

TÉCNICA DE CONMUTACIÓN SUAVE PARA UN CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR DOBLE CON APLICACIONES EN ILUMINACIÓN

Pablo Israel Guzmán Tafoya

Tecnológico Nacional de México en Celaya

M1503104@itcelaya.edu.mx

Nimrod Vázquez Nava

Tecnológico Nacional de México en Celaya

n.vazquez@ieee.org

René Osorio Sánchez

Universidad de Guadalajara

rene.osorio@profesores.valles.udg.mx

Resumen

En este artículo se presenta una técnica de conmutación suave para el convertidor Reductor-Elevador Doble (CRED) con aplicación en lámparas LED. El convertidor consta de un convertidor Reductor-Elevador de dos etapas que presenta un interruptor principal y salida positiva. La primera etapa, conectada a la red eléctrica, contiene un inductor que opera en modo de conducción discontinua (MCD), permitiendo alcanzar naturalmente un factor de potencia elevado. La segunda etapa busca mejorar la respuesta dinámica de la corriente en la lámpara LED de 69 W trabajando en modo de conducción continua (MCC), obteniendo así, un rizo de corriente pequeño a la salida del convertidor. La topología, al ser una integración de dos convertidores, presenta una concentración de esfuerzos en el interruptor cuando se activa con conmutación dura. La técnica de conmutación suave propuesta consiste en un snubber activo de voltaje y un snubber pasivo de corriente que busca modificar las señales en el transistor, de voltaje en el apagado

y de corriente en el encendido. Simulaciones en el software PSim son utilizadas para demostrar el funcionamiento de los circuitos auxiliares.

Palabras Claves: Corriente, interruptor, reductor-elevador, snubber, voltaje.

Abstract

In this paper, a soft switching technique for a LED driver based on an Integrated Double Buck-Boost (IDBB) converter is presented. The converter is a two-stage cascade Buck-Boost topology featuring a single main switch and positive voltage output. The first stage is connected to the grid and it is operated in discontinuous conduction mode (DCM); working in this way a high power factor is naturally achieved. The second stage is used to improve the dynamic performance of the LED current and works in continuous conduction mode (CCM), which allows a low output current ripple in a 69W LED lamp. As an integrated converter, the power losses of the two stages are concentrated in the single transistor, when it is in hard switching. The proposed soft switching technique consists on a lossless voltage active snubber and a current passive snubber, which allows that the converter switches at zero voltage at the turn off, and in zero current at during the turn on. A comparison between hard switching and soft switching techniques is made based on a PSim simulation.

Keywords: Buck-boost, current, snubber, switch, voltage.

1. Introducción

La iluminación LED se ha convertido en una fuente confiable de luz por sus características como el tiempo de vida que presentan sus componentes, el empaquetado pequeño y libre de mercurio y las eficiencias elevadas [Zhou, 2008], [Bo, 2009]. A pesar de los rasgos positivos que las lámparas LED presentan, deben contar con un convertidor que asegure las especificaciones correctas como un factor de potencia elevado y una corriente constante para evitar cambios bruscos en la iluminación.

Se han propuesto diferentes soluciones para mantener un factor de potencia elevado. Circuitos pasivos y activos se han encontrado como respuestas. De igual

manera, para reducir la intermitencia de la luz, se aplican circuitos que entregan rizados de corriente pequeños y sin grandes variaciones [Gobbato, 2016], [Kim, 2017].

El CRED logra obtener el factor de potencia elevado con un componente pasivo operado en modo de conducción discontinua. La salida del convertidor ofrece un rizo de corriente pequeño debido a la integración de un segundo convertidor Reductor-Elevador alimentado por la primera etapa. El convertidor consta de un interruptor, tres diodos, dos inductores y dos capacitores (figura 1) [Alonso, 2012]. La topología presenta la limitación causada por el interruptor principal. Este elemento une ambas partes del circuito acumulando las pérdidas de potencia en el mismo debido a que el voltaje y la corriente de ambos subcircuitos concurren en este punto en particular.

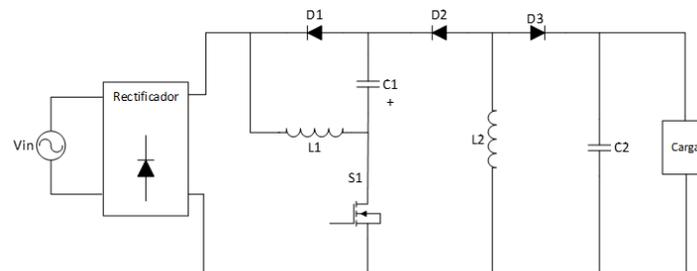


Figura 1 Esquemático del CRED.

Para reducir el esfuerzo en el transistor, circuitos auxiliares como snubbers o clamps pueden ser utilizados. Este tipo de arreglos modifican o limitan las señales de voltaje y corriente. Redes de este tipo pueden llegar a ser activas o pasivas ayudan al interruptor a conseguir una conmutación suave sin alterar las características que presenta el sistema.

Existen, de igual manera, circuitos snubber disipativos y sin pérdidas. Los primeros usan elementos como resistencias en donde se disipa la energía, causando una disminución en la eficiencia del sistema. Las redes sin pérdidas utilizan elementos almacenadores de energía que reciclan la misma dentro del circuito. Sin embargo, existen topologías que pueden causar problemas, como los que utilizan inductancias acopladas. Si éstas no están correctamente acopladas la

inductancia de dispersión puede generar problemas con sobretiros de voltajes [Tseng, 1998], [Marshall, 2006], [Zhao, 2011]; [Mohammadi, 2015], [Konishi, 2007], [Yao, 2002], [Chu, 2010], [Fujiwara, 1999], [Choe, 2014]. Los circuitos sin pérdidas son preferidos por la eficiencia que permiten alcanzar.

En este artículo se presenta un snubber activo de voltaje y un snubber pasivo de corriente para el CRED que permitirá disminuir las pérdidas en el interruptor al modificar el encendido y el apagado del mismo. Es importante recalcar que, a pesar de que se mejora el rendimiento del interruptor al reducir las pérdidas por conmutación, el precio por pagar es que se agregan más elementos al sistema.

La red snubber propuesta, al igual que el CRED son explicados en detalle en la sección 2, mientras que en la sección 3 se presentan resultados de simulación, en la sección 4 resultados experimentales son mostrados y finalmente es redactada una conclusión.

2. Métodos

Convertidor Reductor Elevador Doble

En la figura 1 se muestra el convertidor CRED, conectado a la línea eléctrica, que se compone de dos etapas Reductor-Elevadoras integradas compartiendo el interruptor principal.

La primera etapa consiste de un rectificador de onda completa y un convertidor Reductor-Elevador flotado. Esta primera parte reducirá el rizo de voltaje para la alimentación del segundo subcircuito mientras asegura un factor de potencia elevado debido al inductor que opera en modo de conducción discontinua. El inductor L_1 , el capacitor C_1 y el diodo D_1 conforman la primera etapa. El segundo segmento y la salida de la topología está conformada por el inductor L_2 , el capacitor C_2 y el diodo D_3 . El interruptor S_1 y el diodo D_2 sirven como eslabones para la unión de ambos subcircuitos.

El convertidor consta de tres modos de operación. Los subcircuitos se muestran en la figura 2 mientras que las formas de onda esperadas se observan en la figura 3. Al encender el interruptor S_1 en t_0 se genera el primer modo de operación. El inductor L_1 se carga con el voltaje rectificado de entrada mientras que el capacitor

C_1 descarga la energía almacenada en L_2 y el capacitor C_2 entrega voltaje a la carga. El segundo modo de operación entra en funcionamiento cuando S_1 se apaga en t_2 . En ese instante, el diodo D_1 se polariza directamente permitiendo que el inductor L_1 se descargue sobre el capacitor C_1 y el inductor L_2 se descarga igualmente sobre el capacitor C_2 con la polarización directa del diodo D_3 y el apagado del diodo D_2 . El tiempo D_2T es el tiempo de descarga del inductor L_1 .

El circuito entra en el tercer modo de operación cuando el inductor L_1 se descarga completamente en t_2 , terminando en t_3 . El diodo D_3 se polariza directamente y el voltaje sobre el interruptor S_1 es la suma de los voltajes en C_1 y C_2 .

Las ecuaciones de diseño se pueden encontrar en [Alonso, et. al., 2012].

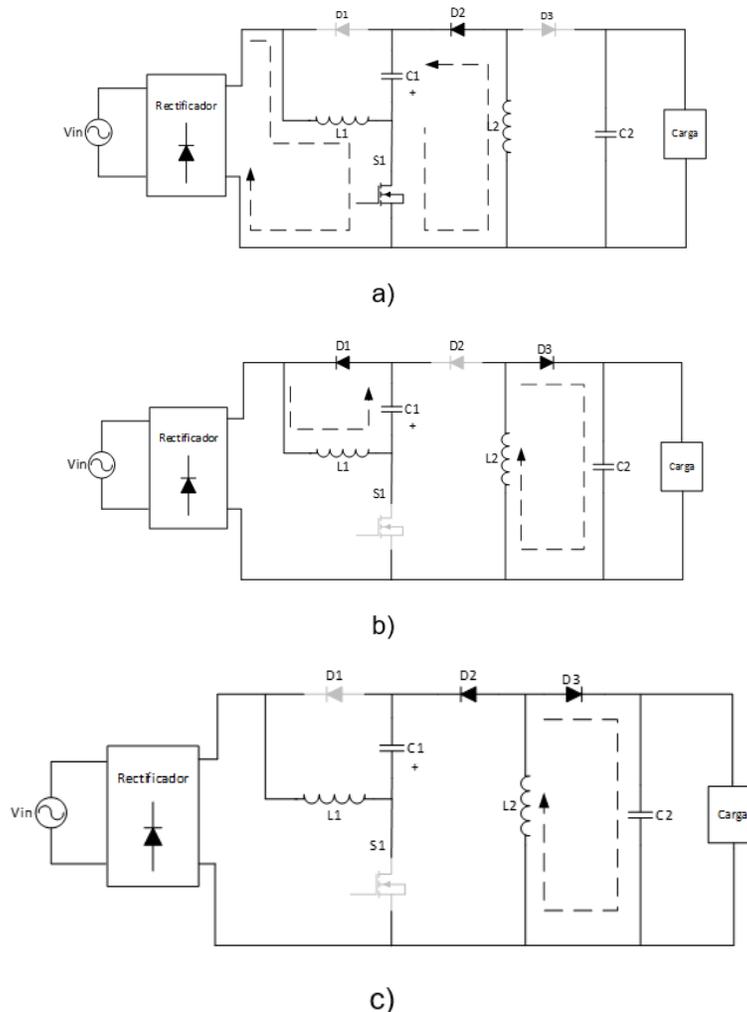


Figura 2 Modos de operación.

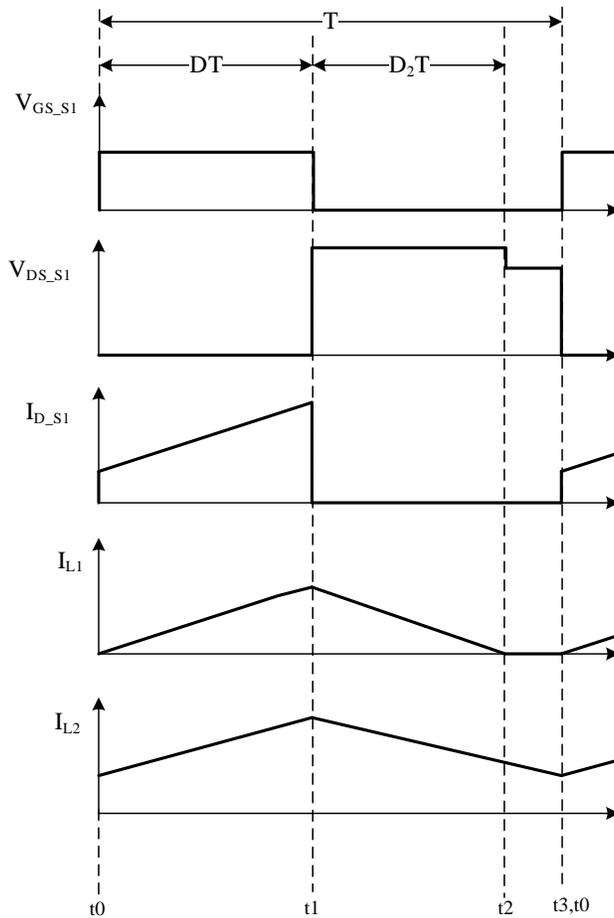


Figura 3 Formas de onda de convertidor.

Con el objetivo de aliviar las pérdidas por conmutación en el interruptor S_1 , se presenta el diseño de redes snubber pasiva y activa, que se muestra en figura 4 y las formas de onda esperadas, que se pueden apreciar en la figura 5.

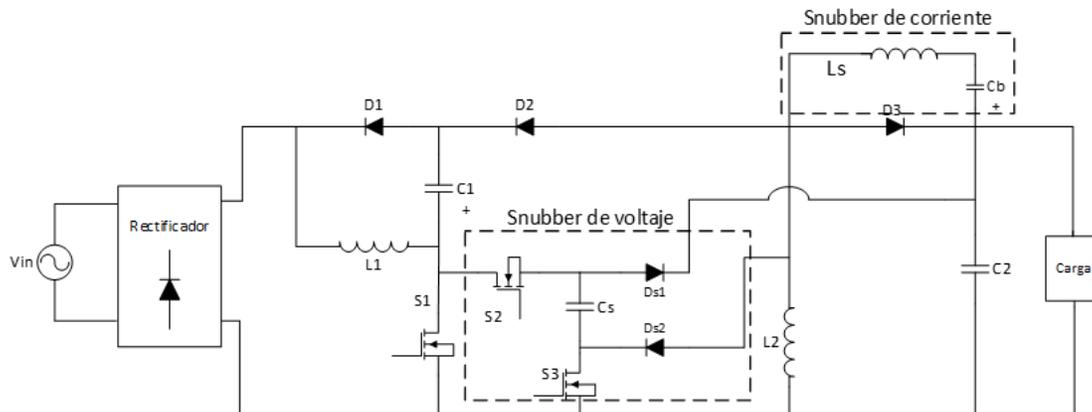


Figura 4 Convertidor Reductor Elevador Doble con redes snubber.

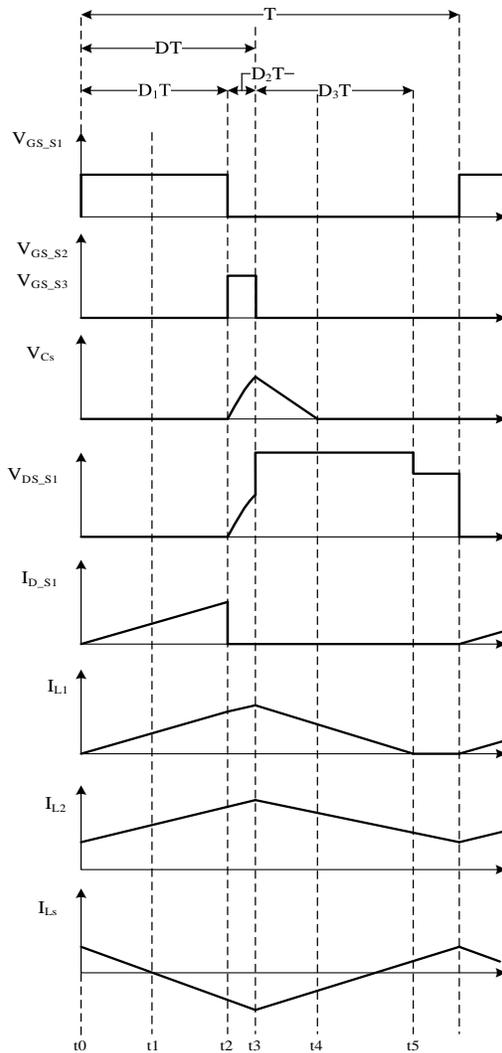


Figura 5 Formas de onda esperadas del convertidor con redes snubber.

Convertidor Reductor-Elevador Doble con snubbers

El snubber activo de voltaje está compuesto de dos interruptores auxiliares, S_2 y S_3 , dos diodos, D_{s1} y D_{s2} , y el capacitor C_s .

El circuito de snubber de voltaje comienza a funcionar en el momento en que S_1 se apaga. En ese instante los interruptores S_2 y S_3 se encienden permitiendo un flujo de corriente a través del capacitor C_s , como se muestra en la figura 6b. El voltaje en el capacitor C_s se incrementa con respecto a las corrientes en L_1 , L_2 , L_s y el ciclo de trabajo D_2 , ecuación 1.

$$C_s = \frac{(i_{L1} + i_{L2} - i_{Ls})D_2T}{\Delta V_{C_s}} \quad (1)$$

Donde ΔV_{Cs} es el voltaje máximo al que se cargará dicho capacitor y D_2T es el tiempo en el que los interruptores S_2 y S_3 permanecen encendidos.

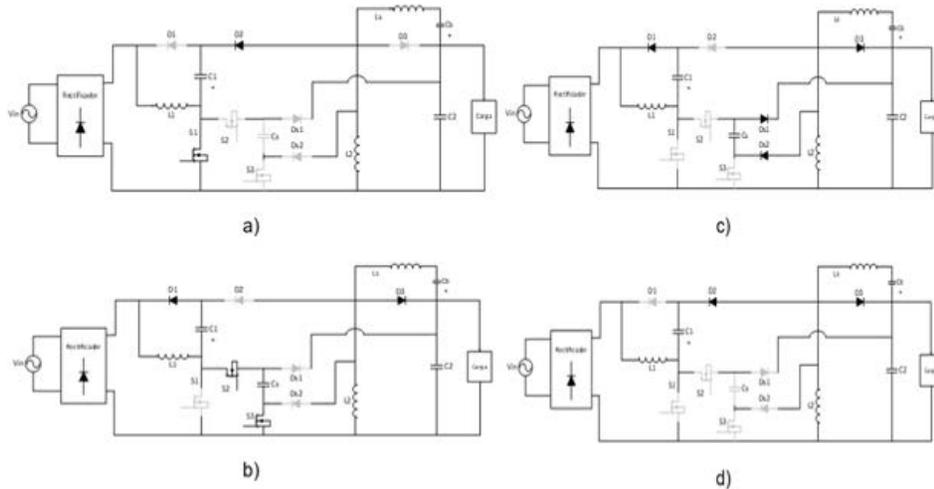


Figura 6 Modos de operación del circuito con snubbers.

Definiendo el valor de la capacitancia de C_s , se encuentra el tiempo necesario de encendido para los interruptores S_2 y S_3 como se muestra en ecuación 2.

$$D_2 = \frac{C_s \Delta V_{Cs}}{(i_{L1} + i_{L2} - i_{Ls})T} \quad (2)$$

El capacitor C_s se cargará al valor del voltaje de salida V_{C2} debido a la activación de D_{s1} a menos que los interruptores sean apagados antes de alcanzar este voltaje debido al cambio en baja frecuencia de la corriente en el inductor L_1 . Los interruptores auxiliares deben sincronizar su activación con el interruptor principal. Cuando el interruptor S_1 es apagado los interruptores auxiliares S_2 y S_3 son encendidos y el inductor L_1 permanece en el estado de carga. Para el ciclo de trabajo actual del interruptor se deben considerar ambas señales de control, del interruptor principal y de los interruptores auxiliares, ecuación 3.

$$D = D_1 + D_2 \quad (3)$$

Una vez apagados los tres interruptores el diodo D_3 se enciende y la corriente del inductor L_2 fluye a través de los diodos D_{s1} y D_{s2} descargando el capacitor C_s figura 6c.

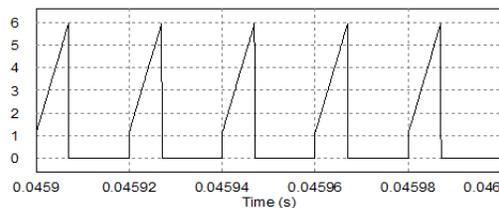
El snubber de corriente se utiliza de manera que se anule la corriente del inductor L_2 , que opera en MCC, sobre el interruptor S_1 . El circuito, conformado por L_s y C_b , permite la carga del inductor L_2 mientras el inductor L_s se descarga, figura 6a, figura 6d. Debido a que los voltajes promedios de C_b y C_2 son iguales, el inductor L_s se ve afectado únicamente por el voltaje de capacitor C_1 , ecuación 4.

$$L_s = \frac{V_{C1}DT}{\Delta I_{L_s}} \quad (4)$$

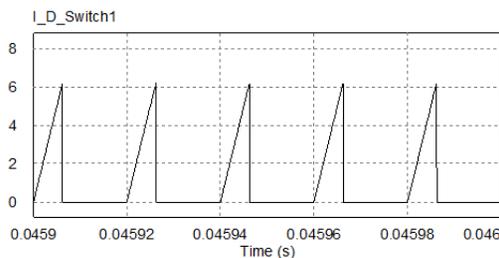
En el tiempo t_1 el flujo de corriente carga al inductor L_s nuevamente pero con una corriente que fluye en sentido contrario.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de simulación en PSim. Cabe mencionar que la acción de las resistencias en serie equivalentes de los elementos inductivos y capacitivos tienen un efecto despreciable en la simulación. En la figura 7 se muestra la corriente a través del interruptor S_1 . En a) se observa la corriente en el modo conmutación dura que es el resultado de la suma de las corrientes de los inductores L_1 y L_2 , mientras que en b) se presenta la técnica de conmutación suave en la que se minimiza el efecto de la corriente proveniente del inductor L_2 .



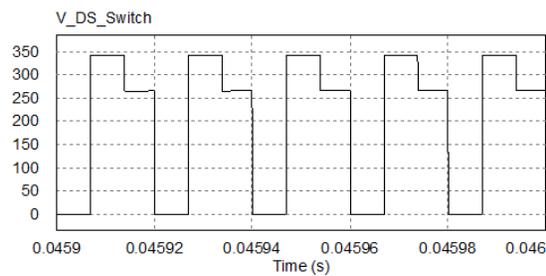
a) Conmutación dura



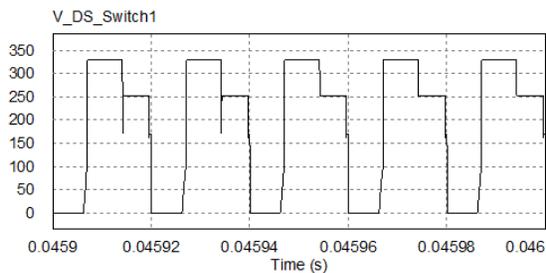
b) Conmutación suave

Figura 7 Corriente en Drain de interruptor S_1 .

La figura 8 muestra el voltaje Drain-Source del interruptor S_1 . En figura 8a, se observa el voltaje en conmutación dura, cuando el voltaje inicia en un valor elevado, por su parte, la figura 8b despliega el voltaje en conmutación suave en donde éste tiene una pendiente menos pronunciada debido a la carga del capacitor C_s y el hecho de que el mismo capacitor se encuentra en paralelo con el interruptor S_1 .



a)



b)

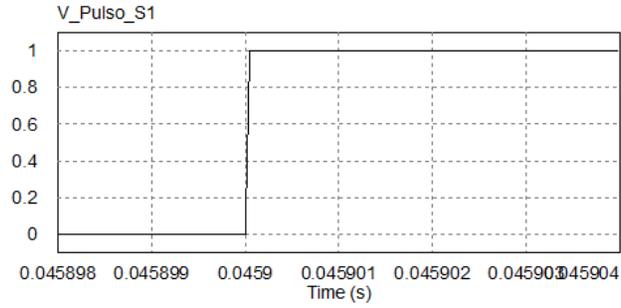
Figura 8 Voltaje Drain-Source de interruptor S_1 .

En la figura 9 se muestra un acercamiento en la señal de activación del interruptor S_1 en su flanco positivo en a) y en b) el voltaje y la corriente en el encendido del mismo interruptor. En la figura 10 se puede apreciar la señal de activación del interruptor S_1 en su flanco descendente en a) y en b) el voltaje y la corriente en el apagado de dicho interruptor.

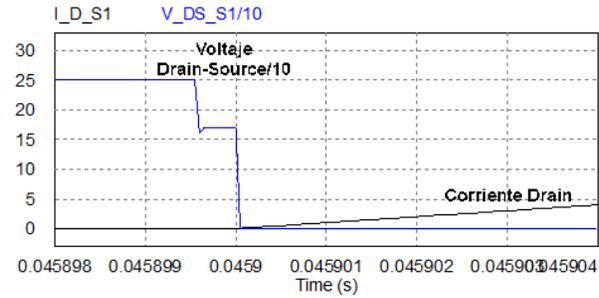
En la figura 11 se observan las formas de la corriente en los inductores L_2 y L_s en la topología con la red snubber.

La figura 12 muestra el voltaje del capacitor C_s mientras que en la figura 13 se observan las señales de activación de los interruptores S_1 , S_2 y S_3 .

En la tabla 1 se aprecian los valores utilizados para la simulación del convertidor.

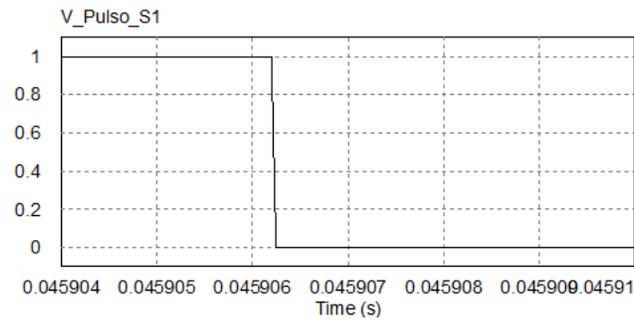


a)

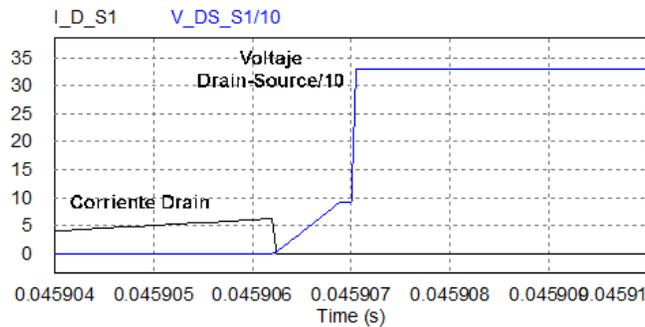


b)

Figura 9 Flanco ascendente de señal de activación interruptor S_1 y voltaje drain-source.

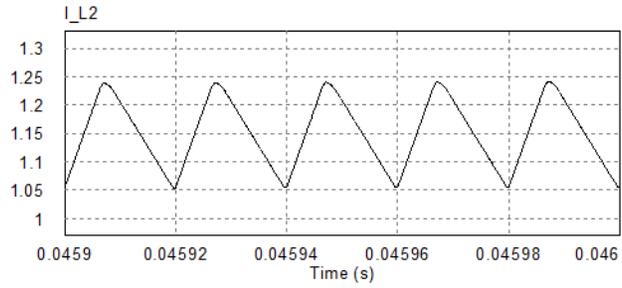


a)

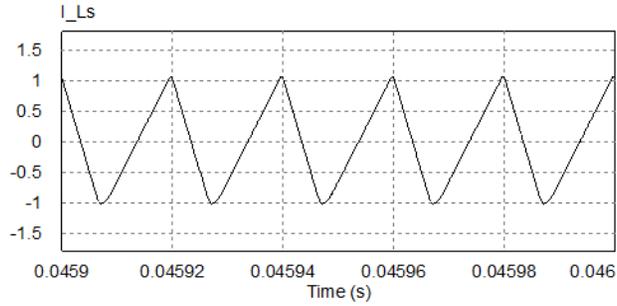


b)

Figura 10 Flanco descendente de señal de activación interruptor S_1 y voltaje drain-source.



a)



b)

Figura 11 Corrientes de los inductores.

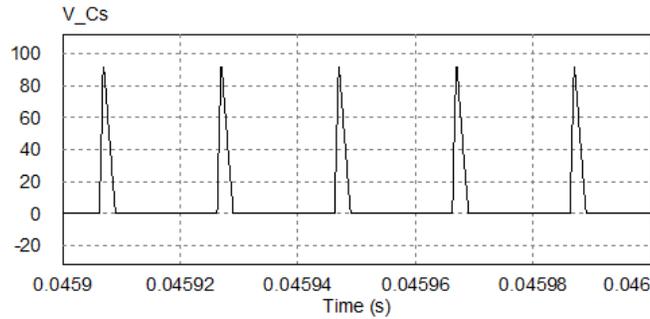


Figura 12 Carga y descarga del capacitor C_s .

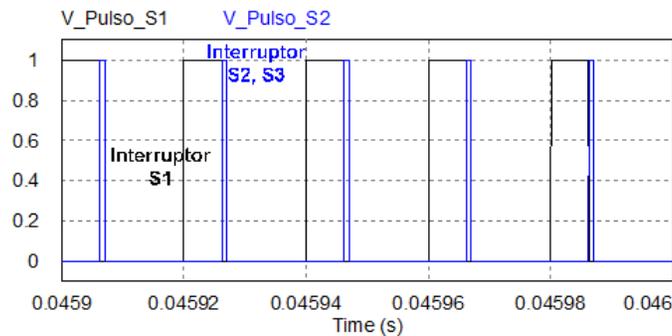


Figura 13 Señales de activación del interruptor.

Tabla 1 Valores de los elementos utilizados en la simulación del convertidor.

Elementos	Valor	Unidades
L1	256	μ H
L2	5.6	mH
Ls	500	μ H
C1	100	μ F
C2	10	μ F
Cs	47	nF
Cb	10	μ F
Carga	122	Ω
Vin	120, 60	Vrms, Hz
F_interrupt	50	kHz

4. Discusión

La presente técnica de reducción de esfuerzos permite disminuir las pérdidas por conmutación en el CRED debido a la modificación de las señales de voltaje y corriente, permitiendo alcanzar la conmutación con corriente cero y voltaje cero.

5. Conclusiones

Los convertidores de potencia con aplicaciones para iluminación LED deben satisfacer ciertas necesidades como un factor de potencia elevado o un rizo de corriente pequeño en la salida. El convertidor que aquí se presenta cumple ambas características antes mencionadas, con la limitación de la concentración de esfuerzos debido a su naturaleza como topología integrada. La solución propuesta es la implementación de una red snubber sin pérdidas que permita la conmutación suave del interruptor y, con esto, disminuir las pérdidas por conmutación sin afectar el rendimiento del convertidor.

Los resultados de simulación corroboran el funcionamiento del circuito al modificar las señales de conmutación dura a conmutación suave. Ésta también muestra que al agregar elementos como las resistencias en serie equivalentes de los componentes utilizados no se modifica la operación de la topología.

Es importante recalcar que la conmutación suave permite mejorar el rendimiento de la topología al disminuir las pérdidas por conmutación. Sin embargo, al agregar más elementos se espera una disminución en la eficiencia y un incremento en el costo de un prototipo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] C. Gobatto, S. V. Kohler, I. H. de Souza, G. W. Denardin, J. de Pelegrini Lopes, Integrated topology of DC converter for street lighting system based on LED modular drivers, 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Curitiba, pp. 1-6, 2016.
- [2] Ching-Jung Tseng, Chern-Lin Chen. A passive lossless snubber cell for nonisolated PWM DC/DC converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 4, pp. 593-601, 1998.
- [3] Enhui Chu, Weiyu Hu, Jinxing Gong, Rui Hou, Mutsuo Nakaoka, A novel high frequency ZVS-PWM boost DC-DC converter with auxiliary resonant snubber, 2010 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), Chengdu, pp. 576-580, 2010.
- [4] H. C. Kim, M. C. Choi, S. Kim, D. K. Jeong., An AC–DC LED Driver With a Two-Parallel Inverted Buck Topology for Reducing the Light Flicker in Lighting Applications to Low-Risk Levels, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3879-3891, 2017.
- [5] H. J. Choe, Y. C. Chung, C. H. Sung, J. J. Yun, B. Kang, Passive Snubber for Reducing Switching-Power Losses of an IGBT in a DC–DC Boost Converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6332-6341, 2014.
- [6] J. M. Alonso, J. Vina, D. G., Vaquero, G. Martinez, R. Osorio. Analysis and Design of the Integrated Double Buck–Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 4, pp. 1689-1697, 2012.
- [7] J. Marshall, M. Kazerani, A Novel Lossless Snubber for Boost Converters, 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Que., pp. 1030-1035, 2006.
- [8] Kaiwei Yao, F. C. Lee, Yu Meng, Jia Wei, Tapped-inductor buck converters with a lossless clamp circuit, APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335), Dallas, TX, pp. 693-698, 2002.

- [9] K. Fujiwara, H. Nomura, A novel lossless passive snubber for soft-switching boost-type converters, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 6, Noviembre 1999, pp. 1065-1069.
- [10] K. Zhou, J. G. Zhang, S. Yuvarajan, D. F. Weng. Quasi-Active Power Factor Correction Circuit for HB LED Driver. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1410-1415, 2008.
- [11] M. Mohammadi, E. Adib, M. R. Yazdani, Family of Soft-Switching Single-Switch PWM Converters With Lossless Passive Snubber, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3473-3481, 2015.
- [12] Y. Zhao, W. Li, Y. Deng, X. He., High step-up boost converter with passive lossless clamp circuit for non-isolated high step-up applications, *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 8, pp. 851-859, 2011.
- [13] Yoshihiro Konishi, Yung-Fu Huang, Soft-switching buck boost converter using passive snubber composed of pulse current regenerative resonant circuit, *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, Roma, pp. 886-890, 2007.
- [14] Zhang Bo, Yang Xu, Xu Ming, Chen Qiaoliang, Wang Zhaoan. Design of Boost-Flyback Single-Stage PFC converter for LED power supply without electrolytic capacitor for energy-storage. 2009 *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Wuhan, pp. 1668-1671, 2009.