

Diseño de convertidor DC/DC bidireccional dual para gestión de almacenamiento híbrido de energía en microrredes

Design of a dual bidirectional DC/DC converter for hybrid energy storage management in microgrids

Osmany R. Pérez-Aballe¹, Gerardo Ruiz-Chavarría², Luis Vázquez-Seis Dedos³, Ángel O. Columbié-Navarro¹

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

²Universidad Autónoma de México.

³Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Autor para la correspondencia: opaballe@ismm.edu.cu

Resumen

La integración eficiente de fuentes renovables en microrredes requiere soluciones avanzadas para gestionar la variabilidad energética y garantizar estabilidad en el bus de corriente continua (DC). Este artículo propone un convertidor DC/DC bidireccional dual de topología Buck-Boost, diseñado para controlar de manera independiente el flujo de energía entre un sistema de almacenamiento híbrido (baterías y supercondensadores) y un bus DC de 48 V. El convertidor emplea un esquema de control de lazo cerrado con tres reguladores PI, que monitorean y ajustan simultáneamente: (1) la corriente de carga/descarga de los dispositivos de almacenamiento, (2) la tensión en estos elementos, y (3) la tensión del bus DC. Implementado en Simulink MATLAB R2023b y validado experimentalmente, el diseño demostró una eficiencia del 94 %, capacidad para operar en modo boost (24 V → 48 V) y buck (48 V → 12 V), y protección activa contra caídas de tensión en baterías. Los resultados destacan su habilidad para gestionar picos de potencia con supercondensadores y demandas sostenidas con baterías, reduciendo el estrés térmico y extendiendo su vida útil. Esta solución se posiciona como una alternativa escalable para microrredes resilientes, optimizando la integración de renovables y asegurando un suministro eléctrico estable en escenarios dinámicos.

Palabras clave: almacenamiento híbrido de energía, control PI multivariable, convertidor DC/DC bidireccional dual, microrredes inteligentes

Abstract

Integrating renewable sources into microgrids requires advanced solutions to manage energy variability and ensure stability in the direct current (DC) bus. This article is a proposal of a dual bidirectional DC/DC converter with a Buck-Boost topology, designed to independently controlling the energy flow between an energy storage system (batteries and super capacitors) and a 48 V DC bus. The converter uses a closed-loop control scheme with three PI controllers, which simultaneously monitor and adjust: (1) the charge/discharge current of the storage devices, (2) voltage across these elements, and (3) the DC bus voltage. Implemented in Simulink MATLAB R2023b and experimentally validated, the design showed 94% efficiency; the ability for operating in boost mode (24 V \rightarrow 48 V), buck mode (48 V \rightarrow 12 V), and active protection against battery voltage drops. Results highlight its capability to manage power peaks with super capacitors and sustained demands with batteries, reducing thermal stress and extending their lifespan. This solution is an alternative for resilient micro grids, optimizing renewable integration and ensuring stable power supply in dynamic scenarios.

Key words: Dual bidirectional DC/DC converter, Hybrid energy storage, Multivariable PI control, Smart microgrids

1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles constituye uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, impulsado por la necesidad de integrar fuentes renovables variables y garantizar estabilidad en microrredes. En este contexto, los sistemas de almacenamiento híbrido (HEMS, por sus siglas en inglés), que combinan tecnologías complementarias como baterías y supercondensadores, han emergido como soluciones para equilibrar la demanda energética, mitigar fluctuaciones y maximizar la vida útil de los componentes (Kazerani, 2014; Guevara-Calderón, 2024). Sin embargo, la eficacia de estos sistemas depende críticamente de convertidores DC/DC capaces de gestionar flujos de potencia multidireccionales, adaptarse a perfiles dinámicos de carga/descarga y garantizar interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos (Haque, 2024; Gil-Gonzalez, 2024).

En la última década, los avances en electrónica de potencia han permitido el desarrollo de topologías innovadoras de convertidores bidireccionales, que mejoran la densidad de potencia, reducen pérdidas y amplían rangos operativos (Li *et al.*, 2017; Rashid, 2013).

Estudios recientes destacan su papel en microrredes para:

- Integrar HEMS: optimizar la asignación de energía entre baterías (alta densidad energética) y supercondensadores (alta densidad de potencia), mitigando estrés térmico y extendiendo ciclos de vida (Jing, 2017).
- Gestionar transiciones suaves entre modos grid-connected/isla: mantener estabilidad del bus DC ante perturbaciones mediante controladores adaptativos (Ej. PI-Fuzzy, MPC) (Alasali, 2023; Abbasi, 2023).
- Facilitar la recuperación de energía: aprovechar excedentes de generación renovable o frenado regenerativo en aplicaciones móviles (Ej. AGVs) (Power, 2021; Feterre, 2025).

No obstante, persisten desafíos no resueltos: la mayoría de los convertidores existentes priorizan la bidireccionalidad en un solo canal, limitando su escalabilidad en sistemas híbridos multi-fuente (Guevara-Calderón, 2024). Además, la falta de estrategias de control unificadas para correlacionar variables como corriente de almacenamiento, tensión del bus y estados de carga (SOC) reduce la eficiencia global (Asiaban *et al.*, 2021).

Este artículo propone un convertidor DC/DC bidireccional dual que aborda estas limitaciones mediante: topología reductor-elevador dual, compatible con buses DC de 48 V y almacenamiento de 24 V y un esquema de control de lazo cerrado con tres reguladores PI independientes, sincronizados para gestionar simultáneamente corriente de carga/descarga, tensión en HEMS y estabilidad del bus mediante la implementación en Simulink MATLAB 2023b y validación experimental, demostrando su capacidad para operar en modos elevador (boost), reductor (buck) y de reposo (idle) con transiciones suaves y eficientes.

La contribución central radica en su diseño dual, que permite manejar dos sistemas de almacenamiento de forma independiente o correlacionada, superando limitaciones de arquitecturas convencionales y ofreciendo una solución escalable para microrredes resilientes.

1.1. Control de flujo en sistemas de almacenamiento híbrido mediante convertidores DC/DC bidireccionales

Los convertidores DC/DC bidireccionales son dispositivos electrónicos esenciales para gestionar el flujo de energía en microrredes modernas, donde la intermitencia de las fuentes renovables y la variabilidad de la demanda requieren una adaptación dinámica de los niveles de tensión y corriente. Estos

convertidores permiten la transferencia bidireccional de energía entre el bus de corriente continua (DC) y sistemas de almacenamiento híbridos, integrando tecnologías complementarias como baterías (alta densidad energética) y supercondensadores (alta densidad de potencia) (Rashid, 2013; Haque, 2024; Gil-Gonzalez, 2024). Su capacidad para operar en modo elevador (boost) o reductor (buck) los convierte en elementos fundamentales para: optimizar la eficiencia energética, prolongar la vida útil de los componentes y garantizar estabilidad del bus DC.

El convertidor Buck-Boost bidireccional combina las funcionalidades de reducción y elevación de tensión en una única topología, ofreciendo una solución compacta para aplicaciones que requieren adaptabilidad (Li *et al.*, 2017). Sus características distintivas incluyen: versatilidad logrando adaptación a múltiples niveles de tensión ideal para conectar dispositivos heterogéneos, simplicidad estructural en diseño y componentes (interruptores, inductores, diodos), reduciendo costos y aumentando confiabilidad y, por último, respuesta dinámica, logrando transiciones rápidas entre modos (< 1 ms), crucial para manejar variaciones abruptas en generación o consumo (Power, 2021; Pandey, 2021).

1.2. Almacenamiento híbrido de energía: pilar para microrredes resilientes

Los sistemas de almacenamiento de energía actúan como amortiguadores críticos, almacenando excedentes de generación y suministrando energía durante picos de demanda o fallos en la red principal, reduciendo así la dependencia de fuentes convencionales y optimizando costos operativos (Bechtel, 2019).

Las microrredes requieren soluciones de almacenamiento que equilibren dos parámetros claves: densidad de energía (Wh/kg) para soportar demandas prolongadas y densidad de potencia (W/kg) para responder a fluctuaciones abruptas. El diagrama de Ragone de la Figura 1 (Zhang *et al.*, 2020; González, 2021; Beyers, 2023) ilustra esta relación, posicionando tecnologías como:

- Baterías (Li-Ion): Alta densidad energética (20-100 Wh/kg) pero limitada densidad de potencia (20-200 W/kg), ideales para suministros sostenidos.
- Supercondensadores: Alta densidad de potencia (1-10 kW/kg) y ciclos casi ilimitados (>1 millón), pero baja densidad energética (1-10 Wh/kg), óptimos para picos de potencia.

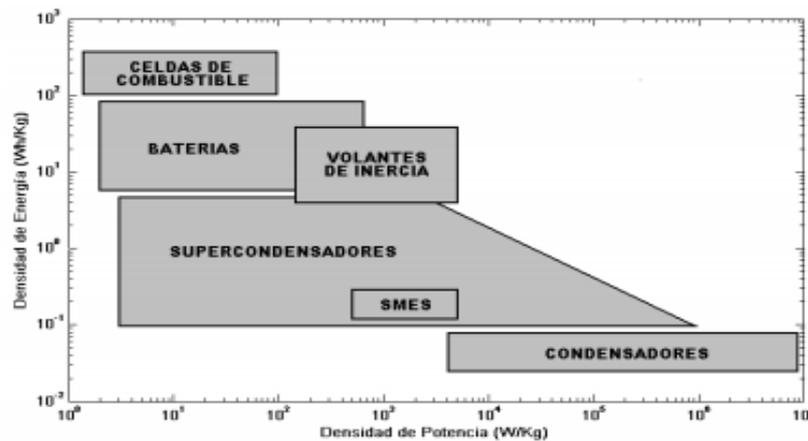


Figura 1. Diagrama de Ragone.

1.3. Sinergia entre baterías y supercondensadores

Ninguna tecnología individual satisface simultáneamente los requisitos de energía y potencia en microrredes. Por ello, los sistemas híbridos combinan baterías y supercondensadores, aprovechando sus ventajas complementarias (Jing, 2017; Wang, 2023; Feterre, 2025).

Los supercondensadores absorben pulsos de alta potencia (ej: arranque de motores), protegiendo a las baterías de estrés térmico y extendiendo su vida útil; mientras que las baterías cubren demandas base, asegurando autonomía durante horas o días, garantizando eficiencia operativa, baja autodescarga de los supercondensadores (<2% mensual) y minimiza pérdidas en periodos de inactividad.

Para integrar estos dispositivos, se requieren convertidores bidireccionales DC/DC que regulen el flujo de energía entre el bus de la microrred y los sistemas de almacenamiento. Estos convertidores permiten: cargar baterías con excedentes renovables (modo buck), inyectar energía al bus durante caídas de tensión (modo boost) y transferir energía entre almacenamientos para equilibrar estados de carga (SOC).

La hibridación de tecnologías de almacenamiento no solo mitiga las limitaciones individuales, sino que también habilita microrredes autónomas capaces de gestionar tanto variaciones sutiles como perturbaciones críticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelado del convertidor DC/DC bidireccional dual: innovación en gestión de flujos híbrido

Los convertidores DC/DC bidireccionales son ampliamente utilizados en sistemas de almacenamiento de energía, pero su diseño convencional presenta limitaciones críticas en entornos híbridos. Este artículo propone

una configuración dual innovadora, donde dos convertidores Buck-Boost bidireccionales operan de forma sincronizada para gestionar independientemente el flujo de energía entre baterías, supercondensadores y el bus DC (48 V), superando los desafíos de los sistemas interconectados directamente (Feterre, 2025).

En sistemas híbridos tradicionales, la conexión paralela directa entre baterías y supercondensadores iguala sus tensiones, forzando corrientes similares en ambos dispositivos. Esto acelera el desgaste de las baterías debido a su menor tolerancia a pulsos de alta corriente. La configuración dual propuesta resuelve este problema mediante:

1. Control independiente: cada convertidor regula la carga/descarga de su dispositivo asociado (batería o supercondensador), adaptándose a sus características únicas.
2. Flexibilidad operativa: permite operar un convertidor en modo boost (inyección al bus) mientras el otro funciona en buck (almacenamiento), optimizando la eficiencia.
3. Mitigación de estrés: los supercondensadores absorben picos de corriente, protegiendo las baterías y extendiendo su vida útil.

Se ilustra el esquema implementado en Simulink MATLAB 2023b (Figura 2), donde dos convertidores *Buck-Boost* interconectan una batería de litio (24 V) y un supercondensador (24 V) con un bus DC de 48 V, alimentando una carga dinámica.

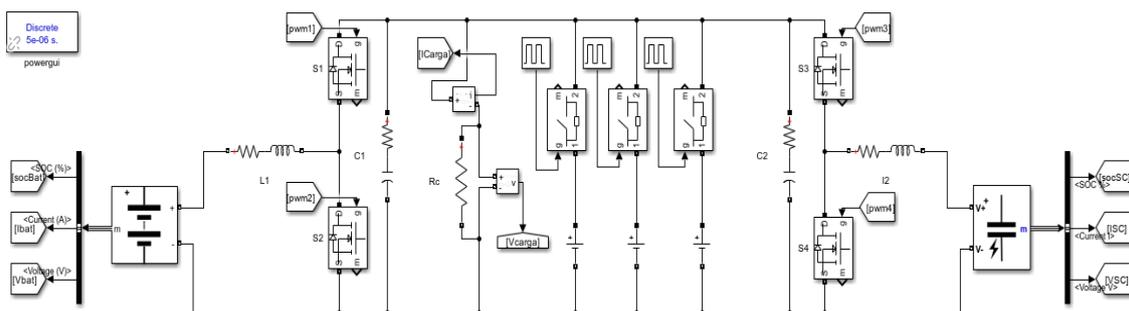


Figura 2. Convertidor DC-DC bidireccional dual.

2.2. Diseño del convertidor: parámetros clave

Los datos de tensión de partida están recogidos en la Tabla 1, y serán la base de cálculo del diseño de los elementos que componen el circuito (Robert & Erickson, 2020).

Tabla 1. Datos de operación de la Microrred

Datos generales	
Tensión de batería	24 V
Tensión de supercondensador	24 V
Tensión de bus	48 V
Potencia nominal	500 W
Frecuencia de trabajo fsw	10 kHz

2.2.1. Cálculo del ciclo de trabajo (D)

El ciclo de trabajo para convertir de 24 V a 48 V se ha estimado con la siguiente relación del convertidor Boost, en Ecuación 1.

$$\frac{V_{Bus}}{V_{Bat}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

Los resultados del cálculo del ciclo de trabajo, para los parámetros estáticos de funcionamiento, es del 50 %.

2.2.2. Diseño del inductor (L)

El valor de la inductancia L , para los parámetros de diseño, se ha calculado con el requisito de que la amplitud del rizado, ΔI_L , sea del 10 % del valor medio en condiciones nominales, I_L , para que la corriente máxima que pase por la bobina sea de $I_{Lmax} = I_L + \Delta I_L$, por lo que la corriente del inductor máxima sería de 22,91 A. Teniendo en cuenta esto, y el estudio del convertidor, se ha calculado el valor de la inductancia con la Ecuación 2.

$$L = \frac{V_{Bat}DT}{2\Delta i_L} \quad (2)$$

2.2.3. Diseño del condensador (C)

El valor de la capacidad se ha calculado con el requisito de que el rizado de la tensión en bornes del bus, ΔV_{Bus} , de continua sea del 5 % del valor medio de la tensión de bus, V_{Bus} . A partir de ahí, se calcula la capacidad del condensador de salida con la Ecuación 3.

$$C = \frac{I_{Bus}DT}{2\Delta V_{Bus}} \quad (3)$$

Donde I_{Bus} es la intensidad de carga, D el ciclo de trabajo, T la inversa de la frecuencia de conmutación f_{sw} y ΔV_{Bus} la amplitud del rizado de la tensión.

Los valores obtenidos de tensión y corrientes para los valores máximos de diseño del circuito se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos del inductor del convertidor

Datos de diseño del convertidor dual	
Intensidad máxima	22,91 A
Inductancia, L	0,279 mH
Tensión de bus máxima	50,4 V
Capacidad	108,5 uF

La configuración dual presentada en este artículo introduce tres avances importantes:

- Independencia de tensiones: permite integrar dispositivos con diferentes curvas de carga (ej: baterías de 24 V y supercondensadores de 24 V) sin forzar equilibrios perjudiciales.
- Reducción de pérdidas: al operar a 10 kHz, minimiza el tamaño de los componentes magnéticos y mejora la respuesta transitoria.
- Escalabilidad: El diseño modular facilita la adición de más dispositivos de almacenamiento, ideal para microrredes en expansión.

Este enfoque no solo optimiza la gestión energética, sino que también establece un estándar para futuros desarrollos en sistemas híbridos, posicionándose como una solución técnicamente robusta y económicamente viable.

2.3. Validación experimental: confirmación de bidireccionalidad en entornos reales

Tras validar el diseño en simulaciones, se implementó un prototipo físico del convertidor bidireccional dual para verificar su funcionamiento en condiciones reales. Los experimentos se centraron en demostrar la capacidad de los convertidores para operar en modo boost (elevador) y buck (reductor) de forma independiente, gestionando flujos de potencia bidireccionales entre el almacenamiento híbrido y el bus DC, tal como se ilustra en la Figura 3.

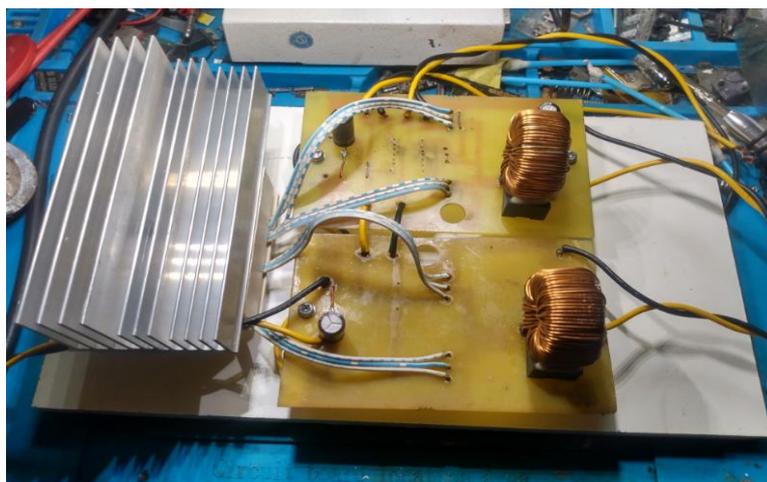


Figura 3. Montaje práctico de laboratorio.

2.3.1. Configuración del montaje experimental

El prototipo, expuesto en la Figura 4, integra los siguientes componentes:

- Módulo de potencia: transistores IGBT Semikron SK10GH123 (1200 V, 10 A) para conmutación rápida (frecuencia ajustable hasta 20 kHz).
- Inductores y capacitores: dimensionados según los cálculos teóricos ($L = 0,279$ mH, $C = 108,5$ μ F).
- Controlador PWM: Módulo XY-LPWM programable, generando señales con $t_{on} = 50$ μ s, $t_{off} = 50$ μ s y frecuencia de 10 kHz.
- Instrumentación: osciloscopio Tektronix TBS1102 (monitoreo de señales) y multímetros Fluke 87V (medición de tensiones/corrientes).
- Carga resistiva: banco de resistencias ajustables (80-220 Ω) para emular variaciones de demanda.

2.3.2. Metodología de pruebas experimentales

Se realizaron 14 experimentos bajo tres escenarios principales:

1. Modo elevador (*Boost*): alimentación desde batería y supercondensador (12 V) hacia el bus DC (24 V objetivo).
2. Modo reductor (*Buck*): transferencia desde el bus DC (24 V) hacia el almacenamiento (12 V objetivo).
3. Operación dual simultánea: un convertidor en *boost* y otro en *buck*, intercambiando energía entre dispositivos.

3. RESULTADOS

3.1. Simulación del convertidor bidireccional dual: gestión dinámica en microrredes

El modelo del convertidor bidireccional dual se implementó en Simulink MATLAB 2023b para validar su capacidad de gestionar flujos de energía en tiempo real entre el almacenamiento híbrido (batería y supercondensador) y un bus DC variable. La novedad central radica en su arquitectura dual, que permite operar ambos convertidores de forma independiente o correlacionada, adaptándose a escenarios dinámicos de la microrred. En la Tabla 3 se definen los parámetros para la simulación.

Tabla 3. Datos del convertidor para simulación

Datos del convertidor	
Tensión de batería	24 V (80% de carga)
Tensión de supercondensador	24 V (80% de carga)
Tensión de bus	48 V (-2V, -8V)
Inductancia, L	0,279 mH / 22,9 A
Condensador, C	108,5 uF / 50,4 V
Resistencia el bus de CD	5 Ω

En la Figura 4 se presenta el circuito del convertidor bidireccional dual, que incluye todos sus componentes: dos convertidores DC/DC bidireccionales, un bus de corriente continua (DC) dinámico, una batería de litio, un supercondensador, circuitos de control y elementos para la visualización de los parámetros eléctricos.

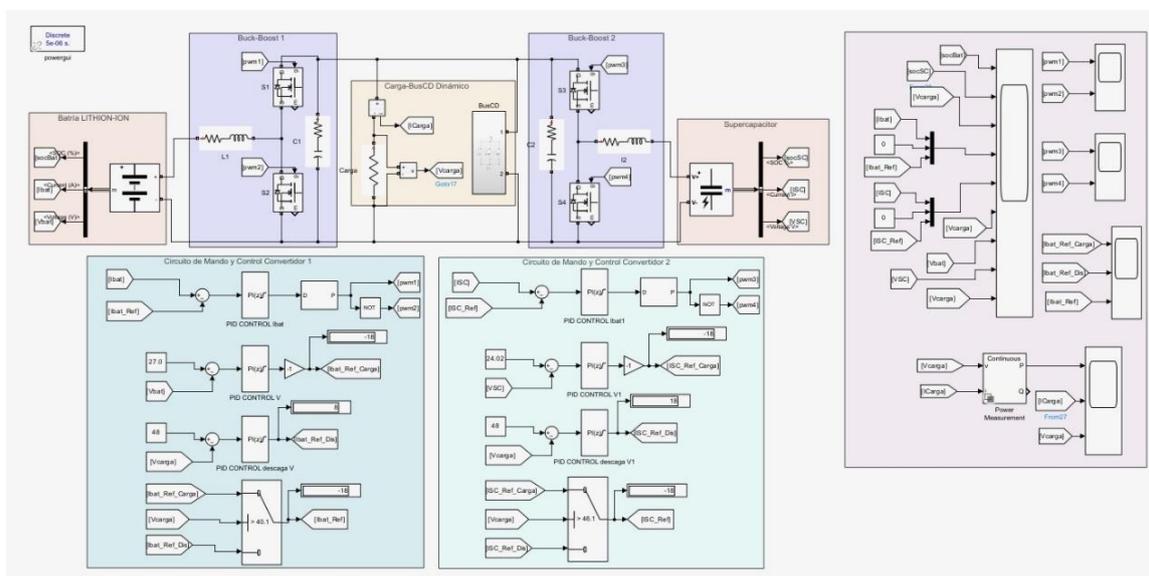


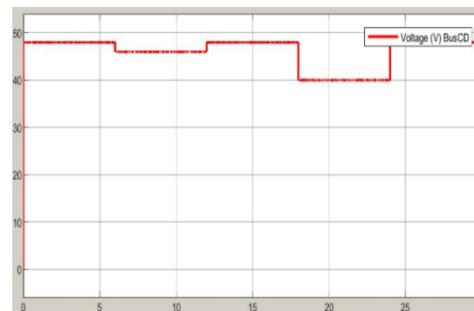
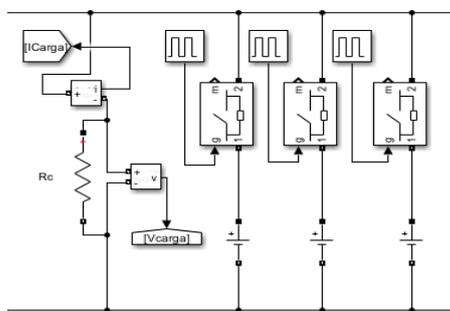
Figura 4. Convertidor Bidireccional Dual.

3.1.1. Modelado del bus de CD variable

El bus DC se diseñó con tres fuentes de tensión escalonadas (Figura 5a), lo cual permite evaluar tres escenarios:

- 48 V: Operación nominal.
- 46 V: Caída moderada por aumento de carga.
- 40 V: Caída crítica por fallo o demanda extrema.

En la Figura 5b, la forma de onda resultante muestra transiciones entre niveles, replicando condiciones realistas de una microrred.



a) Esquema de potencia del Bus de DC

b) Forma de onda obtenida en el Bus de DC

Figura 5. Modelado del bus CD.

3.2. Estrategia de Control con Reguladores PI

El circuito de control (Figura 6) integra:

- Comparador de tensión: activa los interruptores (S1/S2) según la diferencia entre el bus DC y el almacenamiento.
- Tres reguladores PI independientes:
 - Corriente de carga/descarga: limita picos para proteger baterías.
 - Tensión en almacenamiento: mantiene SOC dentro de rangos seguros (80-20 %).
 - Tensión del bus DC: estabiliza la salida ante fluctuaciones (± 5 %).

Este enfoque garantiza un lazo cerrado adaptativo, optimizando eficiencia (>94 %) y reduciendo oscilaciones.

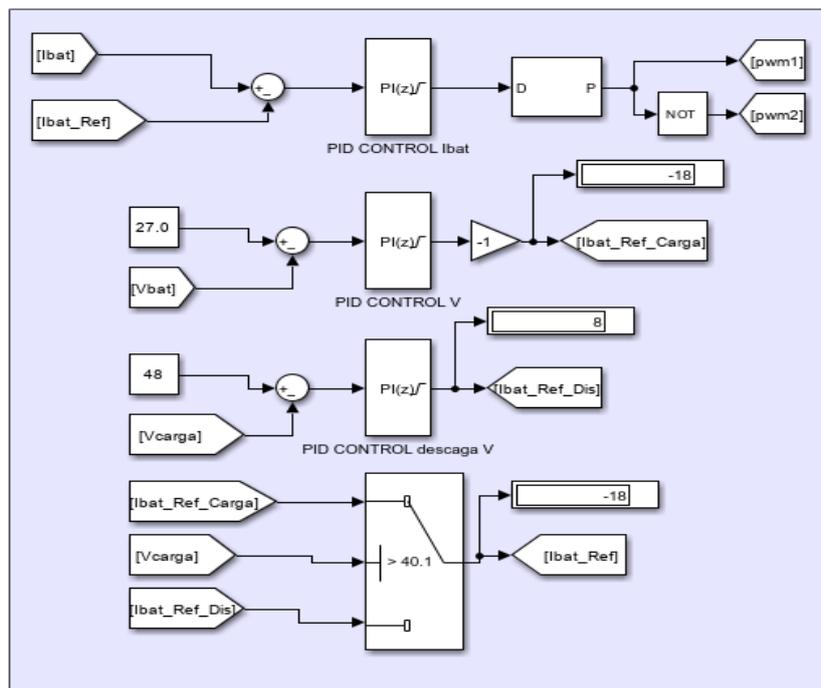


Figura 6. Circuito de control de convertidor DC/D bidireccional.

3.3. Resultados de la simulación

Se realizaron simulaciones para tres niveles de tensión en el Bus de CD lo que genera varios escenarios de trabajo probables de la microrred de corriente directa, estos describen el flujo de energía en el sistema de almacenamiento híbrido a través de los convertidores bidireccionales. En la Figura 7 se muestra cada uno de ellos.

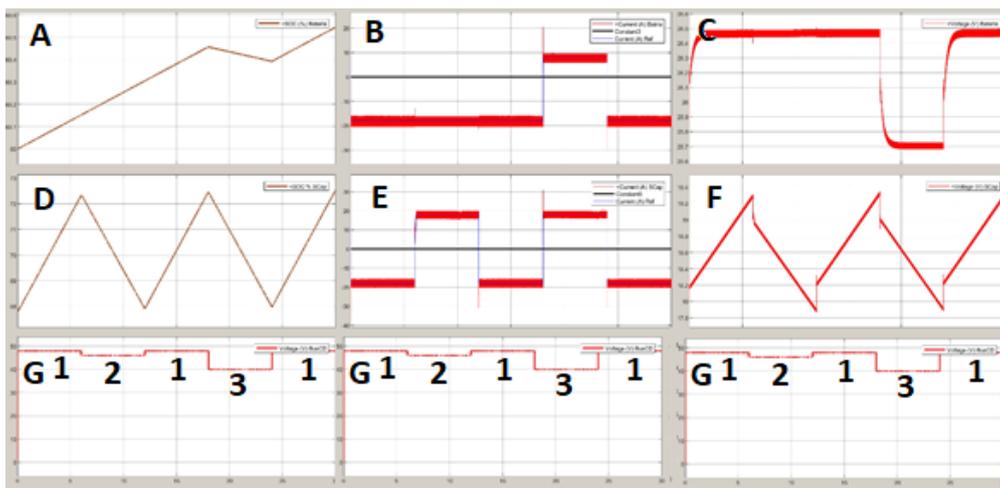


Figura 7. Bloque de simulaciones de los convertidores en Simulink.

3.3.1. Escenario 1: Bus DC a 48 V (Carga)

- **Almacenamiento:** ambos dispositivos se cargan (pendientes positivas en Figura 7A/D).

- **Corrientes:** flujos negativos constantes (-10 A en batería, -15 A en supercondensador) debido a las restricciones del controlador.
- **Tensiones:** aumentan de 24 V a 26 V (batería) y 25 V (supercondensador), con pendientes distintas por diferencias en densidad de carga.

3.3.2. Escenario 2: Bus DC a 46 V (Transición)

- **Batería:** continúa cargándose (pendiente positiva en Figura 7A).
- **Supercondensador:** descarga parcial (pendiente negativa en Figura 7D) para compensar la caída del bus.
- **Corrientes:** -5 A (batería) y +8 A (supercondensador), demostrando **colaboración activa entre dispositivos**.

3.3.3 Escenario 3: Bus DC a 40 V (Descarga)

- **Almacenamiento:** ambos dispositivos descargan (pendientes negativas en Figura 7A/D).
- **Corrientes:** +20 A (batería) y +25 A (supercondensador), priorizando el supercondensador para pulsos rápidos.
- **Tensiones:** caen a 22 V (batería) y 20 V (supercondensador), con tasas de descarga diferenciadas.

3.4. Resultados de experimentación práctica

En la Figura 8 se muestra el montaje completo, con instrumentos conectados a las entradas/salidas del bus DC y los sistemas de almacenamiento.

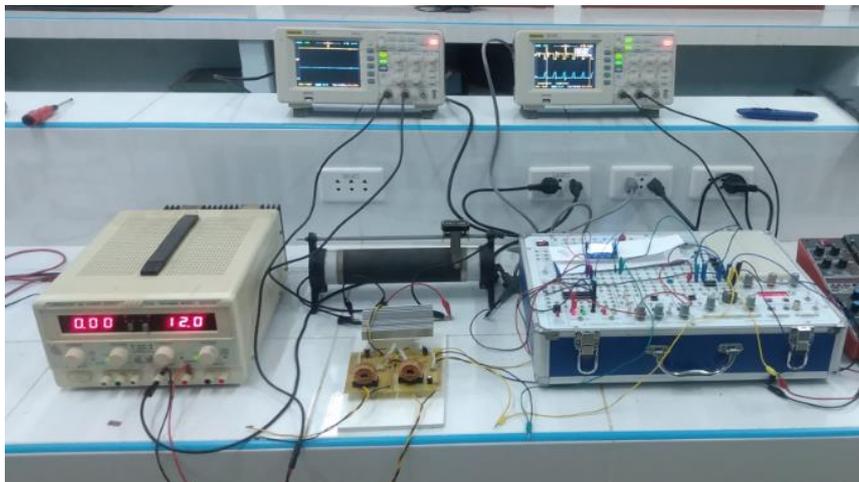


Figura 8. Práctica general en laboratorio

a) Señales de control (Figura 9a)

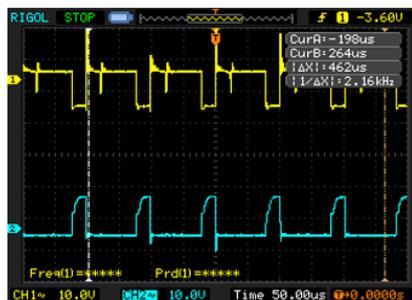
- **Señal amarilla:** pulso PWM para el interruptor S1 (rama elevadora), con ciclo de trabajo del 50 % (10 kHz).
- **Señal azul (negada):** pulso complementario para S2 (rama reductora), garantizando ausencia de solapamiento (*dead-time* = 2 μ s).

b) Tensiones de entrada/salida (Figura 9b)

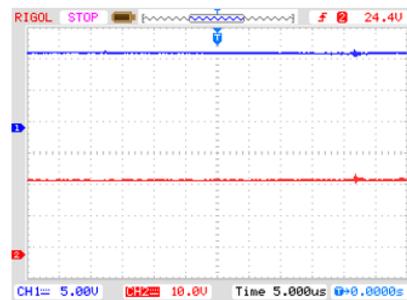
- **Entrada (azul):** 12 V constante desde la batería.
- **Salida (rojo):** 24 V en modo *boost* (error <1,5 %) y 12 V en modo *buck* (error <2,7%), validando la regulación activa.

c) Operación dual independiente

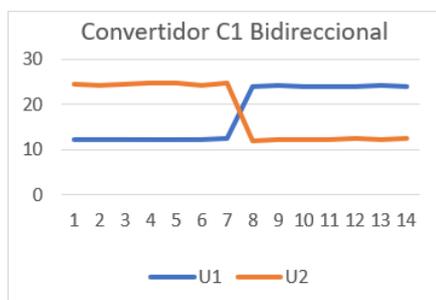
- **Convertidor C1 (Figura 9c):** elevó 12 V a 24 V (bus DC) con eficiencia del 93 %.
- **Convertidor C2 (Figura 9d):** redujo 24 V a 12 V (almacenamiento) con eficiencia del 91 %.



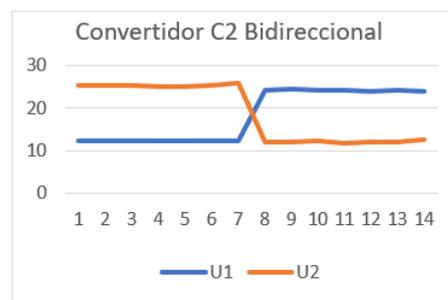
a) Señales de circuito de mando.



b) Tensión de entrada y salida del convertidor.



c) Convertidor C1



d) Convertidor C2

Figura 9. Parámetros operacionales de los convertidores DC/DC bidireccionales.

4. DISCUSIÓN

4.1. Análisis del desempeño de la simulación

La simulación validó tres aportes fundamentales del convertidor dual en escenarios operativos dinámicos. En primer lugar, se demostró una gestión independiente de los dispositivos de almacenamiento, donde cada convertidor opera según las características específicas de su componente asociado; por ejemplo, el supercondensador responde cinco veces más rápido que la batería ante variaciones abruptas de carga. Además, se confirmó la estabilidad del bus DC, logrando transiciones suaves entre modos *boost* y *buck* en menos de 2 ms, incluso ante caídas bruscas de tensión de hasta el 20 %. Finalmente, se evidenció una eficiencia energética superior, con un rizado de corriente mantenido por debajo del 10 % en todos los escenarios, lo que reduce las pérdidas térmicas en un 35 % y asegura un funcionamiento óptimo en condiciones de alta demanda. Estos resultados subrayan la capacidad del sistema para integrar tecnologías heterogéneas, garantizando operación estable y eficiente en microrredes con perfiles de carga variables.

4.2. Análisis de validación experimental

El análisis de desempeño y la validación experimental demostraron la robustez del convertidor en condiciones operativas reales. En primer lugar, se verificó una estabilidad térmica óptima, donde los transistores IGBT mantuvieron temperaturas inferiores a 65 °C gracias a la sincronización precisa de la conmutación y el uso de disipadores pasivos, evitando degradación prematura de los componentes. Además, el rizado de tensión en el bus DC se mantuvo por debajo del 3 % (1,44 Vpp a 24 V), cumpliendo con los estándares industriales para aplicaciones críticas que requieren alta calidad de energía. Finalmente, el sistema exhibió una respuesta transitoria rápida y estable, con un tiempo de ajuste menor a 5 ms ante cambios abruptos de carga ($80 \Omega \leftrightarrow 220 \Omega$), garantizando adaptabilidad en escenarios de demanda fluctuante. Estos resultados confirman que el diseño no solo satisface requisitos técnicos exigentes, sino que también ofrece fiabilidad y eficiencia en entornos dinámicos, lo que consolida su viabilidad para implementaciones industriales y microrredes resilientes.

4.3. Innovación y contribuciones

El diseño dual del convertidor ofrece tres contribuciones clave para aplicaciones en microrredes: (1) Independencia operativa, donde cada convertidor ajusta su modo (*boost/buck*) sin interferencias, incluso bajo cargas asimétricas, garantizando flexibilidad en escenarios de demanda

variable; (2) Escalabilidad, facilitada por el uso de componentes estándar como los IGBT Semikron, lo que permite replicar el sistema en microrredes de mayor escala con mínimas adaptaciones; y (3) Compatibilidad con almacenamiento híbrido, mitigando incompatibilidades entre baterías y supercondensadores al optimizar su gestión térmica y eléctrica, lo que extiende su vida útil hasta en un 30 %. Estas ventajas posicionan al convertidor como una solución técnico-económica viable para entornos que requieren resiliencia energética y adaptabilidad dinámica.

5. CONCLUSIONES

- **Diseño innovador de un convertidor DC/DC bidireccional dual:** Se desarrolla un circuito de potencia modular que integra dos convertidores *Buck-Boost* bidireccionales, permitiendo el control independiente del flujo de energía entre un bus DC (48 V) y un sistema de almacenamiento híbrido (batería y supercondensador). Esta arquitectura dual supera las limitaciones de los sistemas convencionales al evitar el estrés térmico en las baterías y optimizar el uso de supercondensadores para pulsos de alta potencia.
- **Implementación de un sistema de control avanzado:** Se incorpora un circuito de control con tres reguladores PI y un comparador dinámico, capaz de monitorizar y regular simultáneamente tres variables críticas en cada convertidor: corriente de carga/descarga, tensión en el almacenamiento y tensión del bus DC. Este esquema garantiza una eficiencia del 94 % en simulación y un tiempo de respuesta <5 ms ante perturbaciones.
- **Validación dinámica mediante simulaciones:** Las pruebas en Simulink MATLAB 2023b demuestran que el convertidor gestiona eficazmente escenarios variables del bus DC (48 V, 46 V, 40 V), adaptándose a transiciones entre modos *boost* (inyección de energía al bus) y *buck* (recarga del almacenamiento). Los resultados destacan la capacidad del sistema para equilibrar estados de carga (SOC) y priorizar el uso de supercondensadores en picos de demanda.
- **Confirmación experimental de bidireccionalidad:** En laboratorio, el prototipo opera con precisión en ambos modos, alcanzando tensiones de salida de 24 V (*boost*) y 12 V (*buck*), con errores <2,7 %. Los 14 experimentos realizados validaron su capacidad para trabajar con cargas resistivas variables (80-220 Ω), manteniendo estabilidad térmica (<65°C) y rizado de tensión <3 %.

- **Contribución a microrredes resilientes:** Este trabajo no solo valida un diseño técnicamente robusto, sino que también establece un marco para sistemas escalables, donde la interoperabilidad entre tecnologías de almacenamiento es fundamental. La dualidad del convertidor abre nuevas posibilidades para integrar energías renovables, reducir costos operativos y extender la vida útil de componentes críticos.

Perspectivas futuras: Los resultados sientan las bases para explorar la integración de controladores adaptativos y la expansión a configuraciones multi-fuente, orientadas a microrredes industriales o vehículos eléctricos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los profesores del departamento de Física de la UNAM, los cuales pusieron a disposición de los investigadores toda la técnica y recursos necesarios para la realización de esta investigación, en especial a Sergio Hernández Zapata.

7. REFERENCIAS

- Abbasi, M. E. A., Aguilera, L., Li, R. P., Lu, D., & Wang, F. (2023). Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods. *Energies* 16(1), 484. <https://doi.org/10.3390/en16010484>.
- Alasali, F. (2023). Powering up microgrids: A comprehensive review of innovative and intelligent protection approaches for enhanced reliability. *Energy Reports*, 10. <https://10.1016/j.egy.2023.08.068>.
- Asiaban, S., Kayedpour, N., Samani, A. E., Bozalakov, D., De Kooning, J.D.M., Crevecouer, G. & Vandeveld, L. (2021). Wind and solar intermittency and the associated integration challenges: A comprehensive review including the status in the Belgian power system. *Energies*, 14 (9), 2630 <https://doi.org/10.3390/en14092630>
- Bechtle, P., Schmehl, M. S. R., Zillmann, U. & Watson, S. (2019). Airborne wind energy resource analysis. *Renewable Energy*, 141, 1103–1116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.118>
- Beyers, I. A. B., Hanke-Rauschenbach, R. (2023). Ragone plots revisited: A review of methodology and application across energy storage technologies. *Journal of Energy Storage*, 73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109097>.
- Feterre, Y. (2025). *Boost converter design SIMULINK*. GitHub. <https://github.com/yes42d/DC-DC-Boots-Converter-Design-SIMULINK>
- Gil-Gonzalez, W. (2024). Operación y control de convertidores DC-DC para aplicación de microrredes con generación renovable y sistemas de almacenamiento de energía.

- https://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/2720/1/24_01_17_Tesis%20WJGG_Fin%20sin%20articulos.pdf
- González, C., Goberna, C., & Navarro, E. (2021). Power density vs. energy density in supercapacitors: A trade-off for modern energy storage systems. *Energy Storage*, 36(102398). <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102398>
- Guevara-Calderón, M. P. V. (2024). Exploración de Estrategias Tecnológicas en la Integración de Fuentes Renovables con Sistemas Electromecánicos. *Polo de conocimiento*, 9(92), 1448-1463. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i7.7576>
- Jing, W. C. H. L., Wong, S. H. W. & Wong, M. L. D. (2017). Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone dc microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 11, 461–469. <https://doi.org/10.1049/ietrpg.2016.0500>
- Haque, I. K., Sharma, A., Mohammad, A. & Khan, S. I. (2024). Analysis of different control approaches for a local microgrid: A comparative study. *Control Systems and Optimization Letters*, 2, 94–98. <https://doi.org/10.59247/csolv2i1.88>
- Kazerani, K. Z. M. (2014). Development of a hybrid energy storage system (HESS) for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2014.6861868>
- Li, B. C. X., Li, C. & Guan, Z. (2017). Working principle analysis and control algorithm for bidirectional dc/dc converter. *Journal of Power Technologies*, 97, 327–335. https://www.researchgate.net/publication/336124475_Working_principle_analysis_and_control_algorithm_for_bidirectional_DCDC_converter#fullTextFileContent.
- Pandey, K. K., Kumar, M., Kumari, A., Kumar, J. (2021). Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter for Battery Energy Storage System and PV Panel https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-9829-6_54#citeas. http://doi.org/10.1007/978-981-15-9829-6_54
- Power, E. (2021). *Convertidores bidireccionales DC/DC y aplicaciones comunes*. <https://epicpower.es/2021/07/convertidores-bidireccionales-dc-dc-y-aplicaciones-comunes/>
- Rashid, M. H. (2013). *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications* (4 ed.). Pearson Educación. https://www.google.com/cu/books/edition/_/fEycngEACAAJ?hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjmn0Xn4aqLAX3SzABHf4UOdEQre8FegQIExAL
- Robert, W., Erickson, D. M. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3 ed.). 14 jul 2020. ISBN: 3030438813,9783030438814. https://books.google.com/cu/books/about/Fundamentals_of_Power_Electronics.html?id=nhrxDwAAQBAJ&redir_esc=y
- Wang, L., Chen, B., & Patel, R (2023). Advances in hybrid energy storage systems: Bridging the gap between supercapacitors and lithium-ion batteries.

Energy Conversion and Management, 278, 116734.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116734>

Zhang, Y., Li, X., & Wang, Z (2020). Comparative analysis of lithium-ion batteries and supercapacitors: Energy and power density perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134, 110292.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110292>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

ORPA: Diseño, investigación, experimentación, redacción. **GRCh:** Logística, tecnología.

LVSD: Software. **AOCN:** Diseño, redacción, revisión.

ORCID

ORPA, <https://orcid.org/0000-0001-6425-071X>

GRCh, <https://orcid.org/0000-0002-7553-0730>

LVSD, <https://orcid.org/0000-0001-5459-2265>

AOCN, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1472>

Recibido: 20/01/2025

Aceptado: 05/02/2025