

# REDUCCIÓN DEL VOLTAJE DE RIZADO EN UN CONVERTIDOR ELEVADOR DC-DC MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

## REDUCTION OF RIPPLE VOLTAGE IN A DC-DC BOOST CONVERTER USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Cristian Chiñas-Palacios<sup>1,3</sup>, Jesús Águila-León<sup>\*1,3</sup>, Carlos Vargas-Salgado<sup>2,3</sup>, Julián Sotelo-Castañón<sup>1</sup>, Elías J. Hurtado<sup>2,3</sup>, Edith X. M. García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Tonalá, México.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

<sup>3</sup>Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

\*jesus.aguila@ieee.org

Recibido: octubre 15, 2019 / Aceptado: marzo 7, 2020 / Publicado: noviembre 14, 2020

**Resumen.** Los convertidores de corriente directa a directa, CD-CD, se utilizan en diversas aplicaciones industriales, siendo la principal en los inversores solares. La no-linealidad de la construcción y funcionamiento de los convertidores de potencia origina que el voltaje y corriente de salida tengan un efecto de rizado. El sobrecalentamiento de los capacitores cerámicos es un problema que afecta el desempeño de muchos circuitos de alta frecuencia, y el efecto de rizado aumenta la temperatura en los capacitores. Exceder los rangos de voltaje y corriente de rizado en un capacitor cerámico puede afectar seriamente su desempeño, pese a que no se presente una falla inmediata, sobrecalentar los capacitores por efecto de rizado aumentará la probabilidad de falla. El efecto de rizado puede atenuarse a la salida mediante un filtro adicional, sin embargo, dicho filtro se verá afectado por las mismas altas frecuencias de conmutación. En primera instancia, el efecto de rizado depende de la selección de componentes en el diseño del convertidor y de la frecuencia de conmutación, por lo que un diseño adecuado del convertidor es importante. En el presente trabajo se presenta la implementación de un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) para el diseño de parámetros óptimos de inductancia, capacitancia y frecuencia de conmutación de un convertidor elevador electrónico de potencia. Para la simulación del convertidor se empleó *MATLAB/Simulink* y la librería *SPS<sup>TM</sup> Simulink*. Los resultados de diseño óptimo mediante PSO se comparan contra selección tradicional de componentes, mostrando que el diseño asistido mediante el algoritmo tiene un menor efecto de rizado en el voltaje y la corriente a la salida del convertidor.

**Palabras clave:** convertidor elevador, voltaje de rizado, corriente de rizado, optimización, PSO.

**Abstract.** The direct-to-direct current power converters, DC-DC, are used in many industrial applications, being the main one in solar inverters. The non-linearity of the construction and operation of the power converters causes the output voltage and current to have a ripple effect. Ceramic capacitor overheating is a problem that affects the performance of many high-frequency circuits, and the ripple effect increases temperature in capacitors. Exceeding the voltage and current ripple ranges in a ceramic capacitor can seriously affect its performance, even if there is no immediate failure, overheating the capacitors by ripple effect will increase the probability of failure. The ripple effect can be attenuated at the output by an additional filter; however, the filter will be affected by the same high switching frequencies. In the first instance, the ripple effect depends on the selection of components for the power converter design and the switching frequency, so a proper design of the converter is important. This paper presents the implementation of a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for the design of optimal inductance, capacitance, and switching frequency parameters of a power electronic boost converter. MATLAB/Simulink and the Simulink SPS<sup>TM</sup> library were used for the converter simulation. Optimal design results using PSO were compared against a traditional component selection approach, showing that the algorithm-assisted design has a lower ripple effect on voltage and current at the converter output.

**Keywords:** boost converter, ripple voltage, ripple current, optimization, PSO.

## 1. Introducción

Existen dispositivos electrónicos capaces de convertir la corriente directa en un circuito a un nivel de voltaje mayor en la salida, o inferior, dependiendo del tipo de aplicación. Estos convertidores se usan

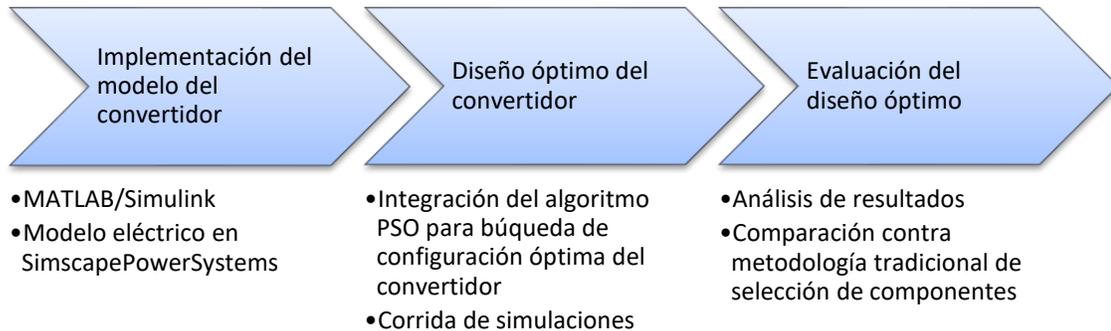
frecuentemente como fuentes de alimentación conmutada, o SMPS (por sus siglas del inglés *Switched Mode Power Supply*), así como en diversas aplicaciones en energías renovables donde es necesario mantener niveles de voltajes estables ante condiciones variantes de generación eléctrica [1]. A estos convertidores se les conoce como convertidores electrónicos de potencia. Generalmente, éstos se clasifican en tres categorías dependiendo de su configuración; cortador reductor, cortador elevador, y cortador reductor-elevador [2]. Internamente estos convertidores requieren de un diseño electrónico previo, el cual combina capacitores, inductores y elementos de conmutación de alta frecuencia en diferentes configuraciones, según el tipo de convertidor. Puesto que los convertidores están contruidos con elementos electrónicos no-lineales, su comportamiento será no-lineal, y dentro de las consecuencias de esta característica se encuentra el efecto de rizado, tanto para el voltaje como para la corriente a la salida del convertidor. El efecto de rizado a la salida del convertidor, ya sea en voltaje o en corriente, es tener una pequeña componente de alterna montada sobre la teórica salida de directa del convertidor [3]. No obstante, someter las cargas de corriente directa a una componente de alterna puede causar daños, desde sobrecalentamientos hasta la reducción del tiempo de vida útil de los componentes involucrados [4]. Para reducir las consecuencias del efecto de rizado suelen aplicarse filtros capacitivos a la salida del convertidor, sin embargo, si el efecto de rizado es grande dichos filtros se verán igualmente afectados en la reducción de la vida útil del dispositivo [5]. Otra manera de reducir el rizado a la salida de los convertidores es mediante un diseño adecuado del dispositivo, existiendo métodos tradicionales basados en la elección de componentes mediante fórmulas, así como esfuerzos por aplicar métodos metaheurísticos para encontrar configuraciones óptimas [6].

Para dar solución a un problema en específico se puede recurrir a una serie de pasos organizados que describen el proceso a seguir para resolver dicha problemática. Estos “algoritmos” permiten encontrar la mejor solución a través de funciones de prueba en un espacio de búsqueda establecido. Las herramientas computacionales logran facilitar los cálculos matemáticos de ecuaciones complejas en las que le tomaría bastante tiempo a un ser humano efectuarlas adecuadamente. Esto conlleva a analizar, evaluar e implementar técnicas computacionales para el desarrollo de algoritmos capaces de obtener una mejor aproximación en la búsqueda del mejor resultado. En la naturaleza muchos organismos trabajan conjuntamente para realizar diversas tareas de manera colectiva; por ejemplo, en la búsqueda de alimento, en la sobrevivencia de depredadores, o en la construcción de un refugio. En estos comportamientos colectivos de los individuos biológicos se basan los algoritmos bio-inspirados de optimización para encontrar solución a ecuaciones complejas en distintos problemas de ingeniería [7]. El presente trabajo muestra la implementación de un algoritmo de optimización por enjambre de partículas, (PSO, *Particle Swarm Optimization*) para un convertidor elevador de corriente directa, con el objetivo de lograr una reducción del efecto de rizado a la salida del convertidor al obtener los valores de los parámetros óptimos de la inductancia, la capacitancia y de la frecuencia de conmutación en el interruptor electrónico, comparando los resultados obtenidos frente al diseño teórico mediante fórmulas para el cálculo de los parámetros del convertidor..

## 2. Metodología

Para la realización de este trabajo se modeló el circuito del convertidor recortador-elevador a través de un modelo de aproximación eléctrica empleando la librería especializada en sistemas eléctricos de potencia del programa de Matlab, llamada *SimscapePowerSystems* (de ahora en adelante, SPS<sup>TM</sup>). Subsecuentemente, se integró el algoritmo PSO al modelo en *Simulink* del convertidor y se realizaron pruebas de simulación para encontrar los valores óptimos del inductor, del capacitor y de la frecuencia de conmutación del interruptor electrónico. Además, se analizó el voltaje de rizado de salida una vez optimizados los valores del convertidor. Asimismo, se evaluó la eficiencia del convertidor con los cálculos de la metodología tradicional de selección

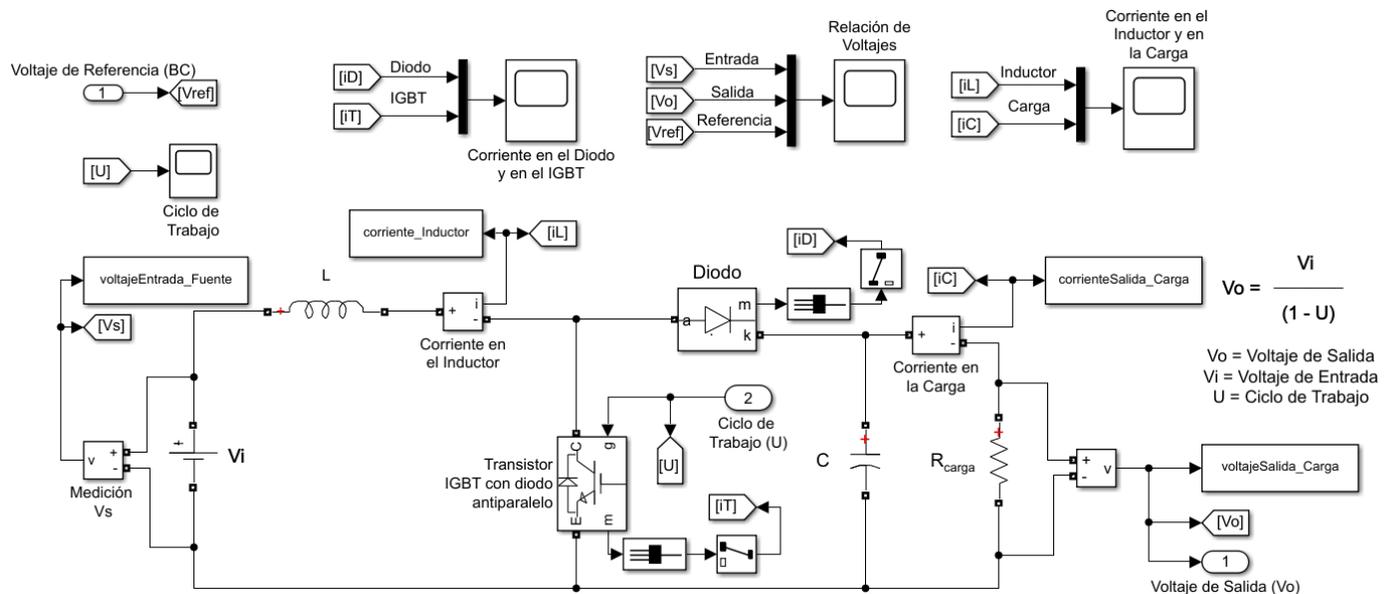
de componentes como se mencionan en [5], [7] y [8]. La Figura 1 muestra la representación de la metodología utilizada para la evaluación de la configuración del convertidor recortador-elevador.



**Figura 1.** Metodología utilizada para realizar la evaluación de configuración de parámetros del convertidor.

### Implementación del modelo del convertidor en MATLAB/Simulink

El diseño del modelo eléctrico del convertidor se realizó en Matlab utilizando la librería SPS™ de Simulink. La Figura 2 muestra el diseño de la configuración del convertidor recortador-elevador elaborado, junto con los componentes inductivo, capacitivo, y la frecuencia  $f$  del generador de pulsos a seleccionar, tanto mediante el algoritmo de optimización por enjambre de partículas como por el método tradicional de diseño. El voltaje de entrada seleccionado fue de 12V, ciclo de trabajo de 51%, un transistor IGBT de resistencia interna de  $0.003 \Omega$ , y un diodo de propósito general de 0.7V. Se realizó la simulación del sistema empleando el esquema eléctrico del circuito, de tal manera que dicha representación incluyera de manera más fiel la no-linealidad del sistema y, por lo tanto, una representación más fiel del efecto de rizado presente en los convertidores de potencia.



**Figura 2.** Modelo eléctrico del convertidor recortador-elevador implementado en Simulink.

## Diseño óptimo de los parámetros del convertidor

Con el fin de reducir el voltaje de rizado a la salida del convertidor, se implementó el algoritmo PSO para encontrar valores óptimos de los parámetros  $L$ ,  $C$  y  $f$ , tales que dicho rizado sea el mínimo posible. El algoritmo PSO es una técnica de optimización de la computación evolutiva. La idea básica del PSO surge del comportamiento colectivo observado en varias especies animales, como los cardúmenes de peces y las bandadas de aves, para la exploración y explotación de fuentes de alimento. El algoritmo PSO posee parámetros de ajuste inercial, de comportamiento social e individual para cada partícula; la velocidad de convergencia del algoritmo hacia una solución al problema de optimización depende de los valores de ajuste para esos parámetros [9]. Las partículas evalúan la función objetivo en el espacio de búsqueda en función de sus coordenadas, comparando resultados anteriores. Al mejor resultado en determinadas coordenadas se le denomina mejor personal,  $P_{best}$  y al mejor resultado de la función objetivo encontrado por el total de partículas se le conoce como mejor global,  $g_{best}$ . Cada partícula posee una velocidad, por lo que vector de velocidades para partículas se representa por  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ . El algoritmo convergerá a la mejor solución global conforme las partículas actualizan su velocidad en un vector de velocidades, alrededor las mejores soluciones personales y globales encontradas hasta ese momento. Los cambios de velocidad son generados a través de factores de aceleración, que son números aleatorios. La velocidad de cada partícula se actualiza para cada iteración según (1), y su posición por (2).

$$v_{id}^{n+1} = wv_{id}^n + c_1 rand_1 [0,1] (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 rand_2 [0,1] (p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (1)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (2)$$

Donde  $v_{id}^{n+1}$  es la actualización de velocidad de la partícula  $i$  para la iteración  $n+1$  en un espacio de  $d$  dimensiones,  $w$  es el factor de inercia,  $c_1$  y  $c_2$  son las constantes de aceleración,  $p_{id}^n$  es la mejor solución personal de la partícula  $i$  en la iteración  $n$ ,  $p_{gd}^n$  es la mejor solución global de todas partículas en la iteración  $n$ ;  $x_{id}^{n+1}$  es la actualización de posición de la partícula y  $x_{id}^n$  es la posición actual de la partícula dada en la iteración  $n$ .

## Diseño tradicional de los parámetros del convertidor

Los convertidores comerciales siguen una serie de ecuaciones matemáticas para calcular los valores de la capacitancia y la inductancia en el convertidor. Para la frecuencia de conmutación en los convertidores elevadores en el mercado van de los 100 kHz a los 2 MHz. Para calcular el valor de la inductancia, se utilizó la fórmula descrita en [10].

$$L = \frac{(V_{out} + V_D - V_{in\_min}) * (V_{in})^2}{2 * 0.2 * I_{out} * (V_{out} + V_D)^2 * f} \quad (3)$$

Donde  $I_{out}$  es la corriente de operación de salida del circuito,  $V_{out}$  es el voltaje de salida y  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $f$  es la frecuencia de conmutación. Para el caso de la capacitancia, el valor mínimo en la salida del convertidor se calcula en [8] y la fórmula matemática queda expresada como:

$$C_{out_{min}} = \frac{I_{out_{max}} D}{f_{sw} R} \quad (4)$$

Donde  $C_{out_{min}}$  es la capacitancia mínima de salida en el convertidor,  $I_{out_{max}}$  es la corriente máxima de salida,  $D$  es el ciclo de trabajo,  $f_{sw}$  es la frecuencia de conmutación del interruptor electrónico y  $R$  es la carga nominal del sistema.

Para el caso de diseño por método tradicional, los valores seleccionados de los componentes se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Valores de los parámetros de configuración del convertidor recortador-elevador por el método tradicional.

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada, $V_i$	12
Voltaje de salida, $V_o$	24
Inductancia, $L$ (mH)	1.3
Capacitancia, $C$ ( $\mu F$ )	256
Frecuencia, $F$ (Hz)	1000
Ciclo de trabajo, $U$	51

Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados y Discusiones

Se empleó un espacio de búsqueda previamente definido ( $L$  en el rango de [1mH – 47mH], para  $C$  de [1 $\mu$ F-50 $\mu$ F] y para  $f$  de [100Hz-1MHz]) para realizar las pruebas de simulación del algoritmo PSO en el convertidor recortador-elevador. La Tabla 2 representa los parámetros de configuración para el algoritmo de optimización basado en enjambre de partículas en el que se encuentra escrito en un archivo de código de programación en *Matlab*. Los parámetros  $L$  y  $C$  se ajustaron dentro de un rango de búsqueda de inductancia y capacitancia comercialmente disponibles en el mercado, y  $f$  dentro de un nivel de operación de conmutación a baja–media frecuencia.

La Tabla 2 muestra el resumen para el caso de población de 2, 5, 10 y 100 partículas. Siendo los mejores resultados con menor  $V_{pp}$  (voltaje pico-pico) de rizado en el caso de 100 partículas, teniendo además el menor tiempo de simulación con 410 segundos. Para el caso de las 100 partículas de simulación obtenidas mediante el algoritmo PSO, los resultados finales para los parámetros son de  $f = 9,230 Hz$ ,  $L = 18.4 mH$  y  $C = 21.8 \mu F$ .

**Tabla 2.** Comparativa entre los resultados obtenidos en los diferentes casos de simulación del algoritmo PSO en el convertidor recortador elevador.

<i>Configuración del algoritmo</i>			<i>Configuración del convertidor</i>			<i>Resultados de la simulación</i>	
<i>Población</i>	<i>Iteraciones</i>	<i>Corridas</i>	<i>L (mH)</i>	<i>C(uF)</i>	<i>f (kHz)</i>	<i>Vpp rizado (V)</i>	<i>Tiempo de sim. (s)</i>
2	67	172	40.6	7.32	10	3	439
5	90	240	47	17.1	7.89	1.5	700
100	1	153	18.4	21.8	9.23	0.1	410

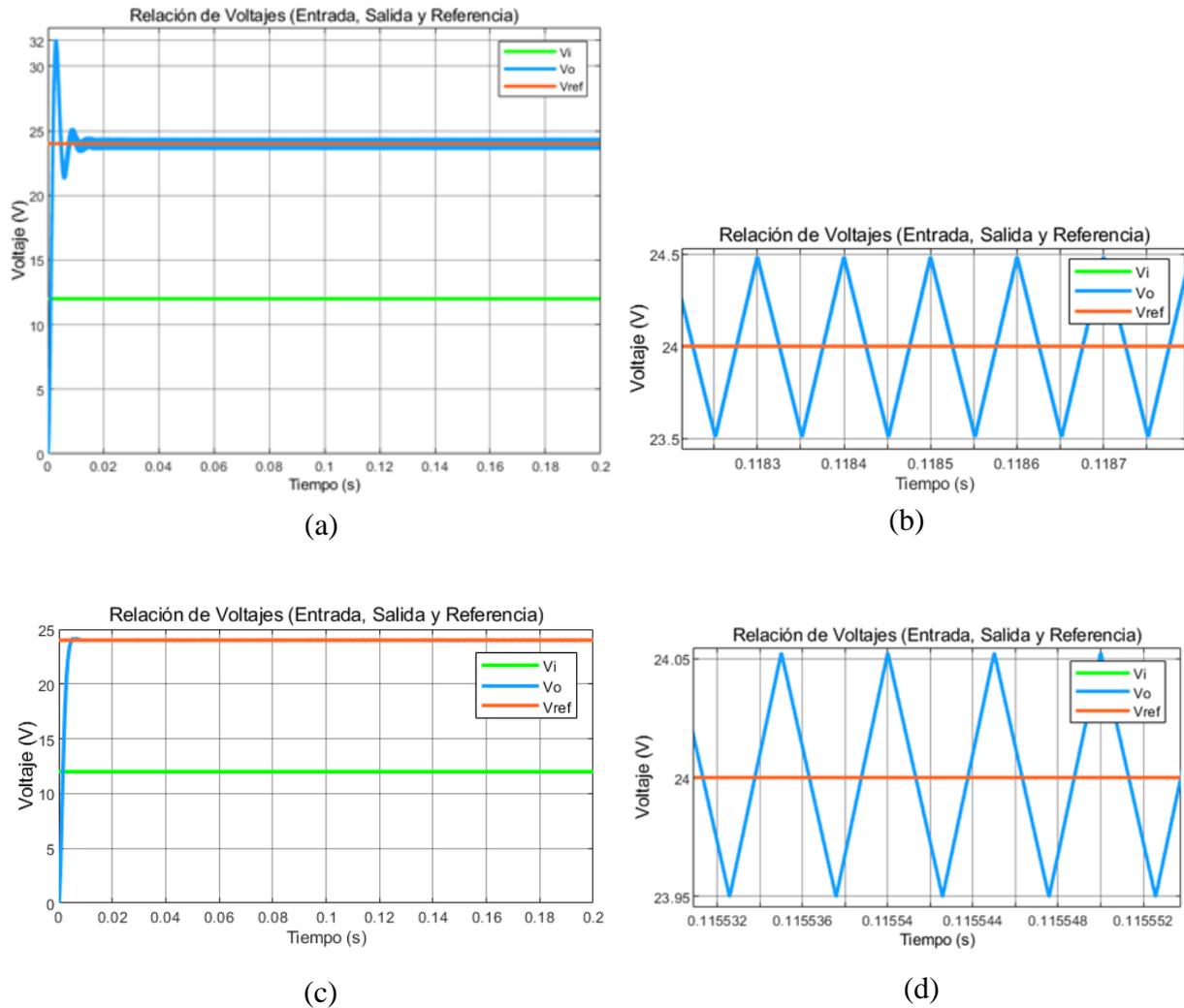
Fuente: elaboración propia

La Figura 3 muestra una comparativa entre los resultados del voltaje de rizado por el método tradicional contra el método optimizado; la Figura 3a muestra las tensiones de entrada, de salida y tensión deseada en un tiempo de simulación de 2 segundos. Se distingue que existe un estado transitorio al iniciar la simulación, en donde el valor de tensión alcanza los 32 V, llegando a ser perjudicial para los componentes por el sobreimpulso generado. En la Figura 3b se detalla el voltaje de rizado, obteniendo un voltaje máximo de 24.5 V y un voltaje mínimo de 23.5 V. No obstante, la Figura 3c muestra las tensiones para el caso del convertidor optimizado, observando el estado transitorio no tan significativo al momento de llegar al voltaje deseado. Además, el tiempo de asentamiento de la señal es considerablemente más rápido que en el caso del convertidor tradicional. La Figura 3d representa el voltaje de rizado, estando entre los valores de 24.05 V y 23.95 V.

De acuerdo con el análisis del voltaje pico-pico,  $V_{pp}$ , de rizado, se observa que para el caso del diseño mediante la técnica tradicional es de 1 V (ver Figura 3b), mientras que para el caso asistido por PSO es de 0.1 V (ver Figura 3d). Por lo tanto, se obtiene una reducción del  $V_{pp}$  de rizado en un 90% al aplicar el PSO para el diseño del convertidor.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo tuvo la finalidad de implementar un algoritmo PSO para encontrar los valores óptimos de los parámetros de frecuencia de conmutación en el interruptor electrónico mediante un generador de pulsos, la inductancia en la bobina y la capacitancia del capacitor en un circuito convertidor de potencia de tipo recortador elevador, con el objetivo de reducir el voltaje pico-pico de rizado a la salida. Los valores encontrados por el algoritmo PSO obtuvieron un voltaje pico-pico de rizado un 90% más pequeño que el obtenido por método tradicional, por lo que este algoritmo inspirado en la naturaleza de los organismos biológicos muestra ser una herramienta útil para el diseño óptimo de convertidores de potencia. Hay que hacer mención que los mejores resultados obtenidos para los valores L, C y f son ideales, y habrá que buscar componentes comerciales que se aproximen a dichos valores simulados con el fin de obtener el menor rizado posible. Pese a lo anterior, el algoritmo obtuvo muy buena respuesta y fue muy efectivo en las simulaciones realizadas con el convertidor. En general, se encontró la mejor solución al problema de optimización del desempeño del convertidor electrónico por el método del algoritmo de enjambre de partículas de una manera eficaz.



**Figura 3.** Comparativa entre los resultados del rizado, (a) comparando el algoritmo PSO contra (b) el método convencional.

### 5. Referencias

- [1] J. T. Bialasiewicz *et al.*, “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [2] M. W. Marosek, (Agosto 2002). 60V step-down DC/DC converter maintains high efficiency over a Wide Range of Input Voltages, *Analoge Devices [online]* Vol. N/A, Art. # N/A. <https://www.analog.com/en/technical-articles/60v-3a-step-down-dcdc-converter-maintains-high-efficiency-over-wide-rage-input-voltage.html#> Elsevier Inc., 2015. Consultado Octubre 2019.
- [3] S. Banerjee, A. Ghosh, and N. Rana, “An Improved Interleaved Boost Converter with PSO-Based Optimal Type-III Controller,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 323–337, 2017.
- [4] Y. Gu and D. Zhang, “Interleaved boost converter with ripple cancellation network,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3860–3869, 2013.
- [5] A. N. Kasiran, A. Ponniran, N. A. S. Ngamidun, M. S. Shaili, A. M. Zaini, and M. H. Yatim, “Optimum Phase Selection of

- Multiphase Interleaved DC-DC Boost Converter for Current Stress and Switching Devices Losses Reduction,” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 11, pp. 11–18, 2019.
- [6] A. Mehmood, I. U. H. Shaikh, and A. Ali, “Comparative analysis of Different Control Techniques on Interleaved Boost Converter in Discrete Time Domain,” *Proc. 2019 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol. IBCAST 2019*, pp. 366–370, 2019.
- [7] K. Prithivi, M. Sathyapriya, and L. A. Kumar, “Output Voltage Ripple (OVR) Reduction of Boost Converter Using Particle Swarm Optimization,” *Circuits Syst.*, vol. 07, no. 12, pp. 4009–4023, 2016.
- [8] J. Arrigo, “Application Report: Input and Output Capacitor Selection,” 2006.
- [9] Y. Shi and R. Eberhart, “A modified particle swarm optimizer,” in *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, pp. 69–73.
- [10] W. Elektronik, “Power Inductors & Design Tips: A practical guide for the selection of power inductors for DC / DC converters.”