Tierra, Medio Ambiente y Energía

Ingeniantes

Análisis e implementación de un Convertidor Boost Multientrada para aplicaciones en fuentes de energías renovables

Colaboración
Freddy Chan Puc; Jesús Álvarez Ruiz; Víctor Sánchez, Universidad de Quintana Roo; Daniella Pacheco Catalán, Centro de Investigación Científica de Yucatán, CICY; Diego Espinoza Trejo, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

RESUMEN: Ante la diversidad de fuentes de energía renovables que existen (fotovoltaica, eólica, celdas de hidrogeno, etc.), es necesaria una etapa de potencia que acondicione el voltaje de cada fuente a un bus de voltaje común. Existen diversas soluciones para el acondicionamiento de las fuentes de energía renovables, cada una tiene características sobresalientes sobre las demás, pero también conlleva una serie de desventajas. En este trabajo se presenta un análisis de los diversos convertidores de potencia multi-entrada propuestos para el acondicionamiento en fuentes de energía renovables. De igual manera se presenta el diseño e implementación de un Convertidor Boost Intercalado, así como el análisis de su desempeño. Se presentan los resultados experimentales del convertidor para varios tipos de transistores, de control y tipo de topología. Se incluyen una comparación con el convertidor Boost convencional.

PALABRAS CLAVE: Acondicionadores de Energía, Convertidores de potencia multientrada.

ABSTRACT: Given the diversity of renewable energy sources that exist (photovoltaic, wind, hydrogen cells, etc.), a power stage is required to condition the voltage of each source to a common voltage bus. There are several solutions for the conditioning of renewable energy sources, each one has outstanding characteristics over the others, but also carries a number of disadvantages. This work presents an analysis of the various multi-input power converters proposed for conditioning in renewable energy sources. Similarly, the design and implementation of a Boost Interleaved converter is presented, as well as the analysis of its performance. The experimental results of the converter are presented for several types of transistors, control, and topology type. A comparison with the conventional Boost converter is included

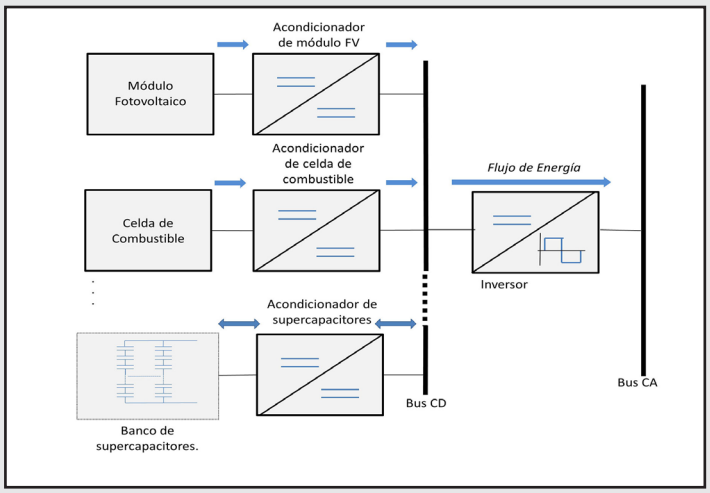
KEYWORDS: Power Conditioners, Multi-Inverter Power Converters.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación distribuidos (SGD) involucran una diversidad de fuentes de energía (celdas solares, celdas de hidrogeno, supercapacitores, etc.) que, a través de algún tipo de acondicionador de potencia, permite interconectarse a un bus de CD regulado como se observa en la Figura 1a. Existen diversos convertidores de potencia para el acondicionamiento de energía. También existen diversos parámetros de diseño p.e. volumen, eficiencia, costo, confiabilidad, etc. Se analizaron los diferentes tipos de convertidores de potencia multi-entrada sugeridas en la bibliografía [1-5], la Figura 1b muestra el diagrama a bloques de un acondicionador multientrada para un bus de CD.

De igual manera, en este trabajo se presenta el diseño de un Convertidor Boost intercalado CBI, seleccionado después de un análisis del estado del arte. Para la elección del convertidor CD/CD multientrada se analizaron diferentes propuestas, tomando en cuenta sus ventajas y desventajas considerando las siguientes características:

- Costo: El costo esperado del convertidor va de la mano con el número de componentes que utiliza una topología en particular.
- Fiabilidad: En un convertidor CD/CD, componentes como interruptores, diodos, capacitores e inductores están sometidos a estrés eléctrico constante; por lo tanto, un número mayor de componentes incrementa la probabilidad de fallo en el convertidor.
- Flexibilidad: Compatibilidad de los convertidores CD/CD multientrada de integrar diferentes fuentes y proporcionar amplia gama de tensiones de salida.
- Eficiencia: Es la relación entre la conversión de la energía y como esta es aprovechada,
- Control aplicado: La técnica de control se debe de elegir de acuerdo al modo de operación del convertidor, modo continuo o discontinuo. [1].



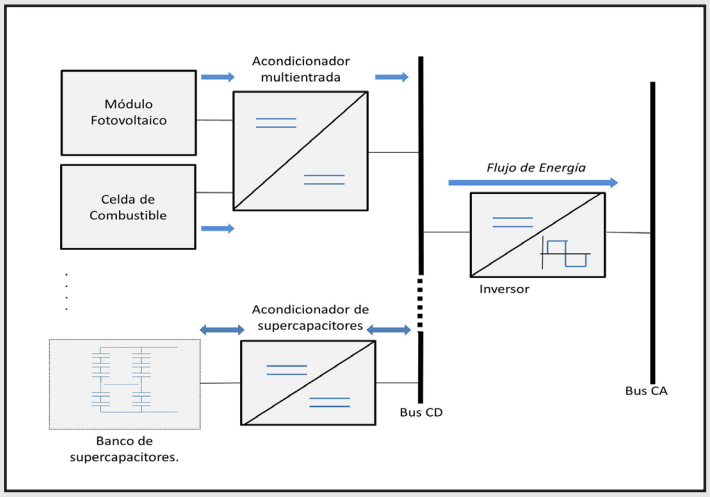


Figura 1. Sistema de Generación distribuido
a) Con acondicionador por cada fuente de energía,
b) Con acondicionador multi-entrada.

MARCO TEÓRICO

Existe una diversidad de Convertidores CD/CD de múltiple entrada para aplicaciones en sistemas de generación distribuidos. En esta sección se analizan cada una de las clasificaciones existentes, de estas topologías.

Convertidores CD/CD múltiples entradas sin aislamiento

La topología propuesta en [6], mostrada en la Figura 2, involucra cuatro modos de funcionamiento diferentes, los cuales se basan en la disponibilidad de las fuentes de tensión de entrada y el estado de conducción de sus respectivos interruptores (S1 y S2). Este convertidor es una combinación del reductor-elevador (Buck-Boost) y el convertidor reductor (Buck). El convertidor puede obtener energía de las dos fuentes sea de manera individual o simultánea, sin embargo, para un funcionamiento correcto se tienen que cumplir ciertas condiciones donde la fuente primaria Vhi, tiene que tener mayor voltaje (al menos mayor que la tensión de salida deseada) y la fuente secundaria Vlow, debe tener un voltaje menor.

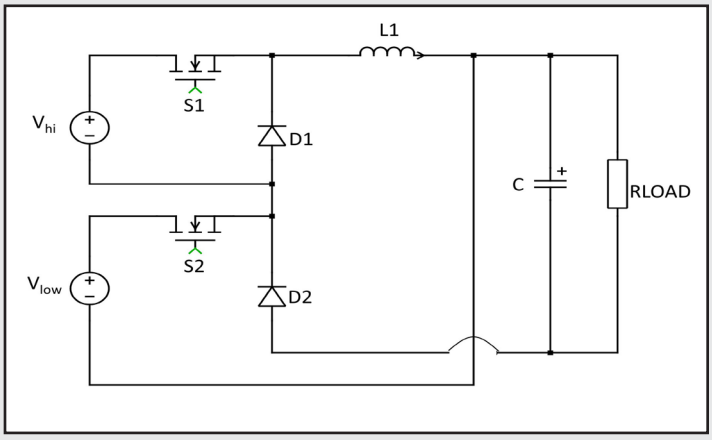


Figura 2. Convertidor de doble entrada Buck-Buck-Boost.

Una modificación de la topología anterior se presenta en [7]; donde se tiene un convertidor con n-número de entradas, basado en la topología Buck-Boost y mostrada en la Figura 3. Este convertidor ha reducido los componentes del circuito, pero su inconveniente es la salida de referencia negativa. Dicha salida se puede invertir mediante el uso de un transformador, que incrementa el costo y dimensiones de esta topología. Otro inconveniente es que sólo una de las fuentes puede entregar la energía a la vez.

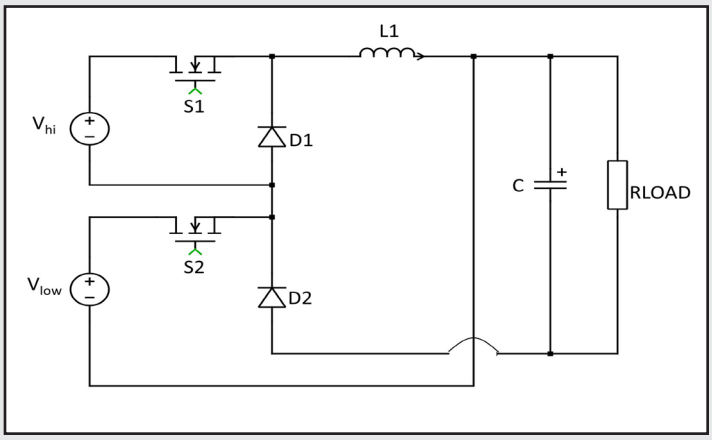


Figura 3. Convertidor Buck-Boost multientrada Unidireccional.

Los problemas mencionados anteriormente se eliminan mediante una topología bidireccional del convertidor CD/CD [8], como se muestra en la Figura 4, esta topología proporciona tensión de salida positiva sin ningún transformador adicional. También puede funcionar en modo bidireccional sin requerir de cualquier convertidor adicional. Este opera en tres modos Buck, Boost, y Buck-Boost. Pero el número de dispositivos ha aumentado lo que reduce la eficiencia por perdidas de conducción, disminuye la fiabilidad y eleva el costo.

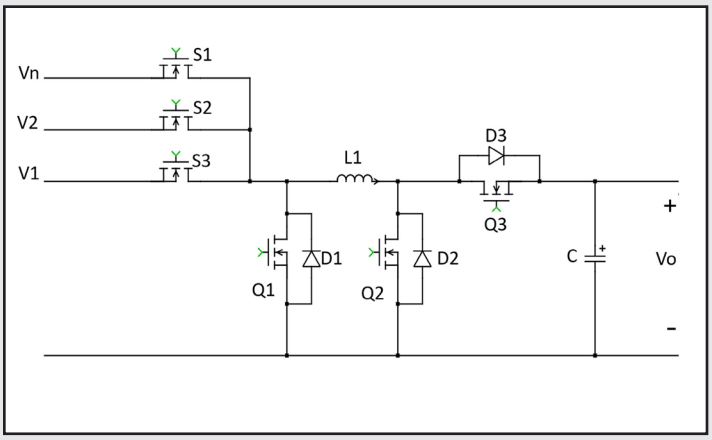


Figura 4. Convertidor bidireccional multientrada

En la Figura 5 se muestra una topología que integra un Buck-Buck (Reductor-Reductor) donde ambas fuentes pueden suministrar energía individual o simultáneamente [9]. Sin embargo, esta estructura trabaja bajo un concepto llamado MSCs (Convertidores CD/CD de Múltiple Fuente) y usa una topología denominada PVSC (Celda de fuente de Voltaje Pulsante) donde una fuente de voltaje está conectada en serie con el interruptor de control, además un diodo está conectado en paralelo con esta combinación. El diodo conectado en paralelo funciona como diodo volante o diodo de derivación de corriente.

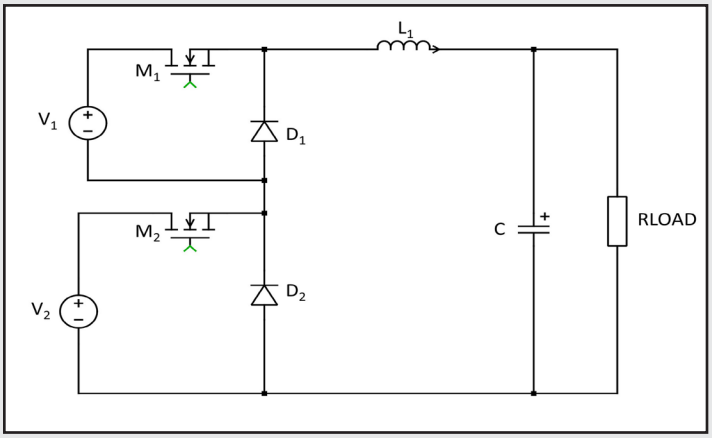


Figura 5. Convertidor de doble entrada Buck-Buck.

En la Figura 6, se muestra una topología que integra un Buck-Boost/Buck-Boost [10], en esta las fuentes de tensión son incapaces de alimentar la carga simultáneamente.

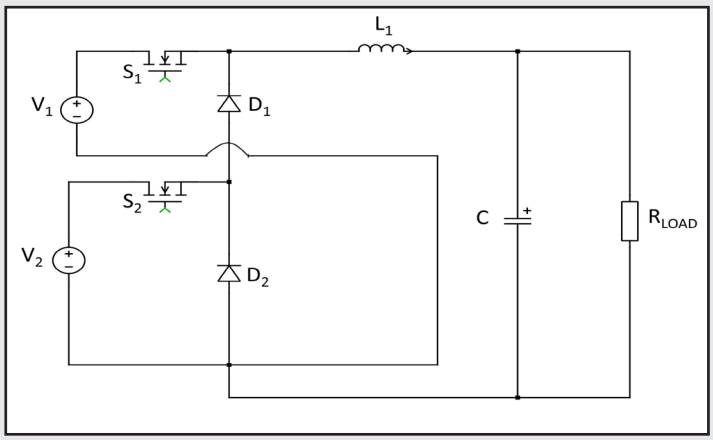


Figura 6. Convertidor de doble entrada Buck Boost-Buck Boost

La topología mostrada en la Figura 7, está basada en una topología de un convertidor Boost [11]. El convertidor es de doble entrada usando como fuentes de alimentación una fuente de energía renovable (fotovoltaica/eólica) y un arreglo de baterías. El costo del diseño no es tan alto debido a la cantidad de componentes usados y por ende sus dimensiones son menores, la técnica de control usada es modos deslizantes y opera en modo continuo.

El convertidor tiene tres modos de operación:

- Modo 1. Potencia entregada desde una sola fuente de tensión.
- Modo 2. No hay energía disponible de las fuentes de tensión.
- Modo 3. Potencia suministrada desde ambas fuentes de tensión.

Sin embargo, el inconveniente que se considera en esta topología es el dado en el modo 3, donde el interruptor S1 y S2 se encienden simultáneamente dejando a ambas fuentes de entrada en una conexión serie. Por lo tanto, se debe considerar la capacidad de corriente soportada por ambas fuentes, debido a que, si se tiene una fuente de entrada de menor capacidad que la otra, puede haber problemas de sobrecalentamiento en una de ellas, bajando su eficiencia y acortando su vida útil a lo largo de su uso.

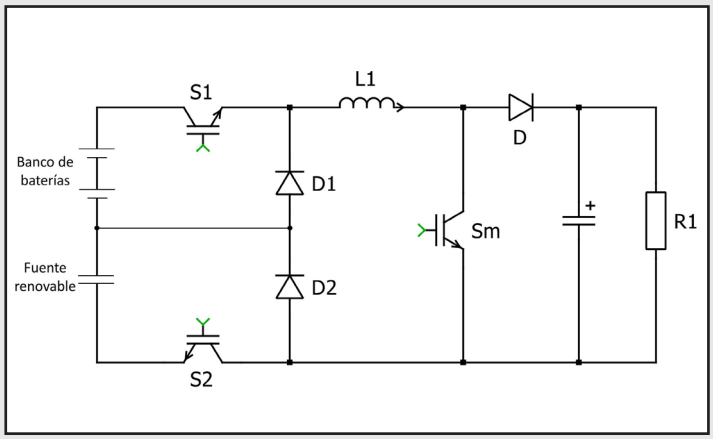


Figura 7. Convertidor CD/CD basado en convertidor Boost.

Convertidores CD/CD múltiples entradas múltiples salidas.

La topología mostrada en la Figura 8, consiste en un convertidor CD/CD de múltiples entradas múltiples salidas que se deriva del convertidor Buck-Boost [12]. Diferentes fuentes de entrada se conectan formando una matriz de interruptores las cuales son controladas bajo el concepto de energía compartida. El número de entradas y salidas se afirma que es ilimitado. Sin embargo, las fuentes de entrada no son capaces de activar las salidas simultáneamente. Una topología muy flexible al integrar múltiples fuentes, sin embargo, el número de componentes aumenta el costo y la eficiencia, además disminuye la fiabilidad. El convertidor opera en modo discontinuo y el control considera un esquema de ciclo de trabajo donde todos los interruptores tienen la misma frecuencia de conmutación; controlar múltiples interruptores aumenta la complejidad del control.

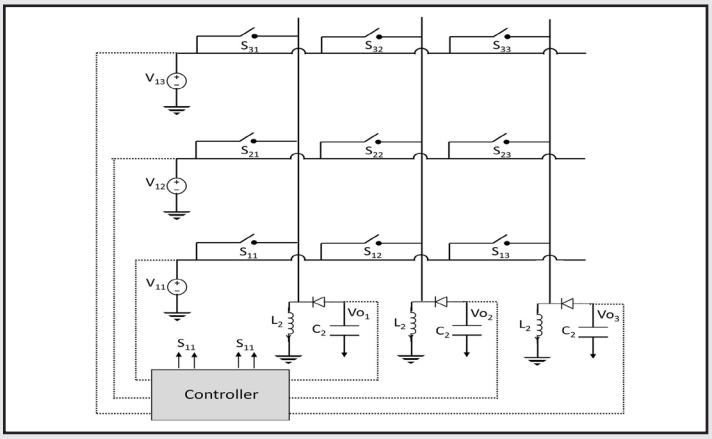


Figura 8. Convertidor de múltiples entradas-múltiples salidas.

Convertidores CD/CD múltiples entradas con aislamiento.

Un convertidor multientrada de puente completo se muestra en la Figura 9. Este convertidor combina dos fuentes de entrada de diferentes amplitudes y un acoplamiento magnético del transformador. El esquema permite utilizar un mayor número de fuentes. El flujo magnético que alimenta al inversor CD/AC es producido por las fuentes de corriente de entrada. Cada interruptor del inversor tiene un diodo en serie que bloquea la corriente inversa para asegurar la transferencia simultánea de energía de ambas fuentes. La etapa de salida consiste en un puente rectificador y filtros CA/CD. El convertidor puede suministrar energía de forma individual y simultánea, sin embargo, el diodo de bloqueo de corriente inversa conectado en serie con el interruptor elimina la posibilidad de operación del convertidor en modo bidireccional. Además, el elevado número de interruptores y la complejidad del controlador, incrementan tanto el costo como el tamaño, y reduce la fiabilidad del convertidor.

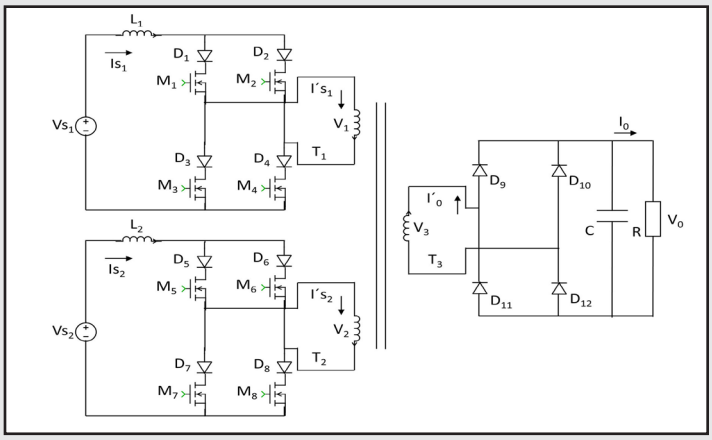


Figura 9. Convertidor multientrada de puente completo.

Un convertidor CD/CD bidireccional que cuenta con tres convertidores de medio puente [13], se muestra en la Figura 10. Este convertidor puede entregar la potencia en cualquiera de las direcciones con diferentes niveles de tensión, se puede lograr una conmutación suave, tiene menor número de componentes y es de alta eficiencia en comparación con las topologías de múltiple entrada de puente completo [14]. Sin embargo, el volumen debido a los transformadores del convertidor y el costo de los componentes sigue siendo una complicación.

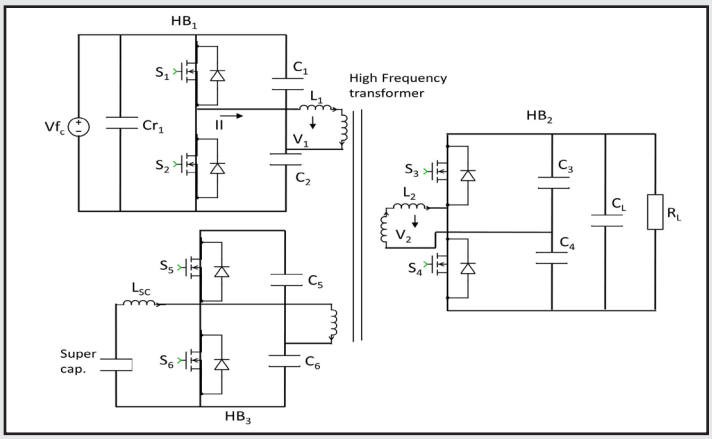


Figura 10. Convertidor CD/CD bidireccional con triple medio puente.

PROPUESTA DE CONVERTIDOR DE MULTIPLE ENTRADA

En la Figura 11 se presenta el Convertidor Boost Intercalado CBI, [15-18], es una variante del convertidor Boost, pero cuenta con una rama adicional de procesamiento paralela, donde tanto los inductores y diodos tienen que ser idénticos. Además, cada rama tiene su propio interruptor de potencia los cuales son controlados con señales PWM (Modulación por Ancho de Pulso).

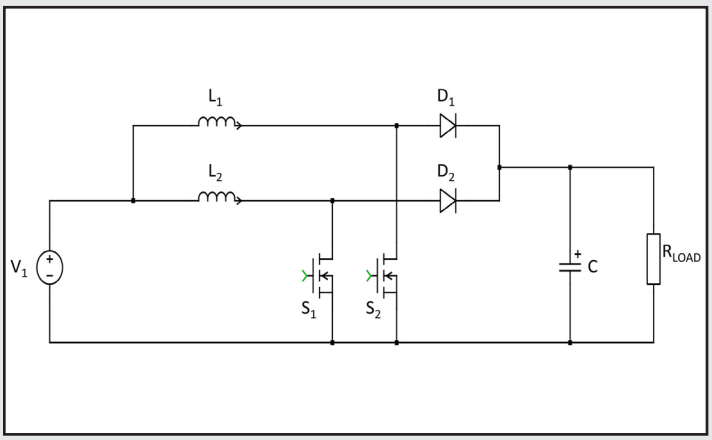


Figura 11. Convertidor Boost Intercalado.

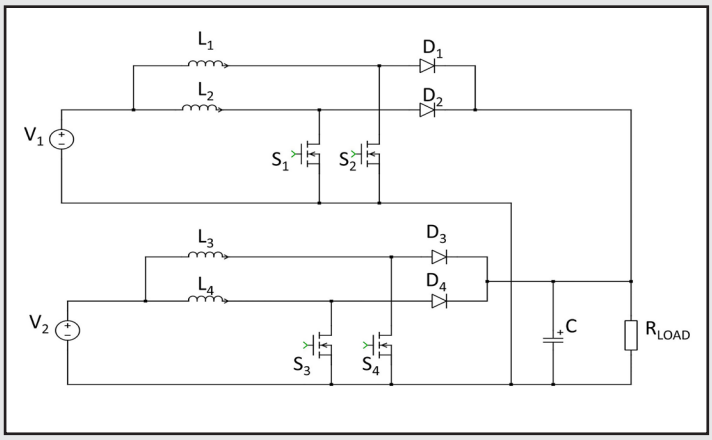


Figura 13. CBI de doble entrada una salida.

La frecuencia de conmutación en ambas ramas debe de ser la misma, pero sus señales PWM se modulan para tener un desplazamiento de fase de 180° eléctricos, tal como se muestra en la Figura 12. Tener dos fases ayuda a disminuir considerablemente el rizado de la corriente en la salida, esto es debido a que la corriente de entrada es dividida en cada fase, donde lo es la corriente de salida, IL1 e IL2, son las corrientes en cada uno de los inductores. Además, la corriente al ser dividida, provoca que los componentes usados en el diseño sean de menor capacidad de potencia ayudando a mejorar la disipación de energía.

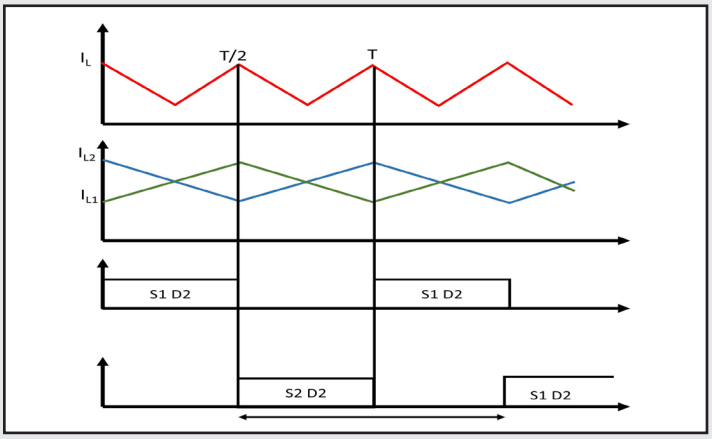


Figura 12. Formas de onda del convertidor Boost Interleaved.

Con las ventajas del CBI sobre el convertidor Boost convencional, se optó por la topología de múltiple entrada basada en CBI's conectados en paralelo, la cual se presenta en la Figura 13. Donde ambas fuentes suministrarán energía simultáneamente y cada convertidor tendrá su propio control PI (Proporcional Integrador) en modo voltaje. Se implementó el prototipo en una Placa de Circuito Impreso (PCB) y se realizaron mediciones de corrientes, tensiones, se calcularon potencias y eficiencias para analizar el desempeño del convertidor multientrada.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados experimentales para un CBI. Las especificaciones de diseño fueron:

Vi=16V, Vo=24, Po= 100 watts, Fsw=100kHz

En la Figura 14 se muestra el convertidor implementado en circuito impreso, consistente en dos ramas de conmutación con sus respectivos drivers.

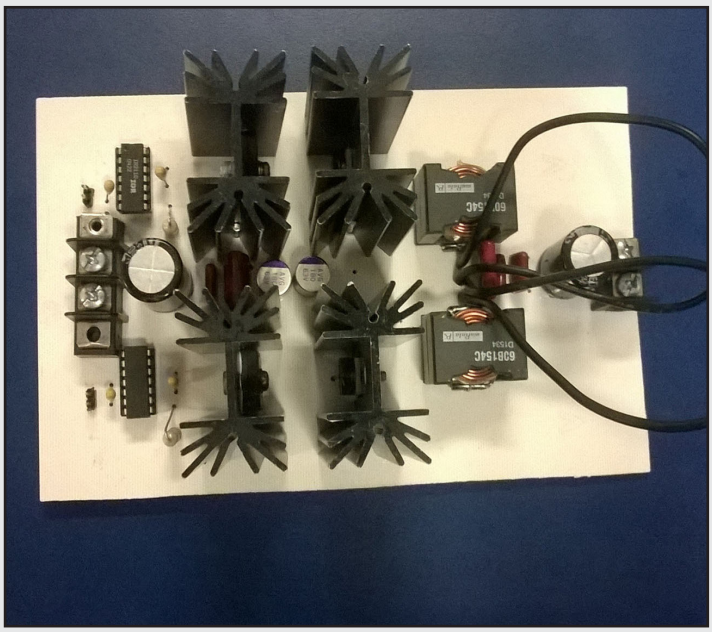


Figura 14. Implementación del CBI.

En la Figura 15 se muestra las señales de control que se aplica a cada rama del CBI con una frecuencia de 100 kHz. Como se mencionó con anterioridad las señales están desfasadas 180° entre sí (modo push-pull), para minimizar el rizado en la corriente de salida.

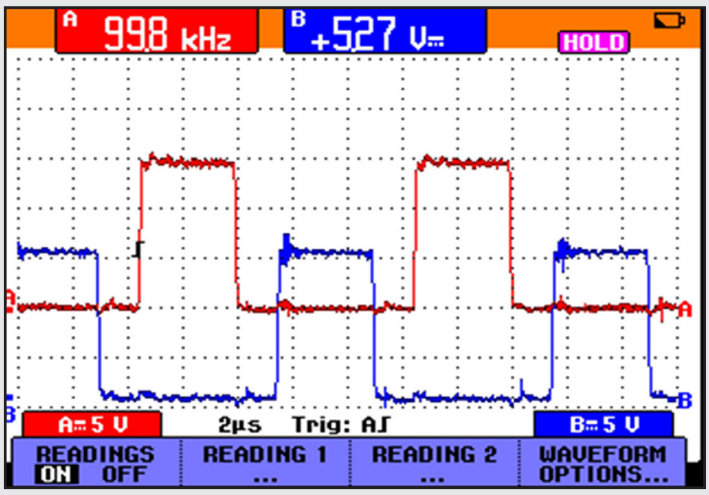


Figura 15. Señales de control del PWM para cada rama

La Figura 16 muestra tanto el voltaje de entrada como el voltaje de salida del convertidor. Se observa la regulación de tensión (rizado mínimo).

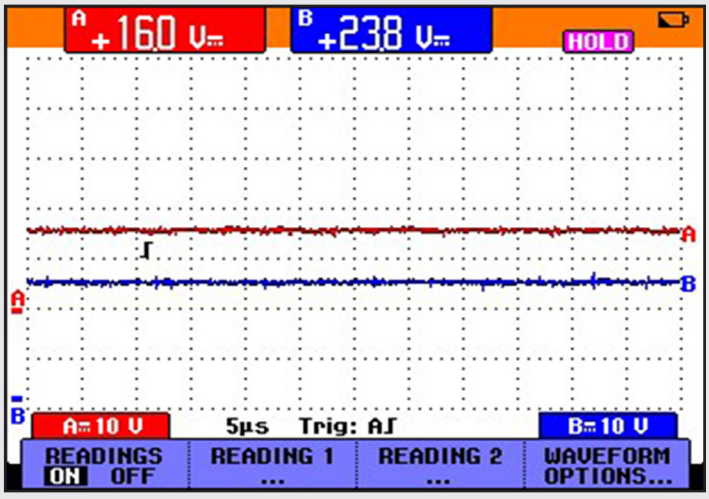
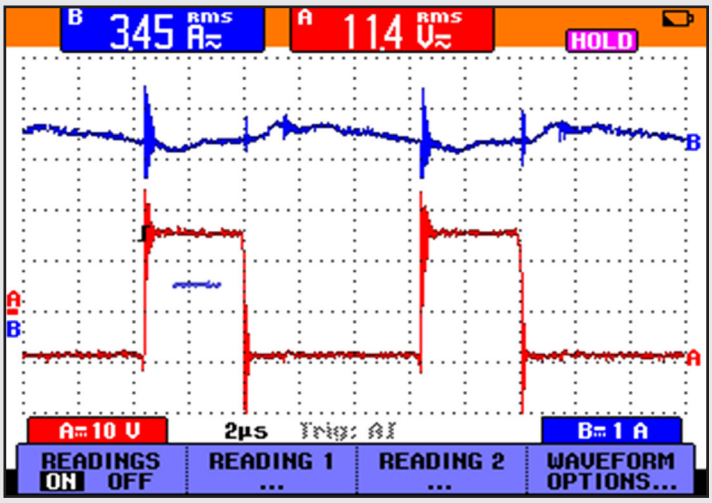


Figura 16 .Señales del Voltaje de entrada y salida.

En la Figura 17 se muestra los esfuerzos en corriente y voltaje de cada uno los inductores L1 y L2, en este caso la corriente de entrada no sobrepasa el límite permitido de 6A. Se observa que el convertidor opera en Modo de conducción continuo (MCC). Existen leves perturbaciones debido a las conmutaciones.



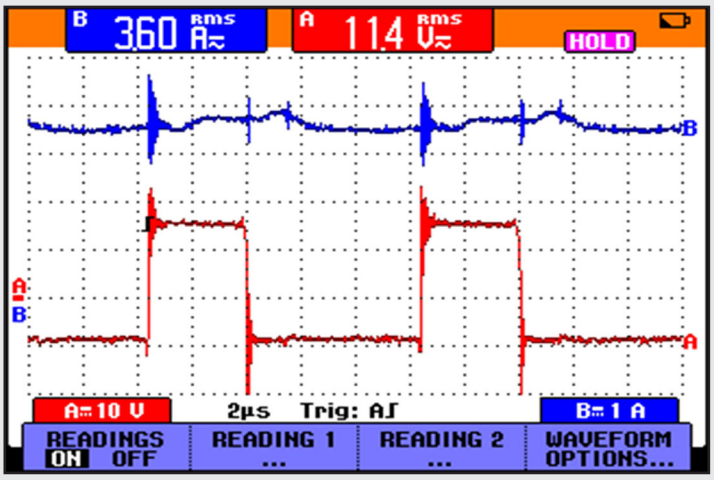


Figura 17. Esfuerzos de corriente y voltaje en cada rama CBI.
a) IL1, VL1
b) IL2, VL2

En la Figura 18, se observa el comportamiento térmico de uno de los primeros prototipos implementados y la diferencia considerable entre las temperaturas de cada rama. Se puede observar que uno de los disipadores acoplados a uno de los MOSFET está a una temperatura de 62 °C mientras el otro se encuentra a 44.9 °C. Esto ocurría porque la corriente circulaba en su mayoría por una sola fase.

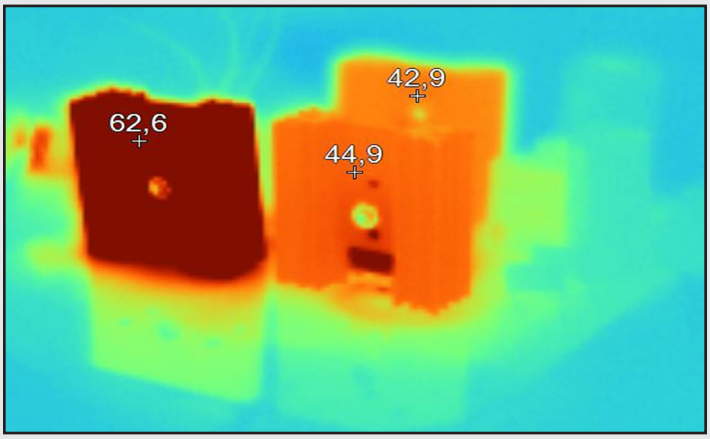


Figura 18. Esfuerzos térmicos debido a desbalance de corrientes.

Por otro lado, en la Figura 19, las temperaturas se encuentran muy idénticas en cada uno de los componentes, señal de una distribución de corriente equitativa. Las mediciones de temperatura se realizaron con ayuda de una cámara termográfica marca FLUKE modelo Ti10.

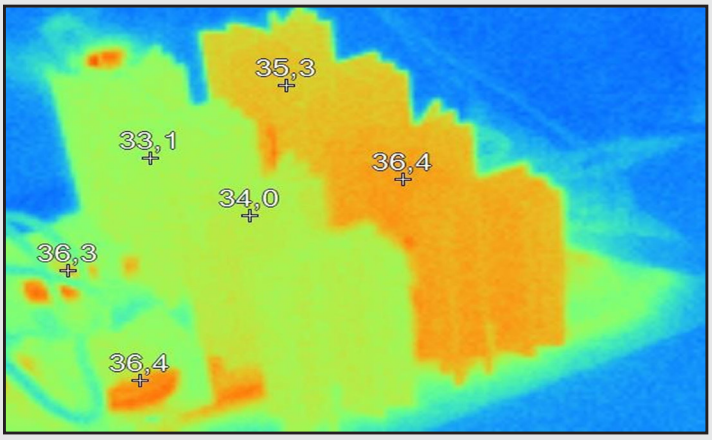


Figura 19. Comportamiento de la eficiencia ante diferente tipo de interruptor.

La Figura 20 muestra el comportamiento de la eficiencia del CBI ante diferentes tipos de transistor empleado. El transistor IRF640 es un transistor de tecnología HEXFET, el transistor 20N60S5 el cual es un transistor de tecnología COOLMOS y un transistor tipo IGBT. La Tabla 1 resume las características de cada interruptor evaluado.

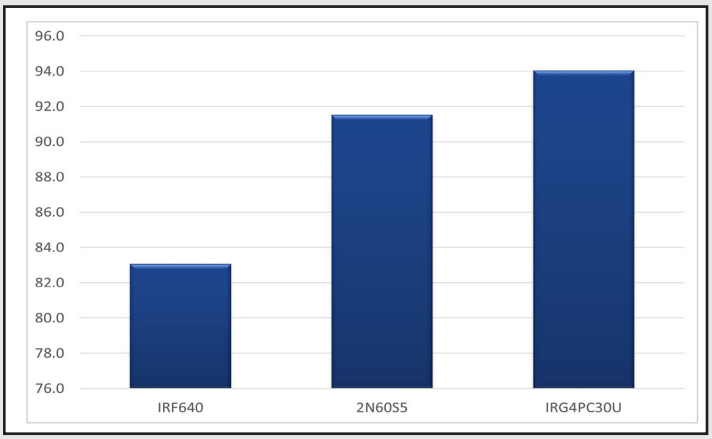


Figura 20. Comportamiento de la eficiencia ante diferente tipo de interruptor.

Tabla 1.- Especificaciones de interruptores

HEXFET	COOLMOS	IGBT
18A, 200V	20A, 650V	23A, 650V
V_{SD}=1.3 V	V_{SD}=1 V	$V_{CE(ON)}$=1.95 V
r_{DS}(ON) = 0.15 Ω	r_{DS}(ON) = 0.19 Ω	P_D=100 W
P_D=150 W	P_D=208 W	t_r= 9.6 ns
t_r= 45 ns	t_r= 25 ns	t_f= 97 ns
t_f= 38 ns	t_f= 30 ns	C_{ISS}= 1100 pFd
C_{ISS}= 1160 pFd	C_{ISS}= 3000 pFd	$R_{\theta JC}$=1.2 °C/W
$R_{\theta JC}$=1 °C/W	$R_{\theta JC}$=0.6 °C/W	$R_{\theta JA}$=40 °C/W
$R_{\theta JA}$=62 °C/W	$R_{\theta JA}$=50 °C/W	$R_{\theta CS}$=0.24 °C/W
TO-220AB	TO-247	TO-247 AC

Puede notarse un mejor desempeño con el transistor tipo IGBT lográndose eficiencia de 94%. En la Figura 21 se muestran la forma de onda de corriente de entrada y voltaje en el inductor para los tres casos. En el caso del IGBT se tienen menores perdidas de conmutación y de conducción resultando un convertidor con mayor eficiencia.

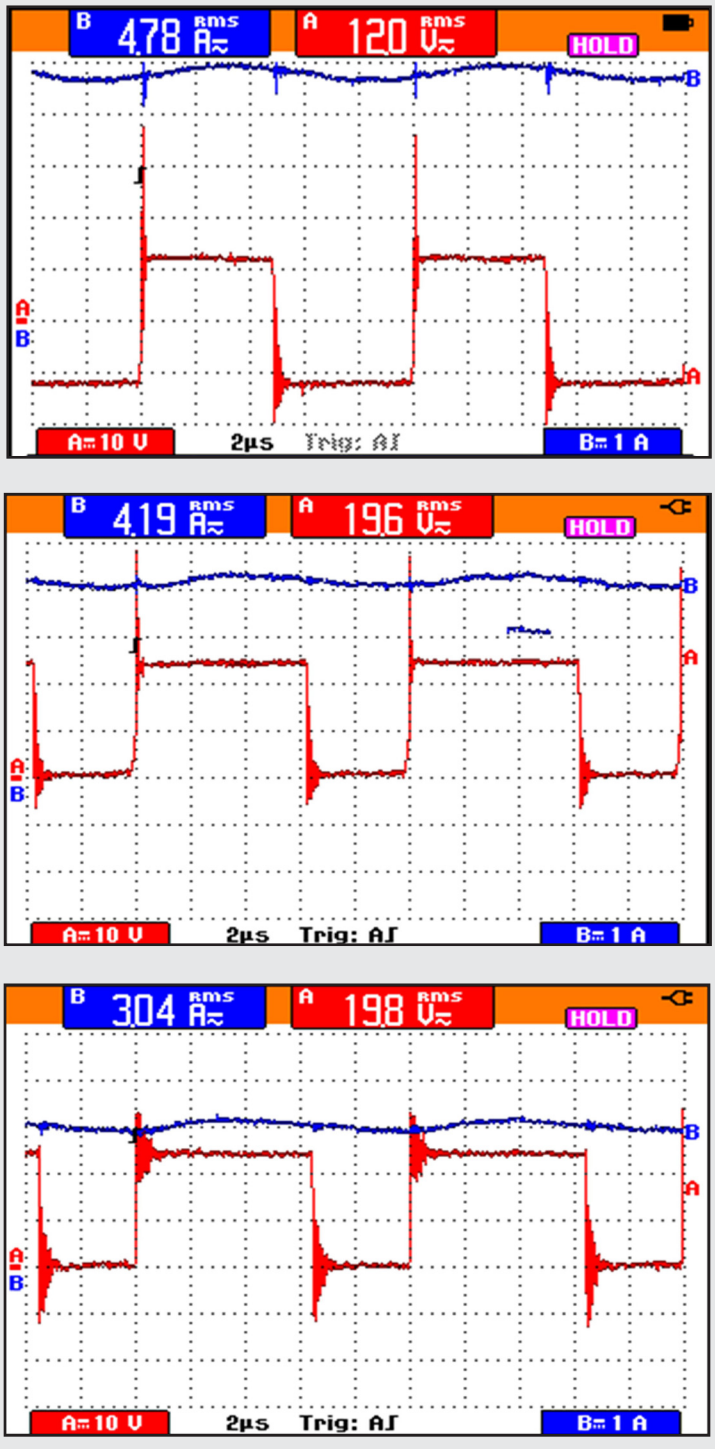


Figura 21. Pérdidas por conmutación y conducción de cada configuración....
a) HEXFET,
b) COOLMOS,
c) IGBT

En la Figura 22 se presenta el comportamiento de la eficiencia ante modificaciones en la topología de potencia y el control. En el primer caso se verificó un convertidor Boost de etapa única, también se analizó un CBI con un control de pulso único para ambas ramas. La eficiencia aumentó de 83% a 88% al agregarle la rama al Boost. Finalmente se verificó un CBI con un control de pulso push-pull (desfase de 180° entre ramas) esto se reflejó en un aumento hasta 93%.

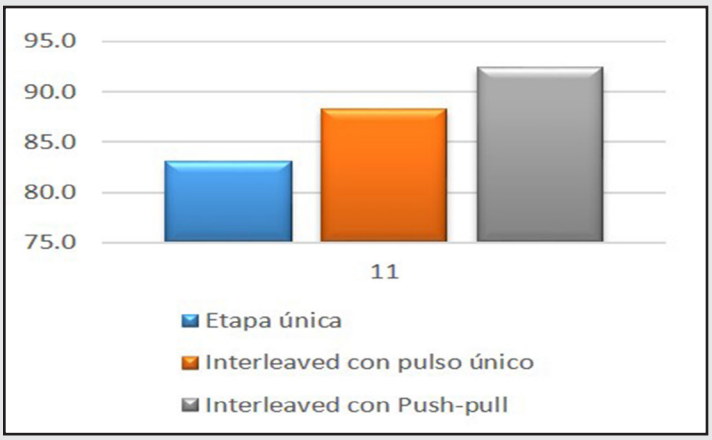


Figura 22 Eficiencia ante cambios en topología y control.

CONCLUSIONES

Existe una gran diversidad de topologías de potencia sugeridas como acondicionadores de energía para fuentes renovables. Cada configuración tiene características sobresalientes sobre otras, pero también conllevan algunas desventajas. Dependiendo del enfoque de diseño que se tenga es posible elegir alguna de ellas. En este trabajo se desarrolla un convertidor teniendo como enfoque principal la eficiencia y la confiabilidad. El CBI seleccionado permite obtener un nivel alto de eficiencia y al disminuir los esfuerzos tanto térmicos como eléctricos con lo que se tendría un incremento también en la confiabilidad.

El convertidor desarrollado puede ser empleado para diversas fuentes de energía tales como fotovoltaica, celdas de hidrogeno, eólica entre otras. Aunado al hecho de optimizar la eficiencia, el CBI puede conectarse en paralelo con otro convertidor manejando diversas fuentes e interconectándolas a un bus de CD regulado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Z. Rehman, I. Al-Bahadly, and S. Mukhopadhyay, "Multiinput DC–DC converters in renewable energy applications–An overview," Renew Sust Energ Rev, vol. 41, pp. 521-539, 2015.

[2] S. Moury, J. Lam, V. Srivastava and R. Church, "A novel multi-input converter using soft-switched single-switch input modules with integrated power factor correction capability for hybrid renewable energy systems," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 786-793.

[3] Yaow-Ming Chen, Yuan-Chuan Liu and Feng-Yu Wu, "Multi-input DC/DC converter based on the multiwinding transformer for renewable energy applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 4, pp. 1096-1104, Jul/Aug 2002.

[4] Y. C. Liu and Y. M. Chen, "A Systematic Approach to Synthesizing Multi-Input DC–DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 1, pp. 116-127, Jan. 2009.

[5] J. A. N. D. Ang and R. R. D. Borja and R. S. C. Diaz and S. D. O. Samson and J. L. A. Sanchez and E. A. Roxas and J. M. B. Rocamora, "Development of a DC-DC converter with Current Mode Control for multi-source renewable energy harvesting system," 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, 2016, pp. 556-559.

[6] Y.-M. Chen, Y.-C. Liu, and S.-H. Lin, "Double-input PWM DC/DC converter for high-/low-voltage sources," IEEE T Ind Electron, vol. 53, pp. 1538-1545, 2006.

[7] B. G. Dobbs and P. L. Chapman, "A multiple-input DC-DC converter topology," IEEE Power Electron Lett, vol. 1, pp. 6-9, 2003.

[8] A. Khaligh, J. Cao, and Y.-J. Lee, "A multiple-input DC–DC converter topology," IEEE Trans. Power Electron, vol. 24, pp. 862-868, 2009.

[9] K. P. Yalamanchili, M. Ferdowsi, and K. Corzine, "New double input DC-DC converters for automotive applications," in IEEE VPPC, 2006, pp. 1-6.

[10] M. Gavriş, O. Cornea, and N. Muntean, "Multiple input DC-DC topologies in renewable energy systems-A general review," in IEEE IN EXPRES, , 2011, pp. 123-128.

[11] N. Vázquez, C. Hernández, and E. Vázquez, "A DC/DC converter for clean-energy applications," in Clean Energy Systems and Experiences, ed, 2010, p. 1.

[12] M. Jafari, G. Hunter, and J. G. Zhu, "A new topology of multi-input multi-output buck-boost DC-DC converter for microgrid applications," in IEEE PECon, 2012, pp. 286-291.

[13] S. Liu, X. Zhang, H. Guo, and J. Xie, "Multiport DC/DC Converter for stand-alone photovoltaic lighting system with battery storage," in ICECE, 2010, pp. 3894-3897.

[14] D. Yang, X. Ruan, Y. Li, and F. Liu, "Multiple-input full bridge dc/dc converter," in IEEE ECCE, 2009, pp. 2881-2888.

[15] Khosroshahi, M. Abapour and M. Sabahi, "Reliability Evaluation of Conventional and Interleaved DC–DC Boost Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 10, pp. 5821-5828, Oct. 2015.

[16] D. Apablaza and J. Munoz, "Laboratory Implementation of a Boost Interleaved Converter for PV Applications," in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 6, pp. 2738-2743, June 2016.

[17] J. R. Pinheiro, H. A. Grundling, D. L. R. Vidor and J. E. Baggio, "Control strategy of an interleaved boost power factor correction converter," 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321), Charleston, SC, 1999, pp. 137-142 vol.1.

[18] Y. C. Hsieh, T. C. Hsueh and H. C. Yen, "An Interleaved Boost Converter With Zero-Voltage Transition," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 4, pp. 973-978, April 2009.