

Arquitectura *half-bridge* bidireccional no aislado para sistema de almacenamiento híbrido en microrred fotovoltaica: evaluación en PSIM

Non-Isolated Bidirectional Half-Bridge Architecture for Hybrid Energy Storage System in Photovoltaic Microgrids: Evaluation in PSIM

Nancy Reynosa Casas nancyreynosa6@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0002-6047-0592>

Yusbel Llorrente Cutiño rentecutinoyusbel@gmail.com ⁽²⁾

<https://orcid.org/0009-0004-6625-1096>

Christian E. Borges Alvarez christianborges696@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0000-5215-9812>

Yilena Paumier Leyva ypaumierl@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0002-5858-3483>

Osmany R. Pérez Aballe* opaballe@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

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

⁽¹⁾ Universidad de Moa, Moa, Cuba ⁽²⁾ Empresa Eléctrica, Sagua de Tánamo, Cuba

* Autor para la correspondencia

Resumen: Se presenta el diseño y la simulación en el *software* para la electrónica de potencia PSIM de un convertidor DC–DC bidireccional tipo puente completo para integrar un sistema híbrido de almacenamiento de energía en una microrred fotovoltaica. El objetivo es gestionar el flujo de potencia entre las fuentes y los almacenadores para suavizar transitorios, reducir el estrés de corriente en la batería y mantener niveles de tensión adecuados en el bus DC. Dadas las limitaciones de la versión de evaluación del programa de simulación de circuitos, se emplean elementos equivalentes para reproducir el comportamiento cuasi-estacionario del arreglo fotovoltaico, del banco de baterías y del módulo de supercondensadores. Se analizan siete escenarios de operación representativos (carga/descarga en ambas direcciones, soporte del supercondensador, y transferencia desde/hacia la generación), evaluando tensiones y corrientes clave. Los

resultados muestran bidireccionalidad efectiva y capacidad de desacoplo de potencia de alta frecuencia por parte del supercondensador, con implicaciones positivas sobre la vida útil de la batería. Se incluye, además, una estimación de costes a nivel de prototipo y se discuten limitaciones y trabajo futuro orientado a control dinámico y validación experimental.

Palabras clave: convertidores eléctricos, equipamiento electrónico, energía eléctrica

Abstract: This paper describes how the power electronics software PSIM was used to design and simulate a bidirectional full-bridge DC-DC converter. The goal is integrating hybrid storage system into a photovoltaic microgrid. The objective is to manage power flow between sources and storage devices in order to smooth transients, reduce current stress on the battery, and maintain appropriate voltage levels on the DC bus. Due to the limitations of the evaluation version of the circuit simulation program, equivalent elements were employed to reproduce the quasi-stationary behavior of the photovoltaic array, the battery bank, and the super capacitor module. Seven representative operating scenarios were analyzed (charging/discharging in both directions, super capacitor support, and power transfer from/to generation), evaluating key voltages and currents. The results demonstrate effective bidirectionality and high-frequency power decoupling capability provided by the supercapacitor, with positive implications for battery lifetime. In addition, a prototype-level cost estimation is included, and limitations and future work focused on dynamic control and experimental validation are discussed.

Key words: electrical converters, electric power, electronic equipment

1. Introducción

La penetración creciente de fuentes renovables variables en microrredes exige soluciones de almacenamiento que permitan acoplar generación y demanda, mitigando la intermitencia y los picos de potencia (Faisal *et al.*, 2018). En este contexto, los sistemas híbridos de almacenamiento (HESS) combinan dispositivos de alta energía específica (baterías LFP) con dispositivos de alta potencia específica (supercondensadores), de modo que cada tecnología opere cerca de su zona óptima (Ramos *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). El supercondensador atenúa transitorios y pulsos de corriente, mientras que la batería suministra la energía media, reduciendo sus ciclos de carga/descarga de alta amplitud y, por ende, su degradación (Tremblay &

Dessaint, 2009; Zhang *et al.*, 2017; Zubieta & Bonert, 2000; Eaton, 2023; Winston Battery, 2024; Pérez-Aballe *et al.*, 2025).

Para explotar estas ventajas es imprescindible un convertidor DC–DC bidireccional capaz de dirigir el flujo de energía desde la fuente fotovoltaica hacia el bus DC y los almacenadores, así como entre los propios almacenadores, en ambos sentidos (carga/descarga) (Mohan *et al.*, 2003; Ardi *et al.*, 2014; Erickson & Maksimović, 2020; Sutikno *et al.*, 2023). El presente trabajo aborda el diseño y la simulación de un convertidor *half-bridge* bidireccional que interconecta el bus DC con el bloque de baterías y con el módulo de supercondensadores.

Para este trabajo, el programa de simulación de circuitos (PSIM) resulta especialmente pertinente por estar orientado a electrónica de potencia, con modelos conmutados y promedio, bloques de control (modulación de ancho de pulso PWM, comparadores, PI) y fuentes dependientes que reproducen con rapidez y estabilidad el comportamiento de un *half-bridge* bidireccional y el intercambio de energía batería–supercondensador; además, facilita fijar condiciones iniciales, realizar barridos paramétricos y medir variables clave (i_L , V_{bus} , VSC), lo que encaja con el enfoque cuasi-estacionario por escenarios adoptado y, por su velocidad de simulación frente a entornos multipropósito, lo hace idóneo para diseño preliminar y validación de concepto en microrredes DC con HESS (Powersim, 2022).

En este marco, el estudio se centra en escenarios representativos, considerando las restricciones de la versión de evaluación, para: (I) verificar la bidireccionalidad y la continuidad del flujo de potencia, (II) observar el papel del supercondensador en la amortiguación de transitorios, y (III) establecer bases de dimensionado para inductancia, capacidad y semiconductores, apoyándose en criterios clásicos de diseño y notas de aplicación de drivers de compuerta (Infineon Technologies, 2017; Erickson & Maksimović, 2020; Powersim, 2022).

Contribuciones: (1) Síntesis de requisitos y topología *half-bridge* adecuada para HESS en microrred PV (Lin *et al.*, 2013; Ardi *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016; Tuluhong *et al.*, 2025); (2) modelo de simulación en PSIM con equivalentes prácticos que permiten explorar siete escenarios de operación (Powersim, 2022); (3) análisis comparativo de tensiones y corrientes que evidencia la descarga/recarga rápida del supercondensador y la consecuente reducción del esfuerzo sobre la batería (Zubieta & Bonert, 2000);

(4) estimación de coste de prototipo y discusión de limitaciones y trabajo futuro, apoyadas en criterios de diseño de convertidores y manejo práctico de drivers de compuerta.

1.1. Topologías HESS

Los HESS batería-supercondensador como se muestra en la figura 1, se suelen clasificar en pasivos, semi-activos y activos según el grado de acondicionamiento electrónico y control disponible (Sutikno *et al.*, 2023). Esta taxonomía se vincula con el reparto de potencia, el estrés en la batería y la eficiencia global del sistema (Mohan *et al.*, 2003).

ESS pasivo (Figura 1a): baterías y supercondensadores (SC) conectados directamente al bus DC, sin convertidores dedicados. Es la opción más simple y económica, pero el reparto de potencia depende de las impedancias internas y del estado de carga, lo que puede provocar picos de corriente y pérdidas por desajuste, acelerando el envejecimiento de la batería y reduciendo la eficiencia (Faisal *et al.*, 2018). El SC atenúa transitorios por su baja ESR, aunque sin control activo fino (Tshiani & Umenne, 2022).

Semi-activos: uno de los almacenadores se conecta mediante un convertidor bidireccional, permitiendo cierto control del flujo y de las tensiones/corrientes (Sutikno *et al.*, 2023).

- SC semi-activo (Figura 1b): el supercondensador se acopla a través del convertidor y la batería va directa al bus. Mejora el aprovechamiento del SC para picos y rizados, pero la batería sigue expuesta a variaciones no reguladas de corriente de media frecuencia (Bonert, 2000).

- Batería semi-activa (Figura 1c): la batería es la que se conecta mediante el convertidor, mientras el SC va directo. Esta variante protege la batería frente a picos (al limitar su corriente y derivar transitorios al SC), con impacto positivo en su vida útil (Tremblay & Dessaint, 2009; Ramos *et al.*, 2022).

Activos: ambos elementos se conectan mediante convertidores bidireccionales (arquitectura "paralelo activo"), habilitando control independiente de potencia y estado de carga (SoC) en cada rama y un reparto óptimo energía/potencia (Tuluhong *et al.*, 2025).

- Topología paralela (Figura 1d): batería y SC con sus propios convertidores; el SC atiende transitorios rápidos, la batería cubre demandas sostenidas, y el control coordina el reparto (Lin *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016; Erickson & Maksimović, 2020).
- Topología en cascada (Figura 1e): el SC entre batería y bus, actuando como “filtro” dinámico que aísla la batería de picos a costa de etapas adicionales de conversión y ligeras pérdidas de eficiencia (Wang *et al.*, 2022).

Cada enfoque presenta compromisos entre costo, complejidad y rendimiento. Las configuraciones pasivas son idóneas donde se prioriza la simplicidad y robustez, como en microrredes remotas. Las activas son adecuadas para control preciso, y las semi-activas ofrecen un término medio (Figura 1).

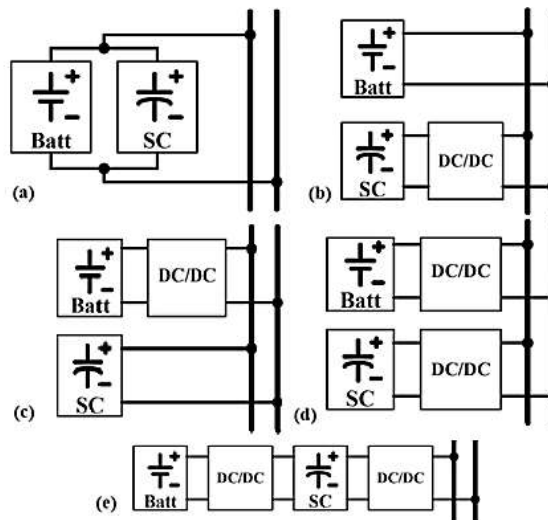


Figura 1. Configuraciones de gestión de HESS en microrredes (Jing *et al.*, 2017). a) Pasivo. b) SC semi-activo. c) Batería semi-activa. d) Activo paralelo. e) Activo serie.

1.1.1. Componentes y características claves

El dimensionamiento de un HESS se apoya en tres métricas interrelacionadas: densidad de energía (Wh/kg o Wh/L), densidad de potencia (W/kg) y durabilidad/ciclos (Pérez-Aballe *et al.*, 2025). El diagrama de Ragone que se muestra en la figura 2 resume el compromiso: las baterías ocupan el extremo energético, los supercondensadores el de potencia y otras tecnologías (volantes de inercia, sistemas hidro-neumáticos) se reparten según sus características físicas y de coste.

- Baterías (LFP): alta densidad energética ($\approx 100\text{--}250\text{ Wh/kg}$), eficiencia round-trip $>90\%$ y buen coste por kWh. Limitaciones ante potencia sostenida (C-rates altos $\rightarrow$ calentamiento y envejecimiento). El Sistema de gestión de energía (EMS) debe limitar corriente, gestionar térmicamente y planificar DoD/ciclos; conviene incorporar modelos de degradación para minimizar el LCOS.
- Supercondensadores: muy alta densidad de potencia (kW/kg), respuesta $\mu\text{s--ms}$ y vida útil del millón de ciclos; ideales como buffer para picos/transitorios. Compensación: baja energía específica y mayor coste por kWh $\rightarrow$ uso complementario, no como almacenamiento principal.
- Volantes e hidro-neumáticos: alta potencia y durabilidad, pero con exigencias mecánicas/coste que restringen su aplicación a instalaciones estacionarias o de mayor escala.

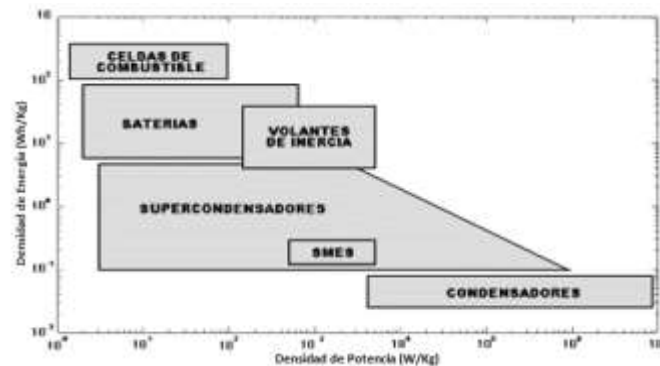


Figura 2. Diagrama de Ragone para el análisis del almacenamiento de energía (Pérez-Aballe *et al.*, 2025).

1.2. Baterías LFP y supercondensadores: modelos y características

En HESS, baterías y supercondensadores se combinan porque ofrecen prestaciones complementarias: las baterías aportan energía (autonomía) pero tienen resistencia interna mayor y sufren con picos sostenidos; los SC aportan potencia (pulsos $\mu\text{s--ms}$) y alivian el estrés de la batería, alargando su vida útil. El rendimiento conjunto depende también de la topología (pasiva, semi-activa, activa), que define cómo se conectan y controlan ambos almacenadores (Pérez-Aballe *et al.*, 2025).

En el modelado de la batería LFP se usa un equivalente tipo Thevenin ampliado como se muestra en la figura 3:

- Fuente de tensión controlada (VOC) en serie con R_s y dos ramas RC (R_1-C_1 , R_2-C_2) que capturan la dinámica de difusión (sólido/electrolito).
- Estados: SoC, V_1 , V_2 . Entrada: corriente I . Salida: tensión terminal V_T .
- Dependencias: VOC y parámetros (R_s , R_1 , C_1 , R_2 , C_2) varían con SoC, temperatura y sentido de la corriente.

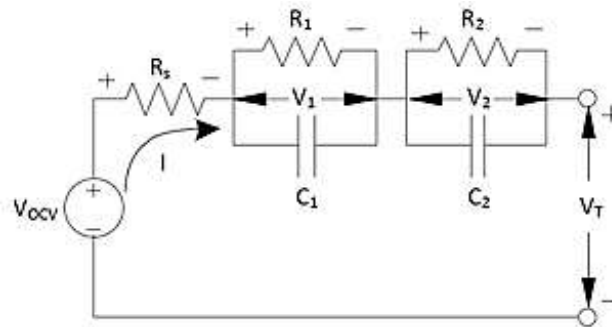


Figura 3. Modelo eléctrico de las baterías de litio a través de una fuente de tensión controlada.

Modelado del supercondensador de doble capa (EDLC), estructurado por una doble capa con resistencia interna (ESR) muy baja y posible pseudo-capacitancia, por lo que la relación $Q-V$ puede ser no lineal. En la práctica se modela con varias ramas RC para cubrir distintas constantes de tiempo.

- Energía: $E = \frac{1}{2}CV^2$
- Series/paralelo: en serie aumenta V admisible, pero disminuye la C equivalente; en paralelo aumenta C y corriente admisible.
- Retos de modelado: elegir el número de ramas RC, considerar o no C dependiente de V , y estimar constantes de tiempo y parámetros (identificación).

2. Materiales y métodos

2.1 Modelado de convertidores DC-DC bidireccionales *half-bridge*

La bidireccionalidad se logra con los transistores funcionando en modo interruptores controlados (MOSFET/IGBT) y patrones de conmutación que habilitan modo reductor (*buck*) y modo elevador (*boost*) entre el bus DC y el almacenador. El *half-bridge* bidireccional destaca por simplicidad y eficiencia en HESS.

— *Buck* (carga): $V_L = V_{bus}D - V_{Alm}$; la corriente crece/disminuye según ciclo útil, *duty D* y diferencias de tensión.

— *Boost* (descarga): el inductor se energiza desde el almacenador y transfiere energía al bus; $\Delta i_L \Delta V_D T / L$.

En la Figura 4 se muestra el modelo eléctrico del convertidor *half-bridge* no aislado.

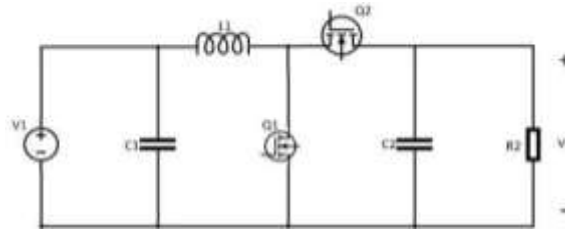


Figura 4. Diagrama eléctrico del convertidor *half-bridge*.

2.1.1. Modo reductor

Según la Figura 5a), el interruptor Q1 está conduciendo y Q2 permanece bloqueado.

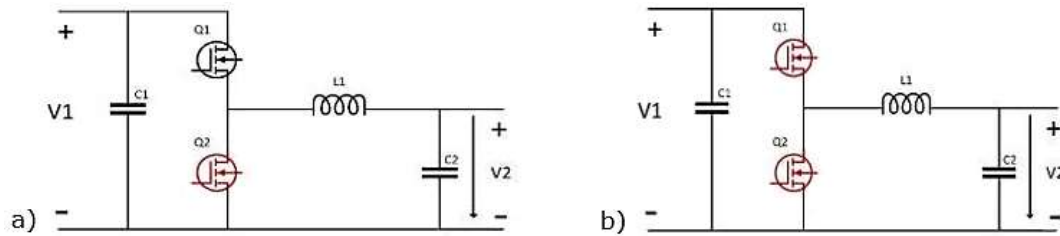


Figura 5. Convertidor *Half-Bridge*. Modo reductor. a) Q1-On, Q2-Off. b) Q1-Off, Q2-Off.

En estas condiciones, el circuito equivalente se rige por la ecuación (1). A partir de ella se obtiene la evolución temporal de la corriente del inductor, desarrollando el procedimiento mostrado en las ecuaciones de la 2 a la 4), hasta llegar a la expresión final de la ecuación (5), resultado del despeje e integración de las relaciones anteriores.

$$-V_1 + V_L = 0 \quad [1]$$

$$-L \frac{di_L}{dt} + V_L = 0 \quad [2]$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad [3]$$

$$\frac{V_L}{L} = \frac{di_L}{dt} \quad [4]$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_1 \Delta t}{L} \quad [5]$$

Según la Figura 5(b), Q1 y Q2 se encuentran en corte (ambos apagados). En estas condiciones, el circuito equivalente queda descrito por la ecuación (6), a partir de la cual se determina la evolución temporal de la corriente del inductor, siguiendo el desarrollo analítico correspondiente.

$$-V_1 + V_L + V_2 = 0 \quad [6]$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se realiza el respectivo despeje hasta llegar a la ecuación 7, la cual es la respuesta deseada.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{(V_1 - V_2)(1 - D)T}{L} \quad [7]$$

2.1.2. Modo elevador

En la Figura 6 se muestra el modelo del convertidor *half-bridge* operando en modo elevador (boost). En la figura 6(a), el interruptor Q1 conduce y Q2 permanece en corte; el circuito equivalente se establece a partir de la ecuación común (5). Con esta relación se desarrolla el análisis que, mediante las ecuaciones propuestas, obtiene la evolución temporal de la corriente del inductor a lo largo del intervalo de simulación.

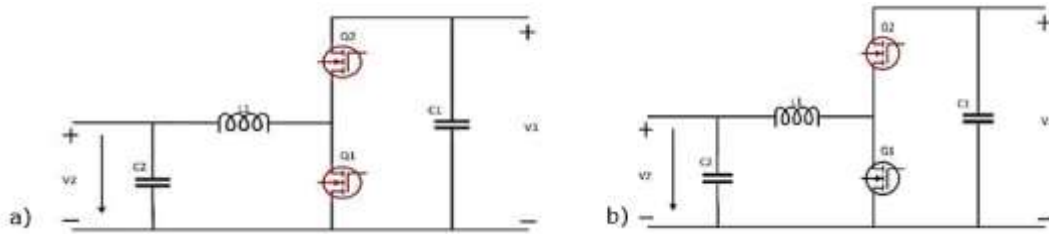


Figura 6. Convertidor *Half-Bridge*. Modo elevador. a) Q1-On, Q2-Off. b) Q1-Off, Q2-Off.

Al realizar este procedimiento matemático, la respuesta obtenida es la que se muestra en la ecuación 8, la cual se observa que la variación de la corriente del inductor en el tiempo depende de la tensión de entrada, el ciclo de trabajo y el valor de la inductancia.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_1 D T}{L} \quad [8]$$

Ventajas: control fino de potencia, integración en paralelo activo y compatibilidad con droop/integral-droop. Aquí se emplea PSIM para representar el half-bridge y explorar escenarios.

2.2. Diseño del convertidor bidireccional, esquema y modos de operación (reductor/elevador)

En la figura 7 se muestra el convertidor bidireccional *Half-bridge* con dos interruptores activos y diodos intrínsecos; PWM complementario con *dead-time* (tiempo muerto entre activación de semiconductores).

Inductor L entre nodo medio y el almacenador (V_{alm}); bus DC en lado superior.

Buck (carga):

$$V_{Alm} \approx DV_{bus}; \Delta i_L = [(V_{bus} - V_{Alm})D]/(Lfs) \quad [9]$$

Boost (descarga):

$$V_{Alm} \approx DV_{bus}/(1 - D); \Delta i_L = (V_{Alm}D)/(Lfs) \quad [10]$$

Estrategia en PSIM: *duty D* por objetivo de V/I; medición de i_L para limitar rizado y evitar saturación; CI en batería/SC.

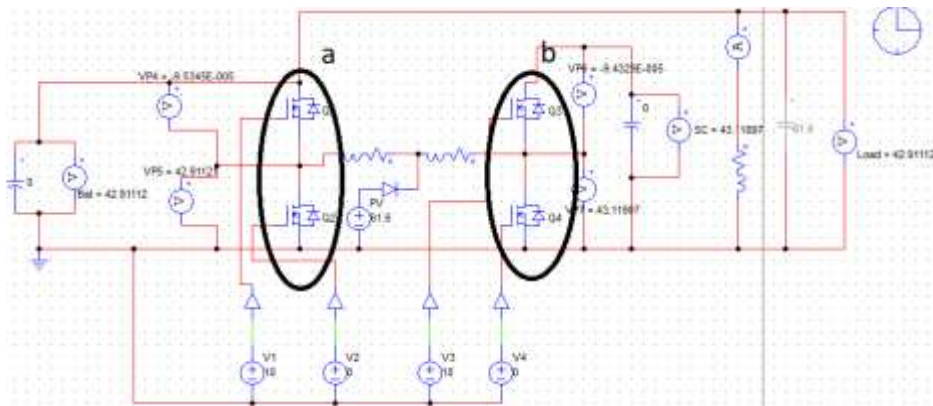


Figura 7. Esquema eléctrico de la simulación en el PSIM del modelo de convertidor DC-DC.

2.2.1. Parámetros y dimensionado (L, C, semiconductores)

Objetivo de rizado: para $P \approx 3 \text{ kW}$ y $V_{bus} \approx 60 \text{ V} \rightarrow I_{avg} \approx 50 \text{ A}$; fijar $\Delta i_L \leq 10 \text{ A}$ (20%).

Inductancia L (peores casos):

- Buck (batería, $V_{Alm} = 33 \text{ V}$, $D \approx 0.55$): $L \approx 74 \mu\text{H}$
- Boost (batería, $V_{Alm} = 33 \text{ V}$, $D \approx 0.45$): $L \approx 74 \mu\text{H}$
- Buck (SC, $V_{Alm} = 48.6 \text{ V}$, $D \approx 0.81$): $L \approx 46 \mu\text{H}$

Selección: $L = 80 \mu\text{H}$, núcleo gapped (entrehierro), $I_{sat} \geq 70 \text{ A}$; $I_{pk} \approx 55 \text{ A}$.

Capacitores: bus $\Delta V \leq 0.5\%$ $\rightarrow C_{bus} \approx 1.0 \text{ mF}$ (film+electrolítico + cerámicos). Lado almacenador: $100\text{--}220 \mu\text{F}$ + cerámicos.

Semiconductores: MOSFET 100 V low-RDS(on); pérdidas $P_{cond} \approx I_{rms}^2 \cdot RDS(on)$; $P_{sw} \approx 0.5 \cdot V \cdot I \cdot (tr+tf) \cdot f_s$.

Driver: bootstrap 100 V ; R_g para dI/dt ; *dead-time* $100\text{--}200 \text{ ns}$; *snubbers* si hay sobreoscilaciones.

Medida y protección: sensor en L , NTC/PTC, OVP/UVP, limitación por ciclo.

Notas PSIM: paso $1\text{--}5 \mu\text{s}$ ($f_s = 20 \text{ kHz}$); registrar i_L , V_{alm} , V_{bus} y *duty*.

2.3. Metodología de simulación, entorno y supuestos (PSIM)

Herramienta: PSIM (demo). Modelos ideales con parámetros realistas y señales parasitarias mínimas.

Topología: *half-bridge* entre bus DC y almacenador activo; inversor AC representado como carga equivalente en el bus (R-C). $f_s = 20 \text{ kHz}$; paso $1\text{--}5 \mu\text{s}$ (nominal $2 \mu\text{s}$); PWM complementario con *dead-time* ($100\text{--}200 \text{ ns}$).

CI: $V_{bus,0} = 60 \text{ V}$; $V_{bat, 0} \in [36, 38] \text{ V}$; $V_{SC,0} = 48.6 \text{ V}$. Señales: i_L , V_{bus} , V_{bat} , V_{SC} , *duty* D , P_{bus} , P_{bat} , P_{SC} .

Criterios: $\Delta V_{bus}/V_{bus} \leq 0.5 \%$; $\Delta i_L \leq 20 \%$ $\cdot I_{avg}$; $I_{pk} < I_{sat}$; energía del SC suficiente. Buenas prácticas: registrar solo claves, usar CI por escenario y verificar estados estables previos a escalones.

2.3.1. Escenarios de operación analizados

Siete escenarios cuasi-estacionarios ($100\text{--}300 \text{ ms}$; medir tras $3\text{--}5 \tau_L$):

- E1 Carga de batería (buck)
- E2 Descarga de batería (boost)
- E3 Carga de SC (buck)
- E4 Descarga de SC (boost)
- E5 Suavizado PV $\rightarrow$ Bus con apoyo SC
- E6 Pico con soporte mixto (SC+bat)
- E7 Recarga del SC desde batería (buck)

Variables: V_{bus} , V_{bat} , V_{SC} , i_L , D , P_{bus} , P_{bat} , P_{SC} ; métricas de rizados, energías ($\int p \cdot dt$) y picos de i_{bat} .

3. Resultados y análisis

3.1. Tensiones en batería, supercondensador y carga por escenario

En todos los casos se analizan: (I) rizado relativo de bus, (II) rizado de inductor, (III) continuidad de I_L y (IV) potencias instantáneas. E1: $V_{bus} \approx 60$ V, I_L continuo, $D \approx 0.55-0.67$. E2: $D \approx 0.45$, P_{bat} positivo hacia bus. E3: $V_{SC} \rightarrow 48.6$ V; ΔV_{bus} bajo por C_{bus} . E4: SC atiende pulso; V_{bus} dentro del 0.5 %; V_{SC} descende según energía entregada. E5: SC aporta componente rápida; Δi_{bat} disminuye. E6: SC atiende frente y batería toma relevo; $P_{SC} \rightarrow 0$ al final. E7: recarga del SC desde batería con límite de corriente y mínimo impacto en bus. En la tabla 1, se aprecian las características de cada etapa y los resultados más significativos para cada una. En la Figura 8, se muestran las tendencias del comportamiento de las tensiones en la batería, carga y supercapacitor.

Tabla 1. Resumen de resultado por escenario de funcionamiento

Escenario	Flujo dominante	ΔV_{bus}	Δi_L	Resultado clave
E1	Bus $\rightarrow$ Batería (buck)	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Carga estable, SOC $\uparrow$
E2	Batería $\rightarrow$ Bus (boost)	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Soporte a carga, bus regulado
E3	Bus $\rightarrow$ SC (buck)	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	VSC a nominal, energía almacenada
E4	SC $\rightarrow$ Bus (boost)	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Pulso atendido por SC, VSC $\downarrow$
E5	PV/Bus con SC	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Suavizado de i_{bat}
E6	SC + Batería	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Entrega coordinada, traspaso suave
E7	Batería $\rightarrow$ SC (buck)	$\leq 0.5\%$	$\leq 20\%$	Recarga SC con impacto mínimo

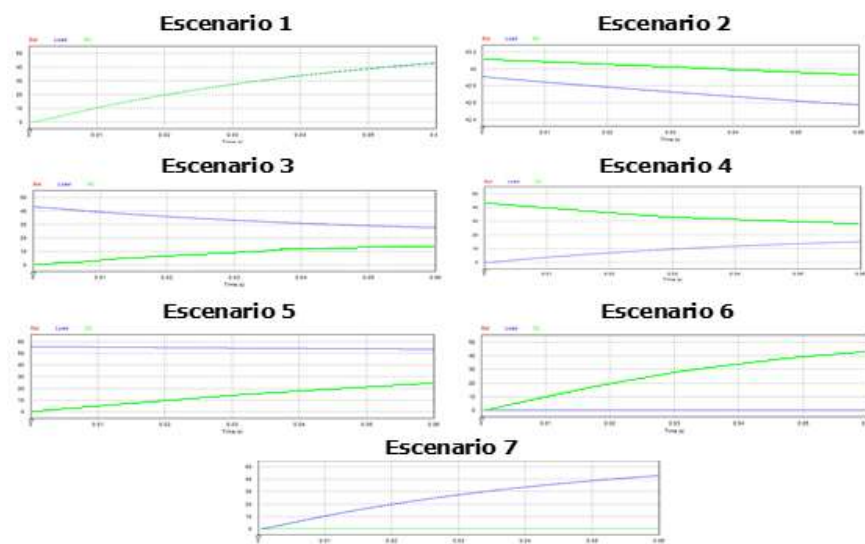


Figura 8. Comportamiento de las tensiones en la batería, carga y supercapacitor por escenario.

3.2. Discusión y limitaciones

Los resultados confirman que el Supercapacitor absorbe/entrega la componente de la corriente de forma rápida, mientras la batería sostiene la energía media: rizados del bus $\leq 0.5\%$, continuidad de i_L y reducción de picos de I_{bat} . La selección $L=80\ \mu\text{H}$ y $C_{bus} \approx 1\ \text{mF}$ es adecuada para $3\ \text{kW}@60\ \text{V}$ y $f_s = 20\ \text{kHz}$.

Limitaciones: estudio cuasi-estacionario sin control completo; pérdidas térmicas y conmutación simplificadas; restricciones de PSIM demo.

Futuro: control de corriente/potencia con límites y anti-windup; reparto SoC -dependiente; modelos térmicos; validación HIL.

3.3. Valoración técnico-económica del prototipo

Alcance: Estimación de costes de un prototipo funcional del convertidor bidireccional ($3\ \text{kW} @ 60\ \text{V}$, $f_s=20\ \text{kHz}$). Valores indicativos de mercado en euros ($\pm 20\text{--}30\%$).

Tabla 2. Lista de materiales para la construcción del convertidor

Ítem	Especificación	Cant.	Coste (€)	Subtotal (€)
MOSFET 100 V low-RDS (on)	Paralelo $2\times$ por rama (4 ud)	4	6–8	24–32
Driver high/low-side	Bootstrap 100 V, UVLO	1	10–20	10–20
Inductor L	$80\ \mu\text{H}$, $I_{sat} \geq 70\ \text{A}$ (núcleo gapped + Litz)	1	50–90	50–90
Capacitores bus	Film + electrolítico + cerámicos ($\approx 1\ \text{mF} @ 63\text{--}80\ \text{V}$)	1 set	20–40	20–40
Sensor de corriente	Hall 100 A o shunt Kelvin	1	15–35	15–35
PCB potencia	FR-4, 4 capas, 2 oz Cu ($\approx 100\times 100\ \text{mm}$)	1	40–80	40–80
Disipación	Disipador + ventilador	1	25–45	25–45
Snubbers/RC/NTC/	Pasivos y conectores de potencia	1 set	20–35	20–35
Caja	Carcasa metálica/plástica	1	20–40	20–40
Costo total del convertidor: $\sim 250\text{--}400\ \text{€}$ ($\approx 83\text{--}133\ \text{€/kW}$)				

4. Conclusiones

El estudio confirma la idoneidad de un convertidor *half-bridge* bidireccional para integrar un HESS batería-supercondensador en microrred FV, validando su desempeño en siete escenarios cuasi-estacionarios y proporcionando criterios prácticos de dimensionado y prototipado.

Control y bidireccionalidad. Se verificó operación estable en buck/boost con continuidad de i_L y gestión fiable del flujo de potencia en ambos sentidos.

Desacoplo dinámico. El supercondensador absorbió/entregó la componente rápida, reduciendo picos de I_{bat} y manteniendo V_{bus} dentro del rizado objetivo.

Dimensionado y viabilidad. El conjunto $L \approx 80\mu H$, $C_{bus} \approx 1\text{ mF}$ y MOSFET de 100 V a $f_s = 20\text{ kHz}$ cumplió rizados previstos y muestra viabilidad de prototipo (coste específico competitivo para laboratorio).

Referencias bibliográficas

- Ardi, H., Ahrabi, R.R., & Ravadanegh, S.N. (2014). Non-isolated bidirectional DC-DC converter: Analysis and implementation. *IET Power Electronics*, 7(12), 3033–3044. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0898>
- Eaton. (2023). *XLR-48 Ultracapacitor Module: Datasheet*. Eaton Corporation. <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/energy-storage/xlr-48-ultracapacitor-module.html>
- Erickson, R.W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
- Faisal, M., Hannan, M.A., Ker, P.J., Hussain, A., Mansor, M.B., & Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *IEEE Access*, 6, 35143–35164. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841407>
- Infineon Technologies. (2017). *AN-978: HV floating MOS-gate driver ICs* (Application note). Infineon Technologies AG. <https://www.infineon.com/dgdl/an-978.pdf>
- Jing, W., Lai, C., Wong, W.S. & Wong, M.L. (2017). Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. *IET Renewable Power Generation*, 11(4), 461–469. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0500>
- Lai, C.M., Lin, Y.C., & Lee, D. (2015). Study and implementation of a two-phase interleaved bidirectional DC/DC converter for vehicle and DC-microgrid systems. *Energies*, 8(9), 9969–9991. <https://doi.org/10.3390/en8099969>

- Lin, C.C., Yang, L.S., & Wu, G.W. (2013). Study of a non-isolated bidirectional DC-DC converter. *IET Power Electronics*, 6(1), 30–37. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0338>
- Liu, K.B., Yang, C.H., & Chang, E.C. (2016). Analysis and controller design of a universal bidirectional DC-DC converter. *Energies*, 9(7), 501. <https://doi.org/10.3390/en9070501>
- Mohan, N., Undeland, T.M., & Robbins, W.P. (2003). *Power electronics: Converters, applications, and design*. Wiley.
- Pérez-Aballe, O., Ruiz-Chavarría, G., Vázquez-Seis Dedos, L., & Columbié-Navarro, Ángel O. (2025). Diseño de convertidor DC/DC bidireccional dual para gestión de almacenamiento híbrido de energía en microrredes. *Minería y Geología*, 41(1), 83–101. <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/2701>
- Pérez Aballe, O.R., Nicolas-Martin, C., González-García, J., Flores-Martín, P., & Santos-Martin, D.(2025). Sistema de Gestión de Energía en Microrred Eléctrica, con Almacenamiento Híbrido y Enfoque Multiobjetivo. *Revista Politécnica*, 56(1), 47–58. <https://doi.org/10.33333/rp.vol56n1.04>
- Powersim. (2022). *PSIM 2022 R2 user manual*. Powersim Inc. <https://powersimtech.com/resources/documentation/psim-user-manual/>
- Ramos, E., Del-Valle, Y., Santos-Canepa, R., & Loncoche-Cobarrubias, F. (2022). Hybrid energy storage systems: A review of filter-based methods for energy management. *Electronics*, 11(22), 3661. <https://doi.org/10.3390/electronics11223661>
- Sutikno, T., Memon, A.A., Yusoff, A.M., & Jidin, A. (2023). Application of non-isolated bidirectional DC-DC converters. A review. *Clean Energy*, 7(2), 293–314. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad011>
- Tremblay, O., Dessaint, L A., & Dekkiche, A I. (2007). September). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *2007 IEEE vehicle power and propulsion conference* (pp. 284-289). Ieee. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4544139/>
- Tremblay, O., & Dessaint, L.A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3(2), 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>

- Tshiani, C.T., & Umenne, P. (2022). The characterization of the electric double-layer capacitor (EDLC) using a Python/MATLAB/Simulink hybrid model. *Energies*, 15(14), 5193. <https://doi.org/10.3390/en15145193>
- Tuluhong, A., Furqan, M., Ni, K., Liu, Z., Yu, Y., & Xie, X. (2025). Recent developments in bidirectional DC-DC converters: A comprehensive review. *Electronics*, 14(18), 3816. <https://doi.org/10.3390/electronics14183816>
- Wang, J., Lin, Y., He, C., Zhang, T., & Li, H. (2022). Review of bidirectional DC-DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles. *Green Energy & Intelligent Transportation*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100010>
- Winston Battery. (2024). *LiFePO4 LFP40AHA cell: Datasheet*. Winston Battery Ltd. <https://en.winston-battery.com/index.php/product/proshow-120.html>
- Zhang, C., Li, K., Deng, J., & Song, S. (2017). A comparative study of RC equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Applied Sciences*, 7(10), 990. <https://doi.org/10.3390/app7100990>
- Zubieta, L., & Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 199–205. <https://doi.org/10.1109/28.821816>

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Nancy Reynosa Casas: Investigación/Redacción/Diseño de la metodología

Yusbel Llorrente Cutiño: Logística/Tecnología/Software

Christian E. Borges Alvarez: Software

Yilena Paumier Leyva: Investigación/Revisión

Osmany R. Pérez Aballe: Conceptualización/Diseño/Investigación/Revisión