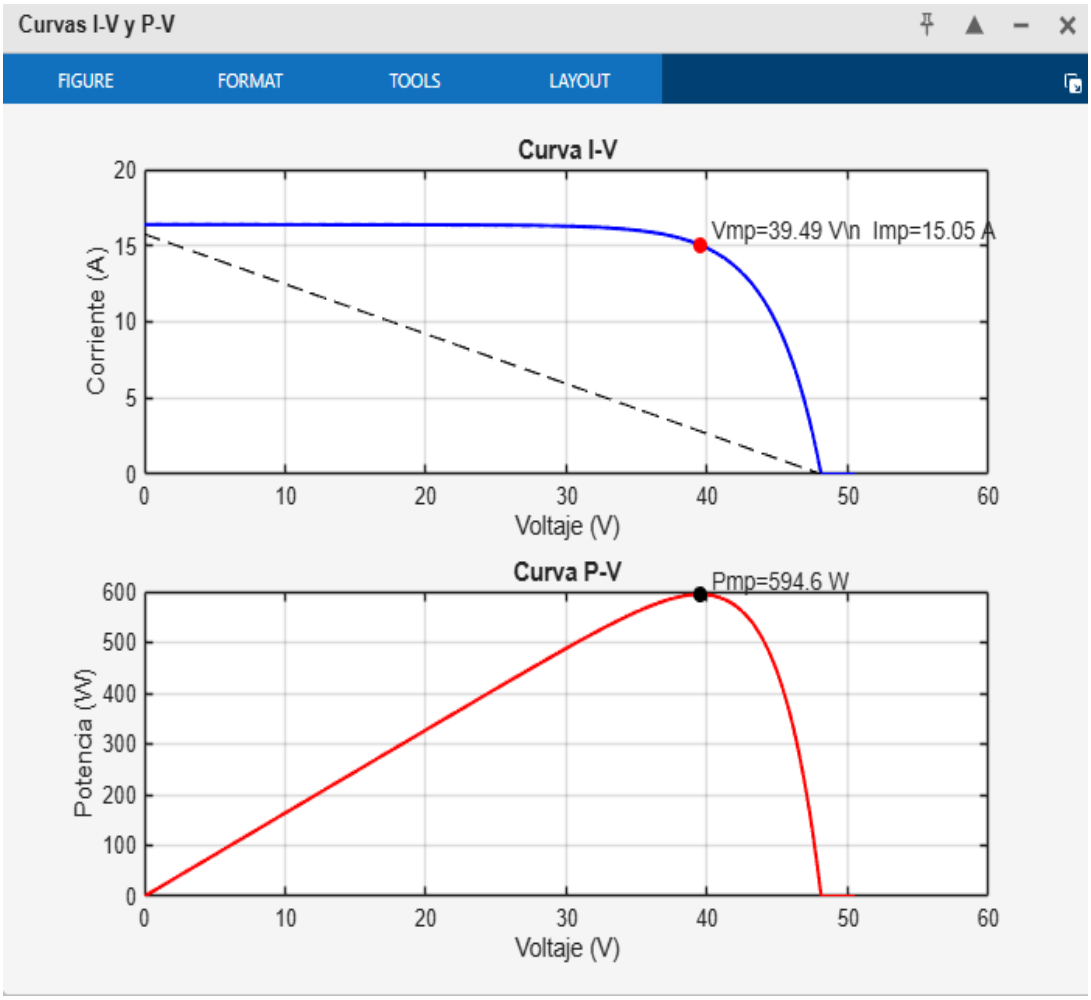


Tabla 2.
*Resultados del proyecto*

| Trina Solar | |
|---|---|
| Referencia | TSM595NE19R |
| Potencia [W] | 595 |
| Voc [V] | 48,1 |
| Vmp [V] | 40 |
| Shirt Circuit Current ISC [A] | 15,76 |
| Maximum Power Current Imp [A] | 14,89 |
| Eficiencia [%] | 22 |

Fuente. Diseño propio




De forma complementaria, se realizará una revisión de normas y guías técnicas aplicables a la conexión de generación distribuida fotovoltaica en microrredes de baja tensión, con especial atención a requisitos de calidad de energía, coordinación de protecciones y límites de inyección de potencia activa y reactiva.

La integración de generación fotovoltaica (FV) distribuida en microrredes de baja tensión requiere cumplir con requisitos técnicos, de seguridad y de operación establecidos en normas internacionales, regionales y nacionales. Esta revisión cubre:

## 6.1 Normativa Internacional

Conforme a la norma (IEEE, 2018), define los requisitos de interconexión, interoperabilidad y desempeño de recursos energéticos distribuidos (DER), aplicable a sistemas FV conectados a redes de baja tensión. La guía IEEE 1547.2-2023 explica el uso e interpretación detallada estándar.

**Descripción:**

Establece requerimientos para:
Regulación de voltaje
Respuesta de frecuencia
Soporte de potencia reactiva
Comportamiento ante fallas (ride-through)
Comunicaciones y control remoto
Compatible con funciones de inversores inteligentes (smart inverters).

**Aplicación práctica:**

Configurar inversores FV para control Volt/VAR, Volt/Watt y Frequency/Watt.
Asegurar capacidad de interoperabilidad con el operador de red.
Verificar certificación UL 1741-SB o equivalente para cumplimiento

## 6.2 Normativa colombiana (CREG, CON, UOME)

De acuerdo con la normativa colombiana se establecen las siguientes normas para la autogeneración y generación distribuida en baja tensión (BT):

Resolución CREG 174 de 2021 (regula AGPE y GD)

Resolución CREG 102072 de 2025 (nuevo esquema horario de compensación)

Acuerdo CNO 1544/1556 (requisitos de supervisión < 5 MW)

Resolución UPME 281 de 2015 (establece el límite de potencia instalada para ser considerado AGPE de un 1 MW)

Resolución CREG 030 de 2018 (establece que un usuario que hace parte de las fronteras comerciales se volviera AGPE debe independizar su instalación de tal forma que su generación y consumo sea diferente de la frontera que lo agrupara.)

La integración de sistemas de generación distribuida fotovoltaica (GD-FV) en microrredes de baja tensión (BT) en Colombia está regulada por un conjunto normativo robusto emitido principalmente por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) y el CNO (Consejo Nacional de Operación).

Estas normas definen:

Reglas de conexión

Estándares de seguridad y calidad

Requisitos de protecciones

Procedimientos de supervisión y operación

Métricas de medición y compensación de energía

Fronteras comerciales

## 6.3 Aplicación práctica para microredes FV a BT en Colombia

Requisitos técnicos prácticos:

Inversores certificados y compatibles con regulación Volt/VAR.

Protecciones anti-isla y reconexión automática controlada.

Medición inteligente (AMI) disponible desde 2026.

Integración posible con BESS bajo normas CREG.

Reporte de operación al OR según CNO.

Requisitos documentales:

Esquema unifilar.

Especificaciones del sistema FV.

Certificaciones de inversores.

Estudio de conexión.

Coordinación de protecciones.

## 6.4 Tablas comparativas

Tabla 3.
*Normas colombianas aplicables a microredes FV en BJ.*

| Norma | Alcance | Obligaciones para FV | Fuente |
|---|---|---|---|
| CREG 174 de 2021 | Regula a AGPE y GD | Procesos de conexión, protecciones, supervisión. | [gestornorm...reg.gov.co] |
| CREG 102072 de 2025 | Nuevo esquema horario AMI | AMI obligatorio, compensación horaria, AGPE hasta 5 MW. | [ree.es] |
| CNO 1544-1556 | Requisitos de supervivencia | Pruebas, Protecciones, telemetría. | [blog.erco.energy] |
| Circulares CREG 2022-2025 | Procedimientos y lineamientos | Trámites de conexión | [autoconsum...energia.cl] |

Fuente. Diseño propio

Tabla 4.
*Requisitos técnicos claves para conexión FV en BJ en Colombia.*

| Requisito | Implementación | Aplicación en Microred |
|---|---|---|
| Anti-isla | Configuración del inversor | Seguridad operacional |
| Volt/VAR | Función IEEE 1547 implementada en inversores | Estabilización de tensión |
| Medición AMI | Medidor digital bidireccional | Compensación horaria |
| Protecciones | Relés o interior del inversor | Coordinación con el OP. |
| BESS | Control de carga y descarga | Maximiza ingresos |

Fuente. Diseño propio

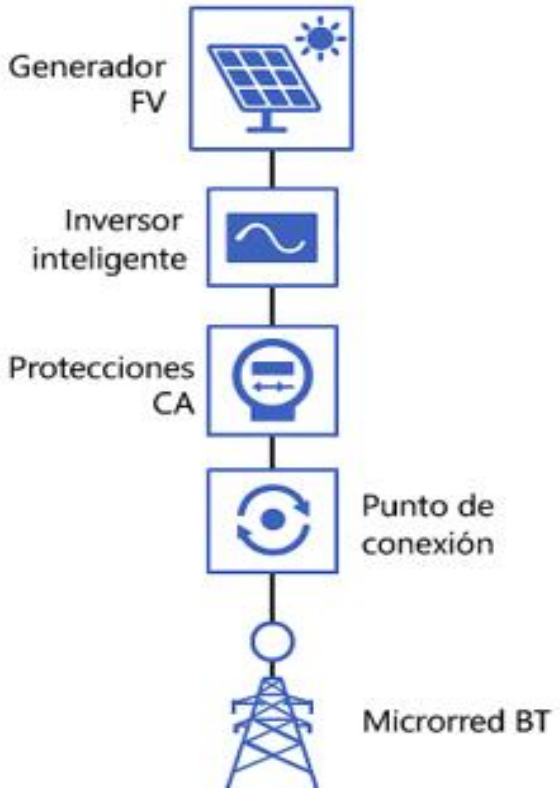



Figura 1. Diagrama de nodo de conexión




Figura 2. Secuencia de servicio de supervisión

Esta revisión se articulará con el análisis de literatura reciente sobre evaluación del desempeño de microrredes, donde se definen capacidades y se clasifican métricas pertinentes para medir el comportamiento de sistemas con alta penetración de generación distribuida.

Las microredes emergen como un pilar fundamental importante en la transición hacía sistemas energéticos más descentralizados, resilientes y sostenibles. Las microredes son definidas como un grupo de cargas interconectadas de recursos energéticos los cuales operan de manera controlada y coordinada, lo que permite que estos sistemas puedan funcionar conectados a la red principal o funcionar como isla, sin embargo, se requiere de una implementación efectiva como se ha mencionado requiriendo de una evaluación rigurosa y multidimensional acerca de su desempeño.

Recientemente se evidencia un claro cambio de paradigma en estos sistemas debido a que en la evaluación del desempeño no hay límite sobre indicadores habituales como la probabilidad sobre la pérdida de carga (LOLP) o la energía no suministrada (ENS). Autores como (Hieu M. Pham, 2025), integran en su evaluación de microredes aisladas indicadores como LOLP, ENS y LPSP (probabilidad de pérdida del suministro de potencia)

combinados con algoritmos avanzados en optimización y pronóstico de demanda mediante redes LSTM, con lo cual se ha demostrado que la confiabilidad debe ser dinámica y adaptativa sobre el crecimiento de la demanda.

(Khairy Sayed, 2025), propone en su investigación un conjunto de indicadores clave al desempeño de microredes (KPls) para evaluar la resiliencia aplicable a estos sistemas. Entre estos KPls se destaca también el SAIDI (índice de duración promedio de interrupción del sistema), SAIFI (índice de frecuencia promedio de interrupción del sistema), en tiempo de respuestas ante contingencias y la tasa de penetración de energías renovables en este caso el nodo de generación fotovoltaico.

En este tipo de evaluación sobre el desempeño en microredes se incorporan temáticas económicas y ambientales, (Chenhao Cai, 2025) publican en el Journal of Energy Storage donde presenta un análisis de dimensionamiento óptimo y costo beneficio para microredes autónomas, usando el índice de costo-beneficio (CBI) y la medición de emisiones de gases de efecto invernadero evitadas (AGE). Para este caso el autor aplica un algoritmo llamado MORIME, con el cual es posible alcanzar el equilibrio entre la inversión inicial, costo operativo e impacto ambiental. Por otra parte, la variabilidad geográfica y residencial se aborda por un en un análisis regional acerca del desempeño sobre microredes residenciales considerando factores como el costo de la energía, resiliencia, impacto ambiental y la capacidad de almacenamiento ( si aplica) obteniendo como resultado que para los ítem anteriores no se haya una solución única ya que el desempeño óptimo de una microred depende de las condiciones climáticas, políticas ambientales implementadas y patrones de consumo local.

La estandarización de las métricas para las microredes supone un problema por la falta de definición de estas, por lo tanto, (Jonathan Fellerer, 2025) propone un marco de 12 métricas normalizadas en un rango entre 0 a 1, calculados a partir de un conjunto de datos de entrada; logrando así una contribución clave en la consideración explícita de las pérdidas internas de la microred (pérdidas en convertidores, líneas de distribución internas, y almacenamiento).

Otro estudio realizado habla acerca de la estabilidad dinámica en las microredes cuando operan en modo isla con alta penetración de fuentes renovables intermitentes. (Anshuman Satpathy, 2024), presenta un estudio donde se evalúa la estabilidad de una

microred por medio de un controlador optimizado mediante un algoritmo metaheurístico denominado MWCA (Modified Water Cycle Algorithm) logrando una mejora significativa en la estabilidad de frecuencia y voltaje frente a perturbaciones. Adicionalmente, un artículo en el Journal of Safety Science and Resilience en el cual exploran estrategias para mejorar la resiliencia energética en el almacenamiento para reducir la carga no atendida durante contingencias prolongadas.

A partir de este insumo se elaborará un pliego de requisitos del nodo, que incluirá niveles admisibles de tensión y corriente, condiciones de operación en régimen permanente y transitorio, y la compatibilidad con la infraestructura existente en el laboratorio.

Tabla 4.
*Niveles admisibles de tensión y corriente para nodo FV.*

| Parámetro | Mínimo admisible | Máximo admisible | Condición |
|---|---|---|---|
| Tensión cortocircuito abierto [Voc] | 24 | 120 | A 25 °C |
| Tensión máxima de operación | 70 % Voltaje nominal del sistema | 120 % Voltaje nominal del sistema | Bajo carga |
| Corriente de cortocircuito [Isc] | 1 A | 10 A | Máxima irradiancia |
| Corriente máxima de carga | - | 80 % Isc | Regulador limitado |
| Tensión de salida | - | - | - |
| Frecuencia | - | - | 60 Hz |
| Corriente máxima continua | 1 A | Máx. 100 % | - |
| TDH (Distorsión armónica) | < 3 % (carga lineal) | Máximo 5% | - |

Fuente. Diseño propio

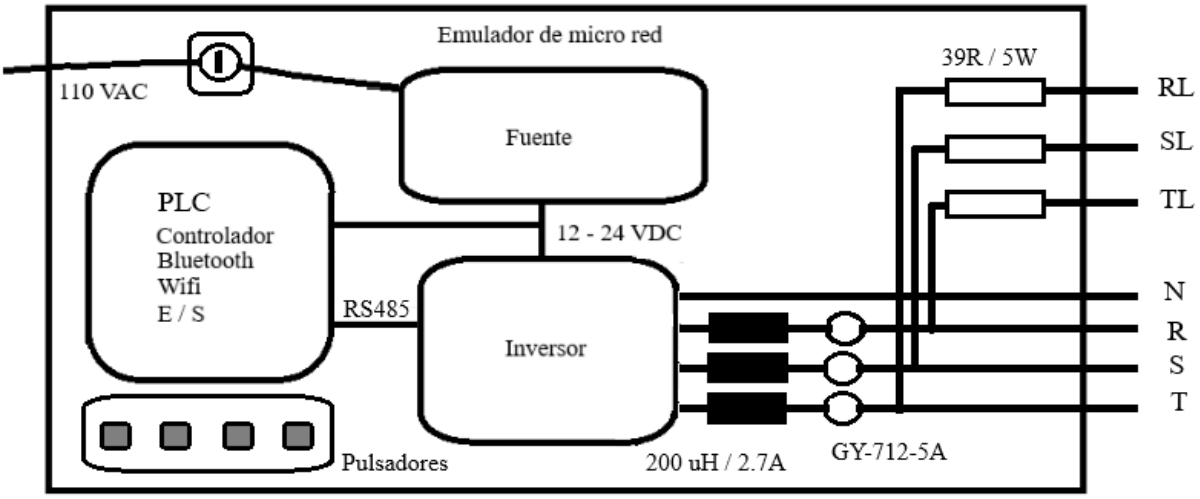



Figura 3. Diagrama en bloques y funcionamiento de módulo del nodo FV.

El diagrama de la figura ilustra los bloques principales del tablero diseñado para emular un nodo de microrred. El núcleo del sistema es un autómata programable (PLC), encargado de coordinar el driver trifásico, procesar mandos manuales y gestionar la comunicación con el centro de control y los nodos adyacentes. El inversor recibe consignas mediante el protocolo Modbus para generar voltajes con parámetros variables de forma de onda, frecuencia, fase y amplitud. Asimismo, integra sensores de corriente GY-712-5A para monitorear el flujo eléctrico en el punto de interconexión. Tanto el autómata como el driver son energizados por una fuente conmutada de 12 V a 5 A, mientras que la salida del sistema cuenta con inductancias de 220 uH para el filtrado de la señal y resistencias de carga para la emulación del consumo eléctrico.

Este sistema constituye un entorno de pruebas versátil para simular la dinámica de una microrred eléctrica. A continuación, se detalla la lógica de operación de sus componentes y la interacción entre ellos.

El Cerebro: Autómata Programable (PLC)

Este componente actúa como el nodo maestro y orquesta las tareas en diversos niveles. En el control local, gestiona interfaces físicas como pulsadores y selectores para el encendido y apagado del sistema. En el plano de la comunicación, coordina la operación de la red, la gestión de carga y el despacho energético con el Centro de Control mediante el

protocolo Modbus TCP sobre Wi-Fi. Finalmente, en la gestión de potencia, define el comportamiento eléctrico del nodo enviando consignas específicas al inversor a través de Modbus RTU.

Etapa de Potencia: Driver Trifásico e Inversor

Representa el corazón físico de la emulación y, a diferencia de un inversor comercial, está optimizado para la experimentación. Su flexibilidad paramétrica permite simular escenarios críticos, como caídas de tensión o variaciones de frecuencia, recibiendo parámetros digitales en tiempo real. Además, su control electrónico permite generar desde ondas senoidales puras hasta señales distorsionadas para evaluar la resiliencia de la red, todo bajo la estabilidad de una fuente conmutada que protege la electrónica de control del ruido eléctrico.

Monitoreo y Retroalimentación: Sensores GY-712-5A

Para cerrar el lazo de control y garantizar la seguridad, el PLC requiere información precisa de la salida. Utilizando el efecto Hall, estos sensores miden la corriente hacia la interconexión en tiempo real. Los datos recopilados permiten al sistema calcular la potencia entregada o consumida, asegurando que el nodo opere siempre dentro de los márgenes de diseño establecidos.

Acondicionamiento y Carga: Filtro e Impedancias

La energía se procesa en dos etapas finales antes de completar la emulación. El filtrado inductivo, compuesto por bobinas de 220 µH, actúa como un filtro de paso bajo que suaviza la conmutación rápida del PWM a 7200 Hz, eliminando el ruido y obteniendo una onda senoidal limpia. Posteriormente, las resistencias de carga representan consumos reales de hogares o industrias. El nivel de demanda es controlado mediante las salidas PWM del inversor, permitiendo evaluar la estabilidad de voltaje y frecuencia del nodo bajo condiciones de carga variables.

## 6.5 Resumen del flujo operativo

El proceso inicia cuando el PLC recibe una consigna, ya sea de forma manual o vía Modbus TCP. Posteriormente, el driver trifásico sintetiza la onda solicitada mediante

Modbus RTU y las bobinas filtran el ruido de conmutación de la señal. En la etapa final, la energía fluye hacia las cargas mientras los sensores informan constantemente al PLC el estado de la corriente para mantener el control dinámico del sistema.

En segunda instancia, se espera la implementación física y funcional del nodo de conexión en un gabinete didáctico seguro y accesible, integrando el acondicionamiento en DC, el convertidor, los filtros de salida, las protecciones, el sistema de medición y de supervisión. El montaje contemplará canalizaciones, puesta a tierra, rotulado, enclavamientos eléctricos y mecánicos, y accesos diferenciados para operación y mantenimiento. Este componente se validará con pruebas de continuidad, aislamiento y funcionamiento en vacío; con ensayos con cargas resistivas y reactivas; y con secuencias de acople y desacople en condiciones controladas. Como parte de la entrega, se documentará los protocolos operativos (maniobras normales y de contingencia, criterios de sincronismo, límites de operación) y se dispondrá de formatos de registro para prácticas, de modo que cada sesión de laboratorio produzca datos comparables y útiles para evaluación.

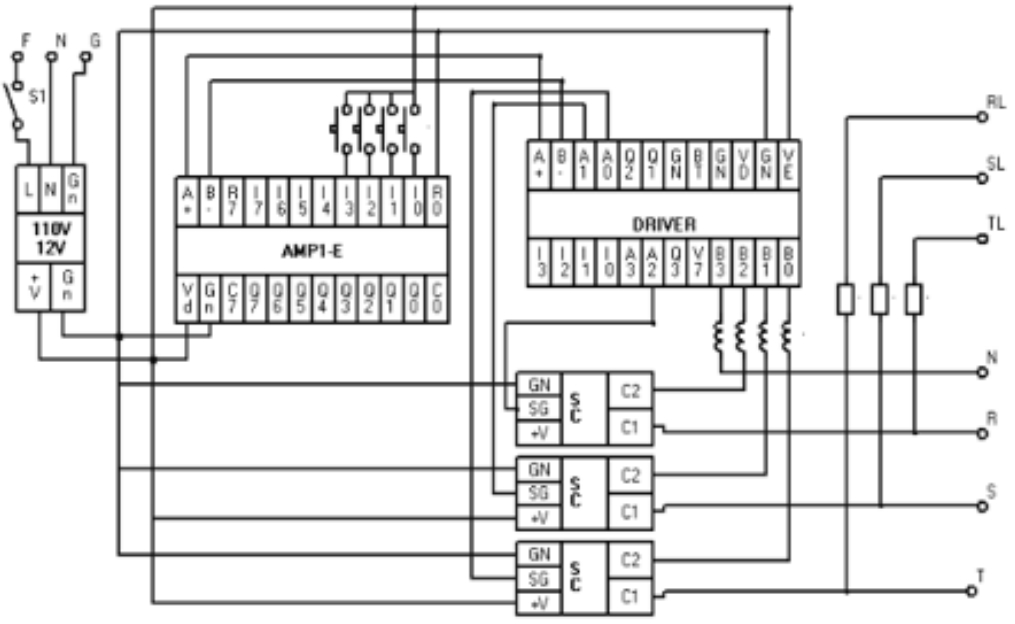



Figura 4. Diagrama esquemático del tablero y ensamble del nodo FV.

Respecto al segundo objetivo específico, centrado en el diseño, modelado e implementación del nodo de conexión fotovoltaico, el método establece una serie de

actividades encadenadas. En primer lugar, se modelará una microrred típica que represente la configuración de la instalación didáctica, incorporando barras, líneas, cargas, inversor fotovoltaico y elementos de protección asociados al punto común de acoplamiento.

El diagrama de la figura ilustra la interconexión de los módulos que integran el tablero de control para la emulación del nodo de microrred. A partir de este esquema, se deriva la lista detallada de los componentes que conforman el sistema.

Sobre este modelo se definirán las ecuaciones y tablas necesarias para dimensionar conductores, elementos de maniobra, dispositivos de protección y sistemas de medición, empleando criterios de capacidad de corriente, caída de tensión, selectividad y coordinación de protecciones.

## 6.6 Recomendaciones para el ensamble del nodo FV

El uso de un gabinete plástico ofrece ventajas significativas, como su naturaleza no conductora —que previene cortocircuitos por contacto accidental con el chasis— y una menor interferencia para la comunicación Wi-Fi. No obstante, esta elección elimina el efecto de "Jaula de Faraday", dejando el sistema expuesto al ruido electromagnético. Por esta razón, la organización interna es crucial para evitar que las interferencias del driver provoquen bloqueos en el PLC Amp1-F.

Distribución en el Riel DIN

Para mitigar el ruido electromagnético, el riel DIN debe dividirse en dos secciones claramente diferenciadas. En la Sección de Control (izquierda), se instalan la fuente de 12V y el PLC. En la Sección de Potencia (derecha), se agrupan el driver trifásico, las bobinas de 220 uH y las resistencias de 39Ω, componentes que generan mayor calor y campos magnéticos. Las borneras de conexión deben ubicarse en el extremo derecho o en la parte inferior para facilitar la salida organizada del cableado hacia el exterior.

Gestión Térmica y de Potencia

Dado que el gabinete plástico actúa como aislante térmico, es necesario optimizar la disipación de calor del driver y las resistencias de 5W. Estas últimas no deben fijarse directamente sobre la placa de fondo; se recomienda utilizar soportes o tornillos que las

mantengan suspendidas un par de milímetros para permitir la circulación de aire. Asimismo, si el gabinete es estanco, se deben integrar rejillas de ventilación laterales para favorecer el flujo de aire por convección natural.

Cableado y Conexiones

La integridad eléctrica del nodo depende de la calidad del conexionado. El cable encauchetado se reserva exclusivamente para la acometida de 110V. Para el resto del sistema, se debe emplear cable 18 AWG respetando un código de colores consistente (ej. rojo para +12V y negro para GND). Es obligatorio el uso de terminales tubulares en cada extremo para evitar hilos sueltos que puedan provocar arcos eléctricos. Por su parte, los sensores GY-712-5A deben instalarse cerca de las borneras de salida, pero alejados de la fuente conmutada para proteger la integridad de la señal analógica.

Conexión del Sistema de Filtrado

Las bobinas de 220 uH deben conectarse en serie con las salidas del driver antes de alcanzar las resistencias o borneras de interconexión. Para evitar el acoplamiento inductivo, es fundamental dejar un espacio mínimo de 1 cm entre cada bobina. Debido a su peso y a las vibraciones generadas por la alta frecuencia, estos componentes deben fijarse firmemente para evitar el desprendimiento de soldaduras o bornes.

Panel Frontal y Ergonomía

La interfaz de usuario en la tapa del gabinete debe ser funcional y segura. Se recomienda el uso de una broca de copa de 22 mm para instalar el piloto de 110V en la parte superior y los pulsadores en una distribución simétrica inferior. Es vital dejar un "lazo de servicio" en el cableado de la tapa, proporcionando la longitud suficiente para abrir el gabinete sin someter a tensión las entradas del PLC.

Flujo de Conexión y Montaje Final

El esquema de conexión sigue una secuencia lógica: la entrada de 110V alimenta al piloto y a la fuente; la salida de la fuente energiza el PLC y el driver; y la etapa de potencia fluye desde el driver hacia las bobinas, sensores y finalmente a las cargas. El lazo de datos se establece mediante el bus RS485 entre el PLC y el driver bajo el protocolo Modbus. Como nota final de montaje, se debe evitar el torque excesivo al usar tornillos autoperforantes para prevenir fracturas en el material plástico del gabinete.

## 6.7 Operación del bus Modbus para el control de operaciones del emulador de red

Protocolo Modbus: El Lenguaje de Control

En este sistema, el PLC actúa como Modbus Master y el Driver/Inversor como Slave. La comunicación suele ser a través de Modbus RTU (RS-485) debido a su robustez en entornos industriales con ruido eléctrico.

Mapa de Registros y Control. Para que el nodo emule diferentes condiciones, el PLC escribe en registros específicos del inversor (Holdings Registers):

Frecuencia (0x0000): Se envía un valor para variar la velocidad de conmutación. Por ejemplo, emular una red de 50 Hz o 60 Hz, o incluso derivaciones de frecuencia para pruebas de estabilidad. Amplitud (0x0008): Controla el índice de modulación PWM para ajustar el voltaje de salida. Fase (0x0010): Crucial para la sincronización entre nodos. El PLC ajusta el ángulo de fase para permitir que el nodo se "enganche" a la microrred (proceso de sincronismo).

Flujo de Datos

Consulta (Request): El PLC solicita lectura de corriente al inversor o envía una nueva consigna de voltaje. Respuesta (Response): El driver ejecuta el cambio y devuelve un código de confirmación o el valor de las variables medidas por los sensores integrados.

Posteriormente, se asignarán valores de trabajo a las fórmulas del modelo con base en los datos reales de los equipos disponibles y en escenarios representativos de irradiancia, temperatura y demanda de carga.

## 6.8 Calculo de la caída de tensión en las bobinas de filtrado

Las bobinas de 220 uH son filtros de línea. Aunque su resistencia de corriente continua (RDC) es baja, presentan una reactancia inductiva (XL) que depende de la frecuencia, lo que genera una caída de tensión (VL) cuando circula corriente.

**Paso 1:**

Cálculo de la Reactancia Inductiva. La oposición al paso de la corriente alterna se define por la fórmula: XL = 2 * (PI) * f * L.

Si se opera a una frecuencia estándar de 60 Hz, L = 220 uH = 0.0002 H, f = 60 Hz.

XL = 2 * 3.141592 * 60 * 0.0002 = 0.0829 Ohm.

**Paso 2:**

Cálculo de la Caída de Tensión (VL). Utilizando la Ley de Ohm para corriente alterna, si el nodo está alimentando una carga que demanda, por ejemplo, I = 2A, la caída de tensión será: VL = I * XL = 2 * 0.0829 = 0.1658 V.

**Nota Crítica:**

Esta caída es pequeña a frecuencias fundamentales (60 Hz), lo cual es ideal para no perder potencia. Sin embargo, para los armónicos de alta frecuencia generados por el PWM del driver (ej. 7200 Hz), la reactancia es mucho mayor (XL = 9 Ohm), lo que permite que la bobina "bloquee" el ruido y entregue una onda limpia a las resistencias de carga.

Con estos resultados se seleccionarán los componentes comerciales del nodo, se elaborarán diagramas unifilares y de control, se procederá al montaje físico del prototipo en el laboratorio siguiendo procedimientos de seguridad eléctrica y protocolos institucionales para trabajo en baja tensión.

## 6.9 Listado de componentes para el ensamble del nodo FV.

1 Gabinete plástico

4 Pulsadores de 22 mm

1 Piloto 22 mm a 120 V

1 Fuente 12 V a 5 A

1 Autómata programable Amp 1-F

1 Driver trifásico programable Amp 1-G

Sensores GY -712-5 A
Bobinas 220 uH – 2.7 A
Resistencia 39 r – 5 W
1 Canaleta ranurada
3 metros de cable vehicular 18 AWG
Terminales tubulares calibre 18-22 mm
Rial DIN metálico
2 metros de cable encauchetado 3*18
Enchufe con polo a tierra a 120 V
10 Posiciones bornera
Tornillos autoperforantes

En tercer lugar, se obtendrán modelos y resultados de simulación/experimentación que respalden la validez del diseño y la implementación. Se desarrollarán escenarios de operación representativos para la microrred, con variaciones de irradiancia, cambios de carga, eventos de reconexión y perturbaciones típicas, lo que generarán series de tiempo, tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva, y factores de calidad de energía en el punto de acoplamiento. Estos datos permitirán contrastar el desempeño del nodo frente a sus criterios objetivos (estabilidad en ambos modos, control de flujo de potencia, respuesta a transitorios y coordinación básica de protecciones), se producirán informes de resultados que incorporen gráficas, tablas y análisis comparativos entre las respuestas modeladas y las observadas en el banco. El resultado no será únicamente un reporte de cumplimiento, sino un conjunto de casos de prueba que quedará disponible para su reutilización en nuevas pruebas y para la calibración periódica del sistema.

En cuanto al tercer objetivo específico, relativo a la validación del desempeño del nodo de conexión solar, el método combina simulación y ensayo experimental. Primero se simulará el modelo de la microrred con el nodo integrado, considerando distintos escenarios de operación: variación de irradiancia, conexión y desconexión del nodo, cambios en el nodo conectado–isla y perturbaciones simples en la red.

A continuación, se definirá una campaña de pruebas de laboratorio que incluya la medición de tensiones, corrientes, potencias activa y reactiva, así como indicadores básicos de calidad de energía en el punto común de acoplamiento.

Como señalan (Jesús Rey, 2023), la evaluación del desempeño de microrredes requiere seleccionar métricas acordes con las capacidades que se desea analizar, tales como continuidad del suministro, estabilidad de tensión, aprovechamiento de recursos renovables y respuesta ante eventos de red.

Con base en estas orientaciones se establecerán criterios de aceptación para el nodo, se registrarán los resultados en formatos estandarizados y se realizará un contraste entre el comportamiento simulado y el observado experimentalmente, identificando desviaciones y posibles ajustes de diseño.

Por último, se entregará un paquete de transferencia académica y operativa orientado a la docencia, la investigación aplicada y la extensión. Este paquete incluirá el manual del sistema con descripción de componentes y topologías; las guías de prácticas con objetivos, procedimientos, precauciones y criterios de evaluación; una bitácora de mantenimiento preventivo y correctivo con periodicidades, plantillas normalizadas para registro de maniobras, eventos y mediciones. Se prevé, además, un repositorio estructurado con versiones de planos, memorias de cálculos y protocolos, junto con los conjuntos de datos de prueba y los datos registrados para facilitar la trazabilidad y replicación. Con ello, la institución dispondrá de un recurso didáctico estable que habilita experiencias de aprendizaje basadas en evidencia, alimenta proyectos de investigación en control, protecciones y calidad de energía, y ofrece insumos técnicos para actividades de formación continua con actores externos. En conjunto, estos resultados transforman la microrred en un entorno de validación con reglas claras, medición confiable y documentación suficiente para sostener ciclos de mejora y nuevas iteraciones del sistema.

# 7. Conclusiones

**Cumplimiento Normativo y Funcional:** Se diseñó e implementó exitosamente una interfaz estructurada que responde a las exigencias de la Resolución CREG 174 de 2021 (p. 12) y los estándares IEEE 1547 (p. 13), habilitando transiciones seguras entre los modos de operación conectado a la red y en isla dentro de la microrred didáctica (p. 17).

**Evaluación de la Calidad de la Energía:** Las mediciones experimentales previas al filtrado confirmaron una distorsión armónica (THD) severa (p. 27) y una alta densidad de transitorios rápidos en la señal fase-neutro debido a la conmutación de alta frecuencia (7200 Hz) de los semiconductores (p. 38).

**Evolución Multivel de la Onda:** El análisis de las formas de onda demostró que la tensión medida fase-fase evoluciona de manera natural hacia una geometría escalonada multinivel que, aunque se aproxima mejor a una señal alterna, requiere atenuación forzada para proteger cargas inductivas sensibles (p. 27).

**Control y Sincronismo Eficiente:** El uso del bus RS-485 bajo el protocolo Modbus RTU demostró alta robustez frente al ruido electromagnético (p. 41), permitiendo al PLC maestro ajustar dinámicamente la frecuencia, amplitud y el ángulo de fase requeridos para el proceso de sincronización (p. 41).

**Acondicionamiento Físico Exitoso:** La distribución física segregada en el riel DIN dentro del gabinete plástico mitigó eficazmente el acoplamiento electromagnético entre la sección de potencia y la sección de control, evitando bloqueos operativos en el PLC (p. 40).

# 8. Recomendaciones

**Optimización del Filtro de Salida:** Se recomienda acoplar una etapa de filtrado pasivo LC o LCL optimizada en lugar de bobinas puras en serie para elevar la impedancia ante frecuencias armónicas superiores y garantizar un THD menor al 5% bajo cargas no lineales (pp. 18, 21).

**Implementación de Ventilación Forzada:** Dado que el gabinete plástico actúa como un aislante térmico natural (p. 40), es indispensable instalar un extractor de aire forzado controlado por temperatura para disipar el calor crítico generado por las resistencias de carga de 39 \(\Omega \) y el driver de potencia (p. 40).

**Integración de un Sistema BESS:** Para consolidar el funcionamiento del nodo en modo "formador de red" (*grid-forming*) durante el estado de isla, se aconseja integrar un sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS) que cubra los transitorios y la variabilidad de la irradiancia (pp. 18, 26).

**Validación mediante Hardware-in-the-Loop:** Se sugiere expandir el alcance de futuras investigaciones mediante simulaciones HIL (*Hardware-in-the-Loop*) para ensayar escenarios críticos de fallas asimétricas, inyecciones de secuencia negativa y esquemas de protección adaptativa sin arriesgar la integridad física del laboratorio (p. 21).

**Medición Inteligente Avanzada:** Integrar medidores bidireccionales con soporte para infraestructura AMI de cara a las actualizaciones regulatorias colombianas proyectadas, permitiendo el registro de curvas de carga y la exportación automatizada de series de tiempo hacia el sistema SCADA central (pp. 29, 33).

## 9. Referencias bibliográficas

(IEEE), I. o. (2018). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. *IEEE*, 138.

Alexandre Serrano-Fontova, R. B.-J. (2022). A new hybrid islanding detection method for mini hydro-based microgrids . *Electrical Power and Energy Systems*, 1-16.

Anshuman Satpathy, R. B. (2024). Assessing Stability in Renewable Microgrid Using a Novel-Optimized Controller for PVBattery Based Micro Grid with Opal-RT-Based Real-Time Validation. *Energies*, 1-23.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, a. (2014). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, anla ley 1715 de 2014*. Obtenido de anla.gov.co: https://www.anla.gov.co/eureka/normativa/leyes/ley-1715-de-2014-integracion-de-las-energias-renovables-no-convencionales-al-sistema-energetico-nacional

Chenhao Cai, L. Z. (2025). Optimal sizing and cost-benefit assessment of stand-alone microgrids with different energy storage considering dynamic avoided GHG emissions. *Journal of Energy Storage*, Volumen 109, artículo 115128.

Colombia, C. d. (10 de Julio de 2021). *senado.gov.co.* Obtenido de senado.gov.co: http://secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2099_2021.html

CREG, C. d. (23 de 11 de 2021). *creg.gov.co*. Obtenido de https://creg.gov.co/

CREG, G. N. (23 de Noviembre de 2021). *gestornormativo.creg.gov.co*. Obtenido de creg.gov.co: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm

Dan T. Ton, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *Elsevier*, The Electricity Journal, Volumen 25, Número 8, páginas 84-94.

David Narang, M. I. (2019). Highlights of IEEE Standard 1547-2018. *PJM Technical Workshop on DER Integration with IEEE 1547/1547.1 Standards* (pág. 72). Audubon, Pennsylvania: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

E. Hernández-Mayoral, F. J.-R.-S. (2024). "Power Quality Analysis of a Hybrid Microgrid based on Renewable Energy Sources". *Revista IEEE América Latina, Volumen 22, Número 7*, 601-610.

Farheen Bano, A. R.-S. (02 de Septiembre de 2024). *MDPI.* Obtenido de MDPI: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/19/4865

Feras Alasali, S. M.-N. (2023). Powering up microgrids: A comprehensive review of innovative and intelligent protection approaches for enhanced reliability. *Energy Reports* , 1-26.

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

Flores-Espino, F. (01 de Junio de 2020). *OSTI.GOV.* Obtenido de OSTI.GOV: https://www.osti.gov/biblio/2571091

Gabriel Nasser Doyle de Doile, M. C. (2025). Six Sigma Approach to Developing a Microgrid Station for Research and Teaching. *IEEE*, 1-11.

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

Hieu M. Pham, D. C. (2025). Integrated Reliability Assessment and Optimal Reconfiguration of Islanded Microgrids Under Load Growth Using Fick's Law Optimization Algorithm and Long Short-Term Memory Technique. *IEEE Access* , Volumen 13, páginas 139033-139052.

IEEE. (2018). *standards.ieee.org*. Obtenido de ieee: https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/

Jesús Rey, F. S.-F. (2023). The Economic Impact and Carbon Footprint Dependence of Energy Management Strategies in Hydrogen-Based Microgrids. *Electronics*, Volumen 12, Número 17, artículo 3703.

Jonathan Fellerer, J. H. (2025). Proper Definitions of Micro Grid Metrics are Needed! – A Generalizable Framework. *First Nordic Energy Informatics Academy Conference (EIA Nordic 2025)* (págs. 3-23). Estocolmo, Suecia: Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer.

Khairy Sayed, M. M. (2025). Key performance indicators for resiliency assessment in power systems with renewable energy and electric vehicles integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-32.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia, m. (s.f.). *minminas.gov.co.* Obtenido de minminas.gov.co: https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/

Nathan Baeckeland, D. C.-S. (2024). "Overcurrent Limiting in Grid-Forming Inverters: A Comprehensive Review and Discussion". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volumen 39, Número 11.

OCDE, O. p. (30 de Junio de 2015). *oecd.org.* Obtenido de http://oecd.org/en/search/publications.html?orderBy=mostRecent&facetTags=oecd-serials%3Ag1gha251%2Coecd-languages%3Aen&page=0

Sara Anttila, J. S. (2022). "Grid Forming Inverters: A Review of the State of the Art of Key Elements for Microgrid Operation". *MDPI*, Volumen 15, Número 15, artículo 5517.

Sara Anttila, J. S. (2022). Grid Forming Inverters: A Review of the State of the Art of Key Elements for Microgrid Operation. *MDPI*, 1-30.

Vínicios Moreno Sanches, S. L.-R. (2026). ALow-Cost Scaled Renewable Microgrid: Modelling,Instrumentation and Validation. *Ciencia abierta de HAL*, 1-9.

Yang Liu, L. Z. (2025). Transient Synchronization Stability in Grid-Following Converters: Mechanistic Insights and Technological Prospects—A Review. *MDPI*, 1-25.

Yang Liu, L. Z. (2025). Transient Synchronization Stability in Grid-Following Converters: Mechanistic Insights and Technological Prospects—A Review. *Energies* , Volumen 18, Número 8, artículo 1975.

## 10. Bibliografía

https://www.ugc.edu.co/pages/juridica/documentos/institucionales/Norma_%20NTC_2050_98_codigo_electrico_col.pdf

https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/

https://www.redalyc.org/journal/2570/257064475004/html/

https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10562258

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118302995

https://revistas.uniguajira.edu.co/rev/index.php/cei/article/view/e7461726/pdf

https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1395/Upme%20570%20IEB%20Generacion%20solar%20fotovoltaica.pdf?sequence=1&isAllowed=y

https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9514652.pdf

# 11. Anexos

## Anexo A. Código del inversor.

```
//Código del inversor trifásico

#include "startup.h"
#include "gpio.h"
#include "timer.h"
#include "serial.h"
#include "math.h"

int contad_1 = 0, contad_2 = 0, contad_3 = 0, contic = 0;

void ondulador(void) {
if(contad_1 >= 360){                    //Limitar el conteo del ángulo a 360 grados
contad_1 = 0;
contad_2 = 240;                         //Desfase de 120 grados. (120 = 360 - 240)
contad_3 = 120;                         //Desfase de 240 grados. (240 = 360 - 120)
}
if(contad_2 >= 360)                     //Limitar el conteo del ángulo a 350 grados
contad_2 = 0;
if(contad_3 >= 360)                     //Limitar el conteo del ángulo a 350 grados
contad_3 = 0;
Gpio_0 = (contad_0 >= 180)    0 : 1;    //Seleccionar polaridad de la rama fase 1
```

```
    Gpio_1 = (contad_1 >= 180)    0 : 1;                    //Seleccionar polaridad de la
rama fase 2
    Gpio_2 = (contad_2 >= 180)    0 : 1;                    //Seleccionar polaridad de la
rama fase 3
    T0_Ch_1 = T0_mod * math.abs(math.sin(contad_1++ * math.PI() / 180));
      //Fase 1 igual valor sinusoidal
    T0_Ch_0 = T0_mod * math.abs(math.sin(contad_2++ * math.PI() / 180));
      //Fase 1 igual valor sinusoidal
    T1_Ch_1 = T1_mod * math.abs(math.sin(contad_3++ * math.PI() / 180));
      //Fase 1 igual valor sinusoidal
    }

    void recepcion(void){
    char[] lectura = COM_1.readbytes;                       //Leer el valor recibido
    COM_1.writebytes((char[])"OK");                              //Responder a la escritura
    int frecu = math.strtoint(lectura);                     //Calcular la frecuencia
programada
    T0_mod = 1000000 / (frecu * 360);                       //Calcular el período del timer 0
    T1_mod = T0_mod;                                                    //Copiar el
período al timer 1
    }

    void inicio (void){
    timer_config(Tim_0, 1000000 / 21600, PWM_MODE);         //Configura timer 0
(60Hz * 360 = 21600)
    timer_config(Tim_1, 1000000 / 21600, PWM_MODE);         //Configura timer 1
(60Hz * 360 = 21600)
    port_config(Gpio_0, OUTPUT);                                //Configura dirección
fase 1
    port_config(Gpio_1, OUTPUT);                                //Configura dirección
fase 2
```

```
    port_config(Gpio_2, OUTPUT);                    //Configura dirección
fase 3
    port_config(Gpio_3, OUTPUT);                    //Configura dirección
neutro
    port_config(Gpio_4, OUTPUT);                    //Configura dirección Led
    Gpio_3 = 1;                                     //Neutro
inyecta PWM positivo
    T1_Ch_0 = T1_mod / 2;                           //Neutro igual al 50% del
voltaje
    launch_Tick_Timer(10);                          //Lanzar muestreador
    timer_service(Tim_0, ondulador);                //Configurar interrupción
    timer_start(Tim_0);                             //Iniciar operación
del timer 0
    timer_start(Tim_1);                             //Iniciar operación
del timer 1
    serial_service(COM_1, recepcion, RECEIVE );     //Configura interrupción serial
    serial_config(COM_1, 9600, n, 8, 1);            //Configura comunicación serial
    }

    void main(void){
    inicio();
    while(1){
    while(Tick_time == 0);
    launch_Tick_Timer(10);                          //Ejecutar cada 10 milisegundos
    if(contic++ >= 100)
    contic = 0;
    if(contic == 0)                                 //Destellar led de
operación
    Gpio_4 = 1;
    else
    Gpio_4 = 0;
```

}

}

*Fuente de origen: Notas de Clase.*

## Anexo B. Imágenes de la señal de salida

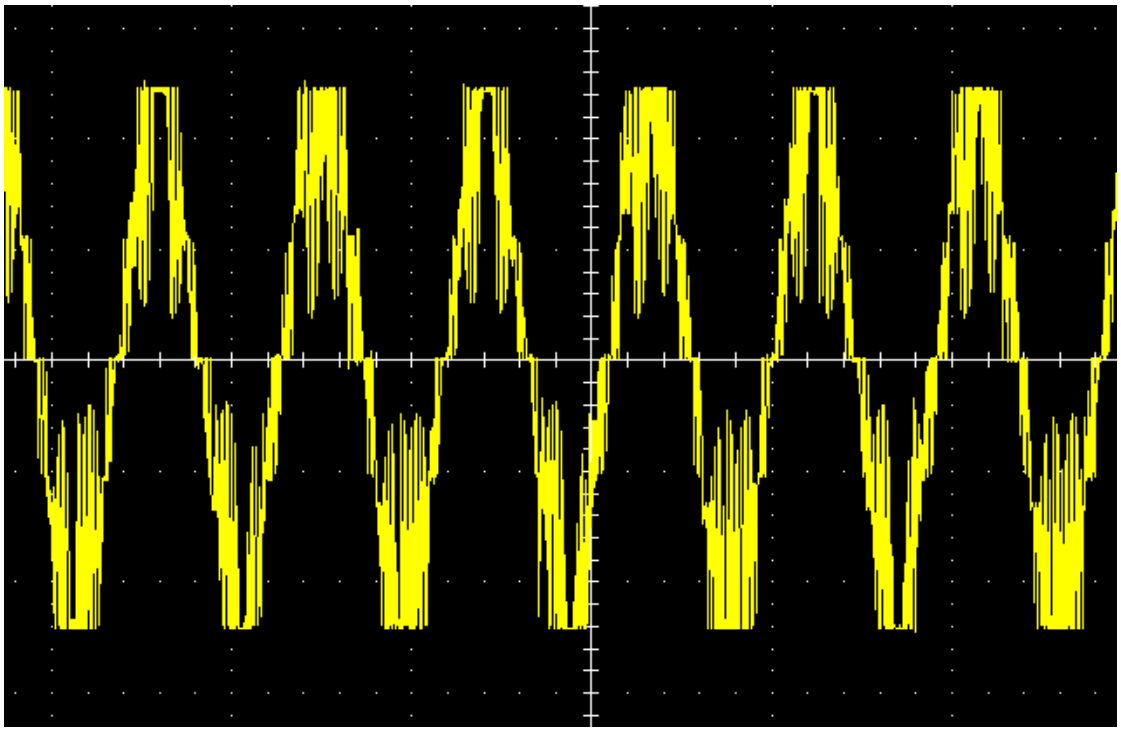


*Ilustración 1 Relación fase-fase. Fuente de origen: Notas de clase*

Esta imagen muestra la señal de tensión línea a línea (fase-fase) obtenida a la salida del mismo inversor solar fotovoltaico.

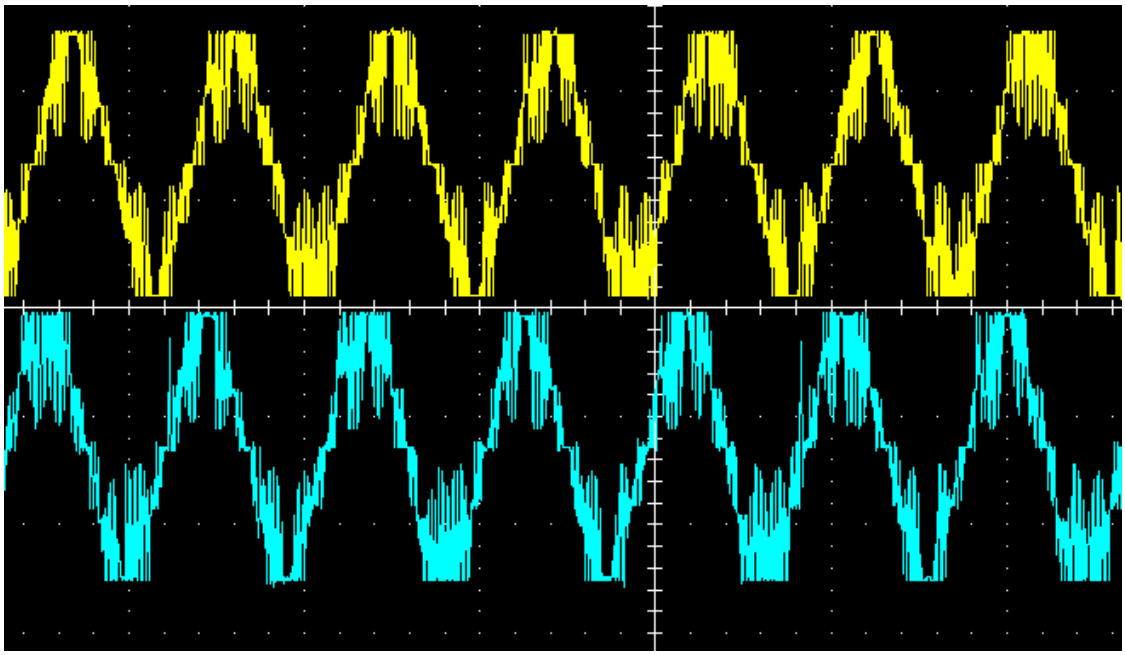


*Ilustración 2 Relación fase-desfasada-. Fuente de origen: Notas de clase*

Esta imagen muestra la captura de dos señales de tensión en un osciloscopio de doble canal, permitiendo analizar el desfase eléctrico entre ellas.

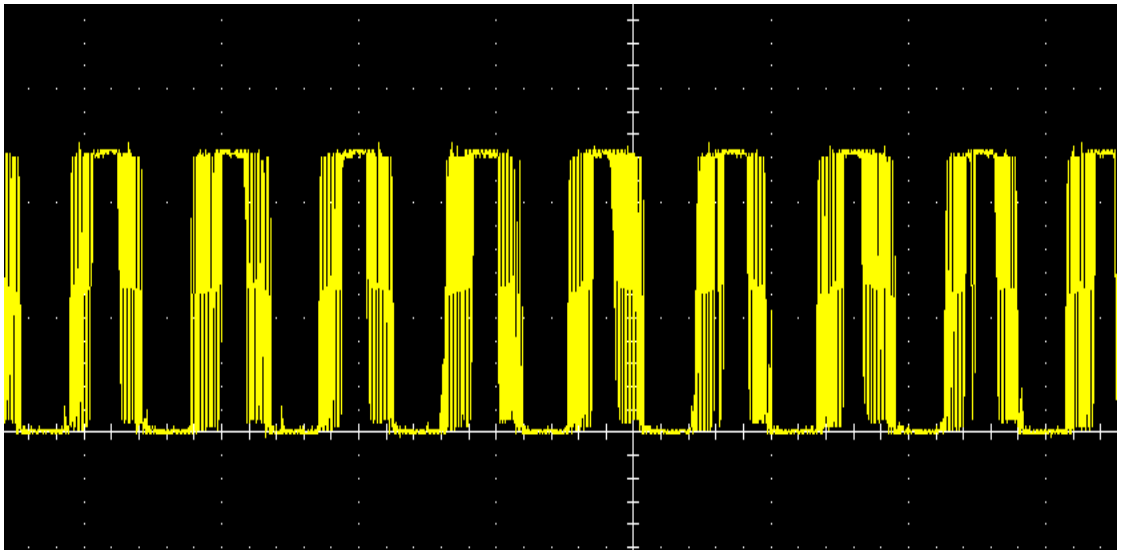


*Ilustración 3 Relación Fase-Neutro. Fuente de origen: Notas de clase*

Figura: Señal de tensión fase-neutro a la salida del inversor solar fotovoltaico obtenida mediante osciloscopio.

Análisis:

**Primera Imagen (Tensión Fase-Neutro):** Muestra una señal de tipo rectangular o pulsante pura con flancos de conmutación extremadamente abruptos. La alta densidad de trazos verticales refleja el disparo de los semiconductores en alta frecuencia y la ausencia de atenuación para los componentes armónicos elementales.

**Segunda Imagen (Tensión Fase-Fase):** Al medir entre líneas vivas, la forma de onda evoluciona hacia una geometría escalonada o cuasi-senoidal multinivel. Aunque se aproxima más a una señal alterna comercial, mantiene zonas críticas de ruido, picos transitorios y distorsión armónica (THD) severa.

**Tercera Imagen (Señales Desfasadas):** La captura simultánea de dos canales (amarillo y cian) confirma la naturaleza polifásica del sistema. Ambas fases operan a la misma frecuencia fundamental y replican el perfil escalonado distorsionado, exhibiendo de forma clara el desplazamiento angular (desfase) necesario para la alimentación de cargas o la interconexión.

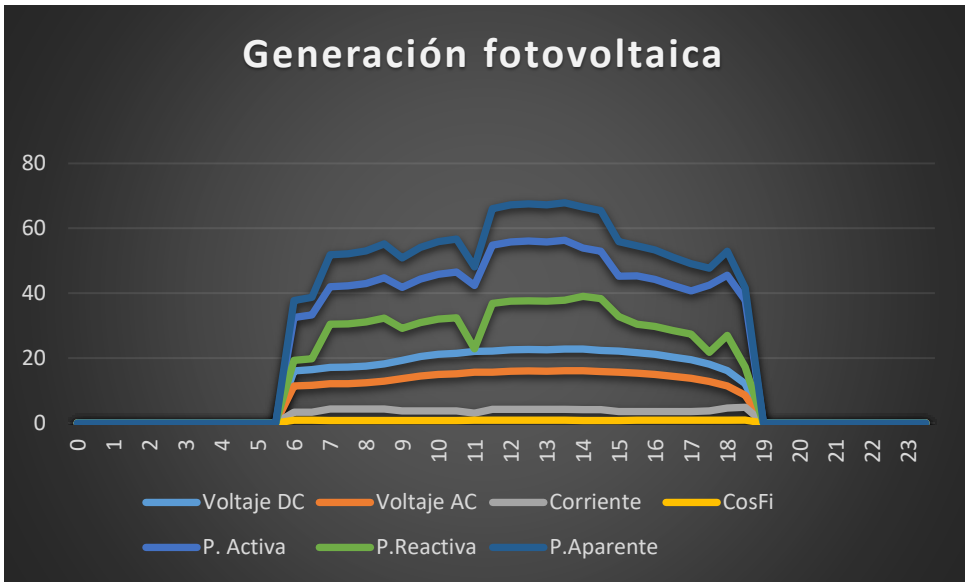
El sistema bajo análisis genera tensiones con un perfil geométrico adecuado en fase y secuencia, pero con una **deficiencia crítica de calidad de energía**. Los flancos abruptos y el ruido de conmutación exigen la implementación urgente de un **filtro pasivo LC o LCL** para suavizar las ondas y transformarlas en señales senoidales puras y seguras.

**Anexo C. Datos del emulador de microrred.**

De las mediciones realizadas con dos prototipos de nodo de microrred, con diferentes programaciones, se obtuvieron los datos, las pruebas se realizaron el 11 de mayo de 2026. El sistema bajo análisis genera tensiones en fase y secuencia, pero con una deficiencia crítica de calidad de energía. Visualizada en los flancos abruptos y el ruido de conmutación.

Esto exige la implementación urgente de un **filtro pasivo LC o LCL** para suavizar las ondas y transformarlas en señales senoidales puras y seguras.

| Hora | Voltaje DC | Voltaje AC | Corriente | CosFi | P. Activa | P.Reactiva | P.Aparente |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 16,1 | 11,38 | 3,32 | 0,86 | 32,49 | 19,28 | 37,78 |
| 6,5 | 16,5 | 11,67 | 3,32 | 0,86 | 33,32 | 19,76 | 38,74 |
| 7 | 17,1 | 12,09 | 4,29 | 0,81 | 42,01 | 30,42 | 51,87 |
| 7,5 | 17,2 | 12,16 | 4,29 | 0,81 | 42,25 | 30,6 | 52,17 |
| 8 | 17,5 | 12,37 | 4,29 | 0,81 | 42,98 | 31,13 | 53,07 |
| 8,5 | 18,2 | 12,87 | 4,29 | 0,81 | 44,72 | 32,38 | 55,21 |
| 9 | 19,3 | 13,65 | 3,73 | 0,82 | 41,75 | 29,13 | 50,91 |
| 9,5 | 20,5 | 14,5 | 3,73 | 0,82 | 44,35 | 30,96 | 54,09 |
| 10 | 21,2 | 14,99 | 3,73 | 0,82 | 45,85 | 32 | 55,91 |
| 10,5 | 21,5 | 15,2 | 3,73 | 0,82 | 46,49 | 32,46 | 56,7 |
| 11 | 22,1 | 15,63 | 3,08 | 0,88 | 42,36 | 22,87 | 48,14 |
| 11,5 | 22,2 | 15,7 | 4,21 | 0,83 | 54,86 | 36,87 | 66,1 |
| 12 | 22,6 | 15,98 | 4,21 | 0,83 | 55,84 | 37,53 | 67,28 |
| 12,5 | 22,7 | 16,05 | 4,21 | 0,83 | 56,08 | 37,69 | 67,57 |
| 13 | 22,6 | 15,98 | 4,21 | 0,83 | 55,84 | 37,53 | 67,28 |
| 13,5 | 22,8 | 16,12 | 4,21 | 0,83 | 56,33 | 37,86 | 67,87 |
| 14 | 22,8 | 16,12 | 4,13 | 0,81 | 53,93 | 39,04 | 66,58 |
| 14,5 | 22,4 | 15,84 | 4,13 | 0,81 | 52,99 | 38,36 | 65,42 |
| 15 | 22,2 | 15,7 | 3,56 | 0,81 | 45,27 | 32,78 | 55,89 |
| 15,5 | 21,7 | 15,34 | 3,56 | 0,83 | 45,33 | 30,45 | 54,61 |
| 16 | 21,2 | 14,99 | 3,56 | 0,83 | 44,29 | 29,76 | 53,36 |
| 16,5 | 20,3 | 14,35 | 3,56 | 0,83 | 42,4 | 28,5 | 51,09 |
| 17 | 19,5 | 13,79 | 3,56 | 0,83 | 40,75 | 27,37 | 49,09 |
| 17,5 | 18,1 | 12,8 | 3,73 | 0,89 | 42,49 | 21,76 | 47,74 |
| 18 | 16,2 | 11,46 | 4,62 | 0,86 | 45,53 | 27,03 | 52,95 |
| 18,5 | 12,1 | 8,56 | 4,86 | 0,91 | 37,86 | 17,24 | 41,6 |


Generación fotovoltaica
80
60
40
20
0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Voltaje DC
Voltaje AC
Corriente
CosFi
P. Activa
P.Reactiva
P.Aparente