



Simulación del convertidor CD/CD Buck-Boost de elementos reducidos

Simulation of the CD / CD converter Buck-Boost of reduced elements

Luis David Pabón Fernández; Jorge Luis Díaz Rodríguez y Aldo Pardo García

¹Universidad de Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es , jdiazcu@gmail.com,
apardo13@hotmail.com

Resumen

Este artículo trata sobre la simulación del convertidor de CC / CC Buck-Boost de elementos reducidos en diferentes puntos de operación, para analizar el comportamiento de las corrientes, el rendimiento y la linealidad del cambio de voltaje. El objetivo es determinar la viabilidad de usar este tipo de conversión de potencia en aplicaciones donde se establece un simple circuito de control de voltaje.

Palabras clave: convertidor Buck-boost, convertidor DC / DC, convertidor de potencia, control de voltaje, rendimiento.

Abstract

This paper deals with the simulation of Buck-Boost DC/DC converter of reduced elements in different points of operation, in order to analyze the behavior of the currents, the performance and the linearity of the voltage change. The aim is to determine the feasibility of using this type of power conversion in applications where a simple voltage control loop is established.

Keywords: Buck-boost converter, DC/DC converter, power converter, voltage control, performance.

I. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de aplicaciones industriales actuales, las conversiones de potencia CD/CA[1]; CA/CD[2] y CD/CD[3] son requeridas. La conversión CD/CD es aquella en donde es necesario convertir una fuente de corriente directa (CD) de voltaje fijo en una fuente de CD de voltaje variable, o convertir un nivel de tensión de CD en un nivel de tensión diferente, los convertidores electrónicos dispuestos para hacer estas funciones reciben el nombre de convertidor CD/CD[4]. Un convertidor de CD/CD es entonces el equivalente a un transformador de corriente alterna (CA), con una relación de vueltas que varía en forma continua, permitiéndose trabajar en un modo elevador o reductor, dependiendo de la topología y el punto de operación[5].

Los convertidores CD-CD se utilizan ampliamente en el control de los motores de tracción de automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas, elevadores de minas, cargadores de baterías, reguladores fotovoltaicos, etc. siendo así dispositivos de alta relevancia en las aplicaciones domésticas e industriales. En la electrónica de potencia, ocupan una importante posición de estudio y desarrollo de los convertidores conmutados, clasificándose de acuerdo a la función que desempeñen que puede ser: Reductora o Buck, Elevadora o Boost y por último un híbrido de las dos anteriores el Buck-Boost [3], [4].

En la actualidad se han propuesto numerosos trabajos de investigación en el área de los convertidores CD/CD, que buscan entre otras cosas, nuevas topologías[6],[7], mejorar la eficiencia[6], reducir componentes, ampliar aplicaciones[6], etc. Dentro de este desarrollo en el año 2001 Weissbach y Torres [8], proponen una nueva topología muy prometedora que llaman "convertidor elevador-reductor no inversor de componentes reducidos". Esta topología es una técnica sencilla de implementar un convertidor DC/DC elevador reductor no inversor, siendo la conexión en cascada de una etapa reductora con un convertidor elevador, pero con la ventaja de que requiere de un solo inductor y un solo capacitor.

Este convertidor puede ser controlado con dos señales PWM, y puede ser usado como un convertidor reductor o elevador cuando sea requerido. De esta forma este convertidor da la posibilidad de controlar un amplio rango de tensión a la entrada para dar una tensión constante en la salida o controlar un amplio rango de tensión de salida frente a una entrada constante[8].

Pese a las numerosas ventajas que presenta este convertidor, no se tiene una claridad total en cuanto al comportamiento de las corrientes y una claridad parcial en cuanto a la linealidad, es por esto que este trabajo busca determinar mediante la simulación el comportamiento de las corrientes y la linealidad del cambio de tensión en este tipo de convertidor CD/CD

II. CONVERTIDOR BUCK-BOOST DE ELEMENTOS REDUCIDOS

La topología del convertidor se muestra en la figura 1, en esta se observan los componentes del convertidor: dos interruptores de potencia, dos diodos de circulación, un condensador y un inductor.

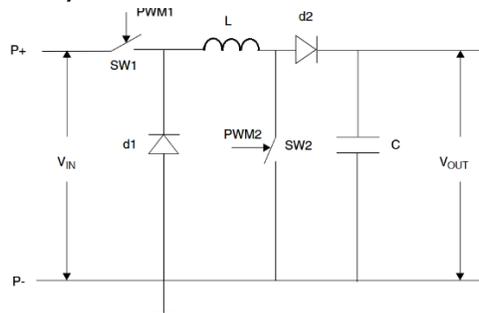


Fig. 1. Topología del convertidor [9] .

Del anterior diagrama se puede observar que si el interruptor 2 está abierto y se controla el interruptor S1 el sistema luce como un convertidor reductor, exceptuando la pérdida a través del diodo D2. Si por el contrario S1 permanece cerrado y S2 se controla el sistema luce como un convertidor elevador con excepción del camino de circulación libre D1. Si el interruptor uno permanece cerrado y el interruptor dos permanece abierto, entonces al sistema iguala el voltaje de la salida, al voltaje de la entrada menos la caída de potencial a través del diodo D2[9].

Bajo este funcionamiento se establecen los modos de operación presentados en la tabla 1. Cuando los dos interruptores están cerrados, el S2 cortocircuita la carga. De esta manera el inductor acumula energía, este es el modo de operación de un elevador. Si ambos interruptores están abiertos, no se provee energía a la carga. Esta es la condición de un convertidor reductor cuando la energía almacenada en el inductor es liberada a través de los diodos D1 y D2. Cuando el interruptor S1 está cerrado y S2 es abierto el voltaje de la carga será provisto directamente por la entrada. Esta es la condición encontrada en un convertidor reductor cuando la energía fluye del suministro a la carga. Esta condición se encuentra también cuando el convertidor elevador provee energía a la carga desde el suministro y la inductancia, elevando el nivel de voltaje de la carga[10].

Tabla 1. Descripción de los modos de operación del convertidor[10]

Modo	SW1(PWM 1)	SW2(PWM 2)	Modos de operación
1	OFF	OFF	Reductor
2	OFF	ON	No
3	ON	OFF	reductor elevador
4	ON	ON	Elevador

Para aterrizar el convertidor a un caso específico, con el fin de poder realizar la simulación, se calcularon los componentes requeridos para que el convertidor pueda suministrar una potencia de salida de 2100 W, una entrada nominal de 48 V y un voltaje de salida variable de 0 al 200% de la entrada nominal. La frecuencia de operación será de 15 kHz, esta frecuencia se seleccionó en un valor bajo, con el fin de que el convertidor pueda manejar variaciones de corriente grandes sin llevar al extremo a los dispositivos semiconductores. Este diseño permitiría tener un cargador de baterías para un sistema fotovoltaico de 48 V, el valor de la inductancia calculada es de $12.98 * 10^{-6} H$. y el valor de la capacitancia es $2.777 * 10^{-3} F$.

III. SIMULACIÓN

ESQUEMA DE SIMULACIÓN

La simulación propuesta se realizó en Simulink de Matlab. En la figura 2 se muestra el esquema de simulación, en el cual se observan los elementos de conmutación denotados con D1 y D2, los diodos de bloqueo Di1 y Di2, la inductancia L, la capacitancia C, la fuente de alimentación y los bloques generadores de PWM. En la figura se separaron los elementos de potencia del convertidor y los elementos dispuestos para generar las señales de control.

Se simuló diferentes puntos de operación que demandan diferentes cargas, con dichas cargas se variaron los ciclos de trabajo en los modos elevador, reductor y Bypass, con el fin de observar las corrientes y la linealidad del cambio de tensión. A continuación, se muestran algunos resultados

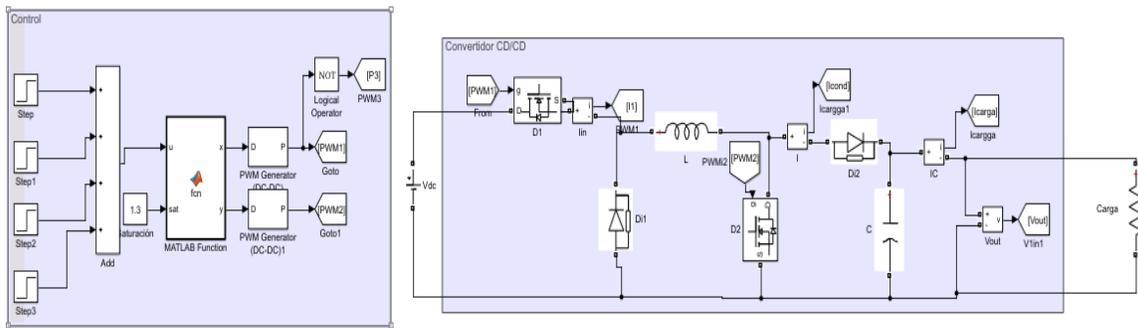


Figura. 2. Esquema de simulación

SIMULACIÓN A PLENA CARGA SIN REDUCCIÓN NI ELEVACIÓN

En esta simulación los convertidores trabajan a plena carga, y en el modo Bypass, para esto se asigna una resistencia de 1.0014 Ohm como carga y se hace que el interruptor D1 esté encendido y D2 apagado para que el convertidor no opere ni como elevador ni como reductor, las señales de control se muestran en la figura 3

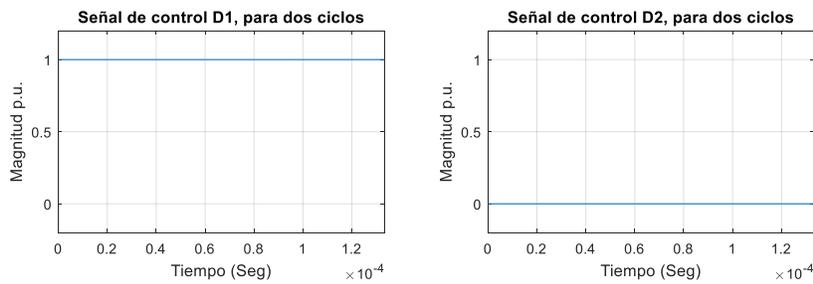


Figura 3. Señales de control

Este modo de operación debe dar una salida de tensión igual a la entrada menos las caídas de tensión en: los diodos, el interruptor D1 y en la resistencia del inductor. La siguiente figura muestra la tensión de entrada y salida del convertidor

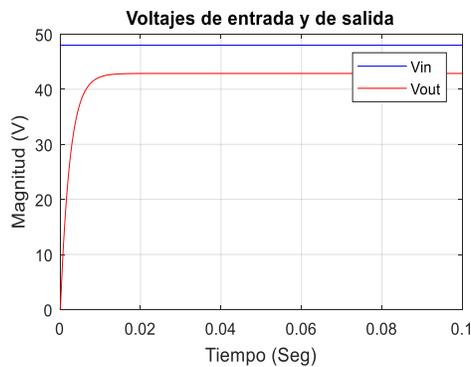


Figura 4. Voltaje de entrada y salida del convertidor.

Como se observa en la figura la tensión de entrada está en 48 V y la tensión de salida es de aproximadamente 42.88V, esto muestra que la caída óhmica a través de la inductancia y los diodos es de aproximadamente 5.12 voltios, esta tensión bastante alta debido a que el convertidor trabaja a plena carga.

La corriente de salida del convertidor se muestra en la siguiente figura 5. En esta se puede ver que la corriente entregada a la carga es de 42.8 A y es igual a la corriente de entrada, exceptuando en el estado transitorio, en donde la corriente de entrada presenta un gran pico, mientras la corriente de salida crece hasta alcanzar su estado permanente

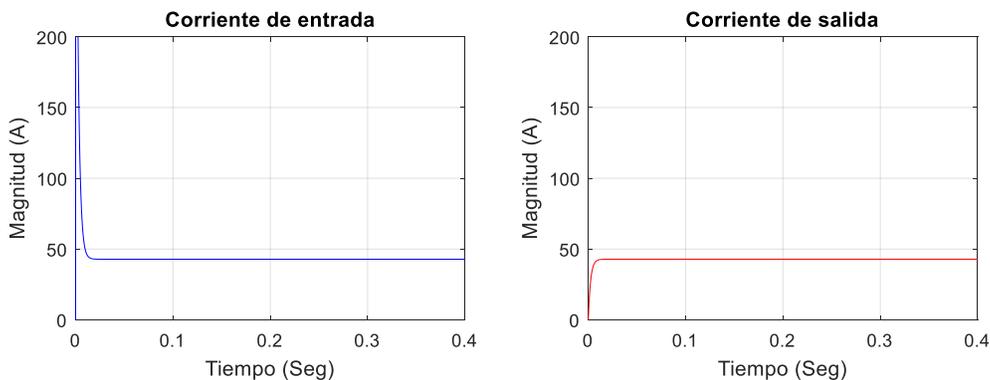


Figura 5. Corriente de entrada y salida del convertidor.

El pico de la corriente de entrada está cercano a los 440 A. lo cual es un dato relevante, ya que es una corriente extremadamente grande, sin embargo, el tiempo en el cual este transitorio sucede está alrededor de los 10 milisegundo.

En cuanto a la potencia de entrada y de salida del convertidor, se presenta la siguiente figura, en la cual se muestra que se entrega a la carga 1835 W, cercano al valor estimado de plena carga de 2300W. La diferencia se debe a que la tensión de salida no está siendo controlada y por eso presenta regulación de tensión, lo cual reduce la potencia entregada a la carga.

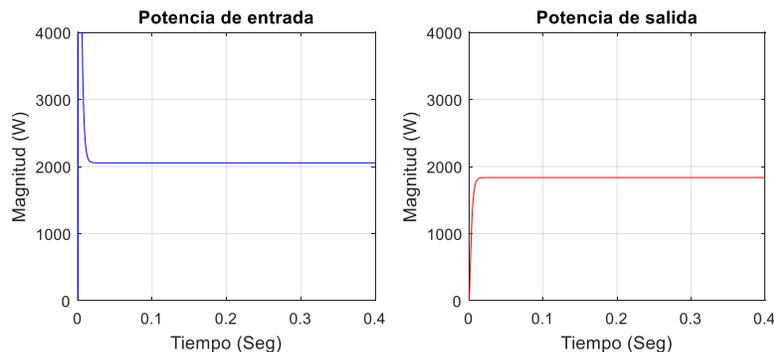


Figura 6. Potencia de entrada y salida del convertidor.

El rendimiento es del 80%, el cual es aceptable para este tipo de convertidores

SIMULACIÓN COMO REDUCTOR CICLO DE TRABAJO D1 DEL 50%

Para determinar el funcionamiento del convertidor como reductor, se asignó el ciclo de trabajo del primer interruptor en 50% mientras que el interruptor 2 permanece abierto. La carga permanece en el valor de resistencia asignado en el caso de plena carga. La siguiente figura muestra las señales de control para dos ciclos a una frecuencia de 15 kHz

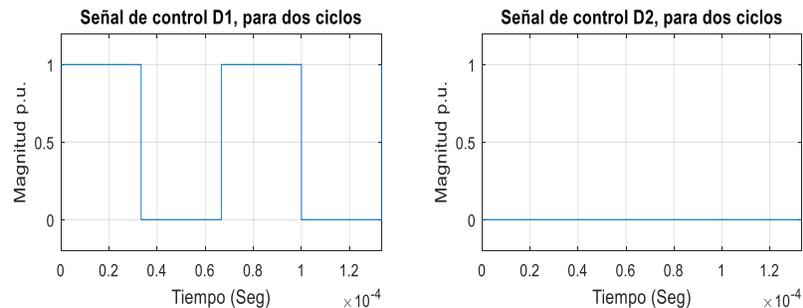


Figura 7. Señales de control

Este modo de operación debe dar una salida de tensión cercana a la mitad de la tensión presente en la entrada del convertidor. La siguiente figura muestra el comportamiento de las tensiones de entrada y salida

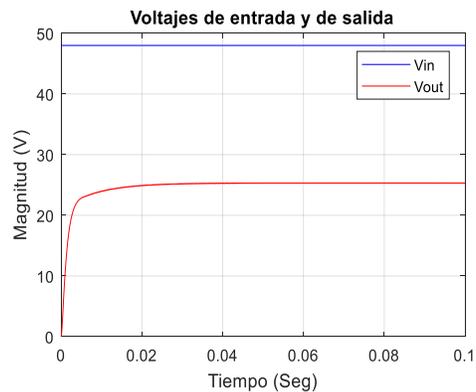


Figura 8. Voltaje de entrada y salida del convertidor.

Como se observa en la figura la tensión de entrada está en 48 V y la tensión de salida es de aproximadamente 25.32V, esto una tensión un poco superior a los 24 V esperados.

La corriente de salida del convertidor se muestra en la siguiente figura. En esta se puede ver que la corriente entregada a la carga es de 25.28 A y es muy diferente a la corriente de entrada, ya que la esta está recortada, mientras que la corriente que va hacia la carga esta filtrada por el inductor y es completamente lisa.

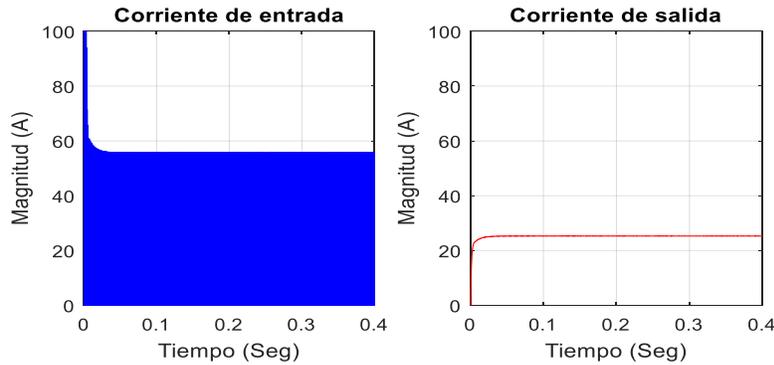


Figura 9. Corriente de entrada y salida del convertidor.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de la corriente de entrada para 3 ciclos de estado estacionario. En esta se ve como la forma de onda es un diente de sierra. Sin embargo, la carga no observa esta perturbación.

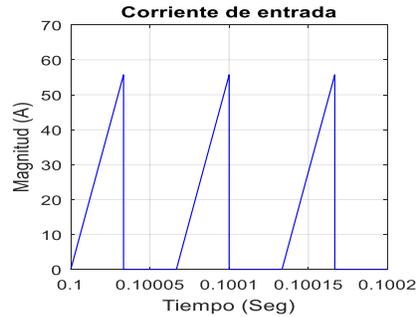


Figura 10. Forma de onda de la corriente de entrada.

En cuanto a las potencias, la siguiente figura muestra lo que sucede tanto en la entrada como en la salida. A la carga se le entregan 640W de una forma que el rizado es casi imperceptible; mientras que, en la entrada, el valor promedio de la potencia es de 669.7 W en una forma de onda similar a la corriente.

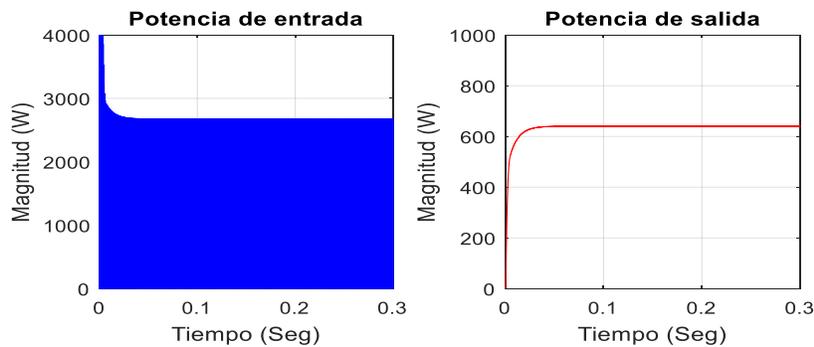


Figura 11. Potencias de entrada y salida del convertidor

Estas potencias dan como resultado un rendimiento de:94.25% el cual es excelente para este tipo de conversión

SIMULACIÓN COMO ELEVADOR CICLO DE TRABAJO D2 DEL 50%

Para determinar el funcionamiento del convertidor como elevador, se asignó el ciclo de trabajo del primer interruptor en 100% mientras que el interruptor 2 tiene un ciclo de trabajo de 50%. La carga será una resistencia de 5 Ohm, con el fin de no superar los límites del convertidor, pues la al ser una impedancia constante absorberá más potencia si el voltaje se eleva. La siguiente figura muestra las señales de control para dos ciclos a una frecuencia de 15 kHz

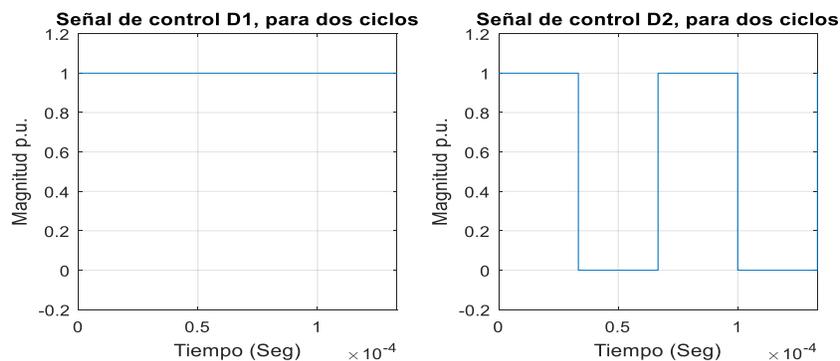


Figura 12. Señales de control

Este modo de operación debe dar una salida de tensión cercana a la 1.5 veces la tensión presente en la entrada del convertidor. La siguiente figura muestra el comportamiento de las tensiones de entrada y salida

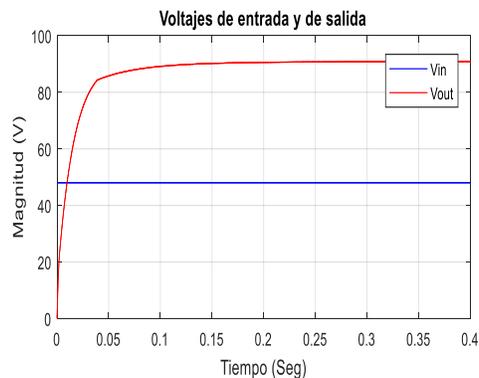


Figura 13. Voltaje de entrada y salida del convertidor.

Como se observa en la figura la tensión de entrada está en 48 V y la tensión de salida es de aproximadamente 91V, esto es una tensión muy superior a los 72 V esperados que equivalen a 1.5 veces la tensión de entrada.

La corriente de salida del convertidor se muestra en la siguiente figura. En esta se puede ver que la corriente entregada a la carga es de 18.18 A y es muy diferente a

la corriente de entrada, ya que la esta está recortada, mientras que la corriente que va hacia la carga esta filtrada por el inductor y es completamente lisa.

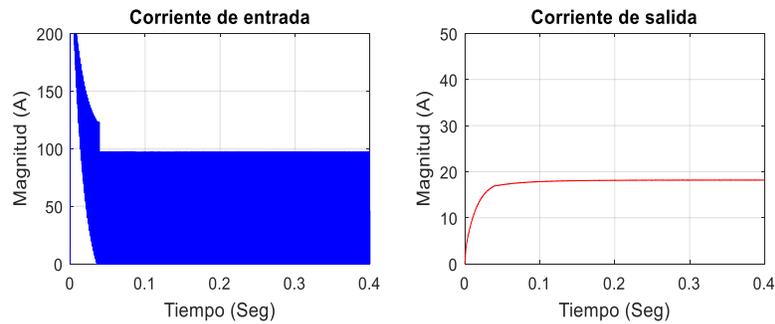


Figura 14. Corriente de entrada y salida del convertidor.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de la corriente de entrada para 3 ciclos de estado estacionario. En esta se ve como la forma de onda es un diente de sierra a diferencia del modo reductor, este diente de cierra tiene pendientes positivas y negativa muy similar.

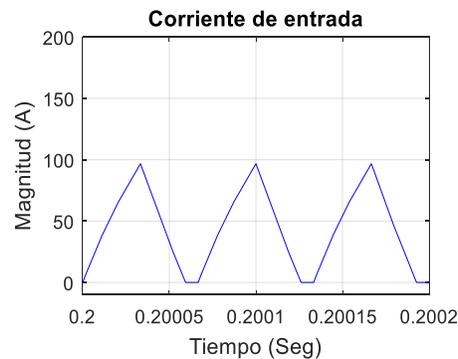


Figura 15. Forma de onda de la corriente de entrada.

En cuanto a las potencias, la siguiente figura muestra lo que sucede tanto en la entrada como en la salida. A la carga se le entregan 1653 W de una forma que el rizado es casi imperceptible; mientras que, en la entrada, el valor promedio de la potencia es de 2139 W en una forma de onda similar a la corriente.

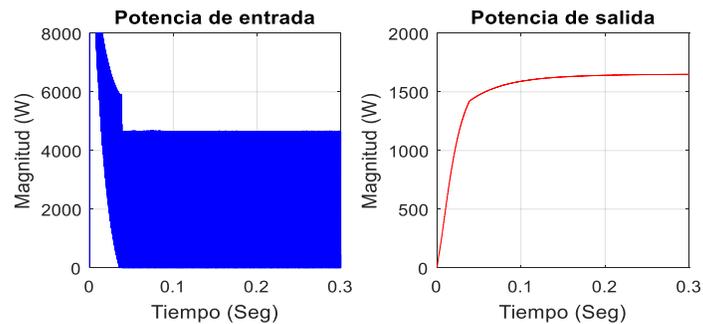


Figura 16. Potencias de entrada y salida del convertidor

Estas potencias dan como resultado un rendimiento de:77.27% Este rendimiento es el más bajo presentado en las simulaciones.

SIMULACIÓN CON CAMBIOS DE TENSIÓN

Para determinar la linealidad en los cambios de tensión, se variaron los ciclos de trabajo de los dispositivos D1 y D2 en pasos de 10%, esto en teoría debería llevar la tensión desde 0% a 200% de la tensión de entrada. La carga asignada es r una impedancia de 5 Ohm en un primer caso y 2 Ohm en un segundo caso. Con el fin de observar la variación del cambio de tensión con respecto a la carga. La figura 17 muestra las variaciones de tensión en ambos casos

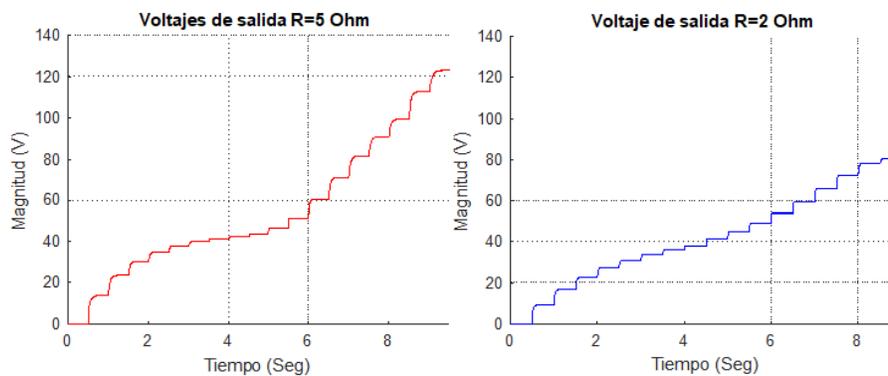


Figura 16. Variación de la tensión de salida para una resistencia de carga de 5 Ohm y 2 Ohm

Como se puede observar los pasos de 10% en los ciclos de trabajo de los interruptores no generan un cambio proporcional en la tensión de salida, sin embargo, en la zona cercana a la operación de bypass el comportamiento es casi lineal. También de la figura 16 se puede concluir que cuando el convertidor opera con una carga que demanda poca corriente, el comportamiento de la variación de tensión es no lineal y asemeja a una función cúbica; a medida que el convertidor asume cargas que demandan más corriente el comportamiento se va haciendo más lineal. Como se puede observar el aumento de carga hace que el convertidor pierda capacidad para elevar tensión. Sin embargo, en ambos casos presentados en la figura, la tensión máxima supera el 200% de la tensión de entrada.

En cuanto a las corrientes de entrada y de salida del convertidor las figuras 17 y 18 muestran los resultados obtenidos para las dos cargas utilizadas.

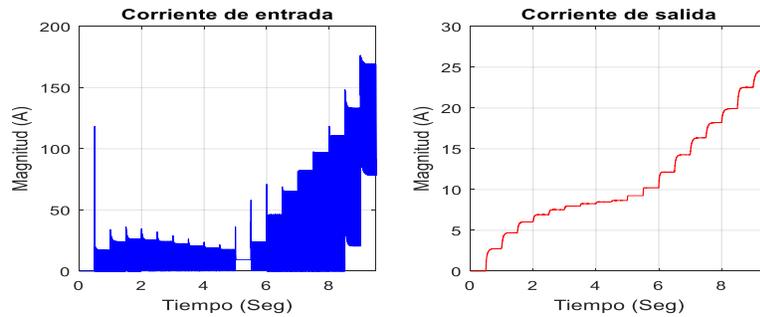


Figura 17. Corriente de entrada y salida del convertidor con una carga de 5 Ohm

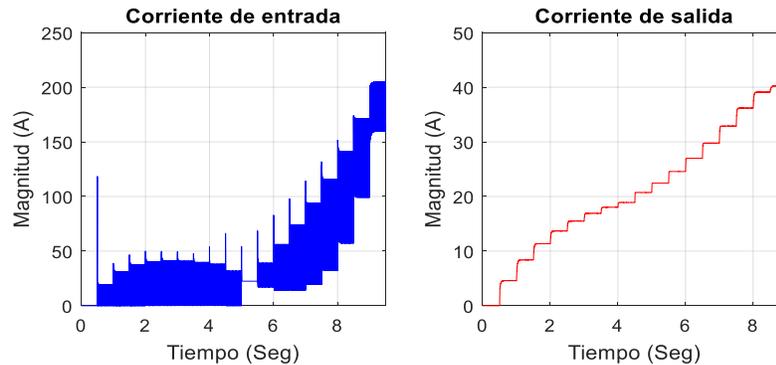


Figura 18. Corriente de entrada y salida del convertidor con una carga de 2 Ohm

Como se puede ver en la figura 17, la corriente de entrada es conmutada en todos los casos excepto en el modo bypass; en modo reductor esta corriente siempre es baja por debajo de los 40 Amperios, sin embargo, en modo elevador la corriente es elevada, esto se debe al aumento de potencia demandada. Teniendo en cuenta que la corriente nominal es de 50 A se puede determinar que en la operación en el modo elevador se presentan corrientes excesivas. En cuanto a la corriente de salida se puede decir que no presenta conmutaciones ni un rizado apreciable, presentándose completamente lisa, esto es muy conveniente debido a que la carga percibe una corriente de óptima calidad de la energía, la corriente de salida siempre permanece por debajo de los 50 A siendo la máxima corriente 24 A.

En la figura 18 el comportamiento es similar al presentado para la carga de 5 Ohm, sin embargo, se presentan corrientes de mayor valor tanto para el modo reductor como para el modo elevador; sin embargo, cuando reduce tensión la corriente no sobre pasa los 50 A nominales en estado estacionario, solo en algunos estados transitorios. En el modo elevador las corrientes son excesivas llegando a presentar valores de 200 A

En cuanto al rendimiento la siguiente figura muestra los valores registrados en los dos casos

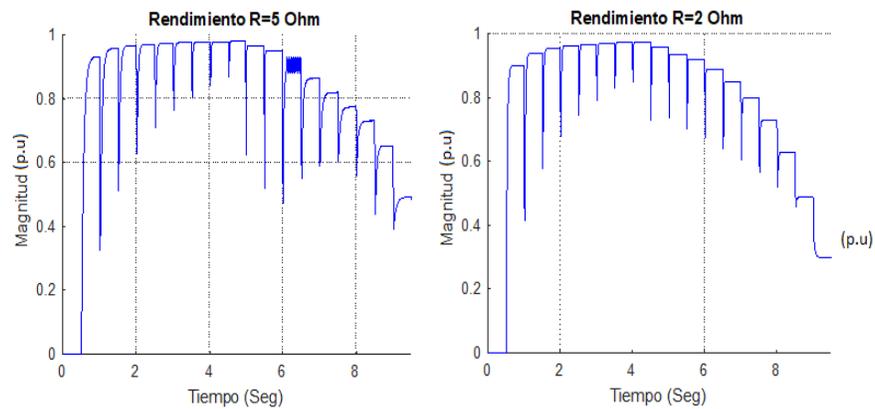


Figura 19. Corriente de entrada y salida del convertidor con una carga de 2 Ohm

En la parte izquierda se observa el rendimiento registrado con la carga de 5 Ohm y en la parte derecha con la carga de 2 Ohm. Como se observa en gran parte de la operación el rendimiento es mayor al 80%, lo cual es aceptable. Es de resaltar que en puntos de operación cercanos al modo bypass se presentan los mayores rendimientos existiendo valores superiores al 95%. Se puede concluir que, si el convertidor opera con ciclos de trabajo entre el 10% y 100% para D1, es decir como reductor de 10% al 100% del voltaje de entrada, y con ciclos de trabajo entre el 0% y el 40% para D2 que representa un modo elevador que puede representar entre el 100% y 150% de la tensión de entrada dependiendo de la carga. El convertidor tendrá rendimientos superiores al 90% lo cual es bueno para este tipo de conversión.

CONCLUSIONES

EL convertidor presenta un buen desempeño en cuanto al rendimiento cuando se encuentra con ciclos de trabajo por encima de 0.1 para D1 y menores a 0.4 para D2. esto hace que el convertidor opere con eficiencias superiores al 90% independientemente de la carga demandada.

La linealidad del cambio de tensión depende de la carga demandada, cuando el convertidor opera con cargas que demandan poca corriente, el cambio de tensión es no lineal presentándose una variación de tensión forma de función polinómica de grado 3; cuando el convertidor asume cargas que demandan corrientes altas, el cambio de tensión se tiende a linealizar. Sin embargo, cabe decir que la zona de operación cercana al modo bypass siempre presenta un comportamiento cercano al lineal.

La corriente de salida del convertidor no presenta rizado ni conmutaciones, es completamente lisa, esto es muy bueno ya que suministra corriente con una calidad adecuada; independientemente del cambio del punto de operación del convertidor,

no se presentan sobre impulsos o transitorios que puedan ser negativos para la carga.

La corriente de entrada es conmutada, al no poseer un filtro de entrada esta corriente tiene grandes variaciones, presentando una forma triangular o diente de sierra en dependencia del punto de operación y la carga. Cuando el convertidor opera en modo elevador se presenta corrientes excesivas que pueden causar que el dispositivo semiconductor D1 falle.

Para los autores la aplicación del convertidor en aplicaciones de control, en los cuales se utilice un lazo sencillo es viable para puntos de operación que estén cercanos a la tensión de entrada ya que esta zona independientemente de la carga es lineal. Considerando el factor rendimiento y linealidad se sugeriría utilizar este tipo de conversión en aplicaciones que conlleven una variación de tensión con respecto a la entrada del 50% al 140%, para cargas bajas; para cargas altas la linealidad y el rendimiento hacen que se piense en un rango del 10% al 140%.

Referencias Bibliográficas

- [1] L. D Pabón F., J. Diaz Rodriguez, and A. Pardo, *Optimización evolutiva del contenido armónico de un inversor*, vol. 13. 2015.
- [2] X. Lin and F. Wang, "High step-up voltage gain AC-DC rectifier based on transformerless switched-inductor converter for power factor correction," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2018, pp. 2132–2136.
- [3] B. Choi, "Modeling PWM Dc-to-Dc Converters," in *Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, and Control Designs*, IEEE, 2013, p. 1.
- [4] B. Choi, "Dc-to-Dc Power Converter Circuits," in *Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, and Control Designs*, IEEE, 2013, p. 1.
- [5] F. Asadi, K. Eguchi, and J. Hudgins, *Dynamics and Control of DC-DC Converters*. Morgan & Claypool, 2018.
- [6] M. Narimani and G. Moschopoulos, "An Investigation on the Novel Use of High-Power Three-Level Converter Topologies to Improve Light-Load Efficiency in Low Power DC/DC Full-Bridge Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5690–5692, 2014.
- [7] X. Zhang and T. C. Green, "The Modular Multilevel Converter for High Step-Up Ratio DC–DC Conversion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 4925–4936, 2015.



- [8] R. S. Weissbach and K. M. Torres, "A noninverting buck-boost converter with reduced components using a microcontroller," in *Proceedings. IEEE SoutheastCon 2001 (Cat. No.01CH37208)*, 2001, pp. 79–84.
- [9] STMicroelectronics, "Application note AN2389: An MCU-based low cost non-inverting buck-boost converter for battery chargers." pp. 1–16, 2007.
- [10] STMicroelectronics, "AN2390 Application note A flexible universal battery charger." pp. 1–42, 2007.
- [11] Amado G., E; Villamizar, A; Gafaro, A.2013.Evaluación del procesos de producción de biodiesel a partir de grasas amarillas con altos contenidos de acidos grasos libres.Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas,3(1): 54-60

*Para citar este artículo:Pabón Fernández L.D;Díaz Rodríguez J.L y Pardo García A.Simulation of the CD / CD converter Buck-Boost of reduced elements. Revista Bistua.2018.16(2):59-73

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Luis David Pabón Fernández.Universidad de Pamplona, *Colombia*. davidpabon@hotmail.es

Recibido: Noviembre 26 de 2017

Aceptado: Febrero 26 de 2018