

COMPARACIÓN DE DOS CONVERTIDORES CD/CD TIPO BUCK CUADRÁTICO PARA UNA APLICACIÓN CON LEDS DE POTENCIA

COMPARISON OF TWO QUADRATIC BUCK DC/DC CONVERTERS FOR A POWER LED APPLICATION

Marco Antonio Ceballos Juárez

Universidad Tecnológica de la Mixteca, México
cejm011118@gs.utm.mx

Marco Antonio Contreras Ordaz

Universidad Tecnológica de la Mixteca, México
marco.contreras@mixteco.utm.mx

Richard Jacinto Márquez Contreras

ECON Tech, México
richard.marquez@econ-tech.com

Recepción: 9/diciembre/2025

Aceptación: 31/marzo/2026

Resumen

Este artículo presenta el diseño y la simulación de dos convertidores buck cuadráticos empleados como drivers para LEDs de potencia, los cuales se comparan en términos de eficiencia energética. Los modelos matemáticos de ambos convertidores se desarrollaron mediante la teoría de grafos, obteniendo sus ecuaciones en modo de conducción continuo. Posteriormente, se implementó un control por modos deslizantes, optimizando sus parámetros mediante algoritmos genéticos. Las simulaciones se realizaron en PSIM, considerando los efectos parásitos de los componentes activos y pasivos. Se obtuvieron eficiencias cercanas al 90% para cada uno de los convertidores, lo cual demuestra su viabilidad en aplicaciones de iluminación LED. La principal contribución de este trabajo radica en la comparación y el análisis de diferentes topologías de convertidores de potencia aplicados a sistemas de iluminación, lo que permite identificar ventajas, limitaciones y alcances en términos de eficiencia energética y factibilidad de implementación.

Palabras Clave: Control SMC, convertidor buck cuadrático, teoría de grafos.

Abstract

This article presents the design and simulation of two quadratic buck converters employed as drivers for high-power LEDs, which are compared in terms of energy efficiency. The mathematical models of both converters were developed using graph theory, obtaining their equations in continuous conduction mode. Subsequently, a sliding mode control was implemented, and its parameters were optimized through genetic algorithms. The simulations were carried out in PSIM, considering the parasitic effects of both active and passive components. Efficiencies close to 90% were obtained for each of the converters, demonstrating their feasibility in LED lighting applications. The main contribution of this work lies in the comparison and analysis of different power converter topologies applied to lighting systems, which makes it possible to identify advantages, limitations, and scope in terms of energy efficiency and implementation feasibility.

Keywords: *Graph theory, quadratic buck converter, sliding mode control (SMC).*

1. Introducción

En el panorama actual de rápido avance tecnológico y creciente conciencia ambiental, la eficiencia energética y la sostenibilidad son factores determinantes en el desarrollo de sistemas de iluminación más eficientes. En México, la iluminación representa una parte importante del consumo energético doméstico [Gobierno de México, 2024], de acuerdo con la Conuee [FIDE, 2018] la iluminación representa cerca del 40% del uso eléctrico, mientras que a nivel mundial casi el 20% de la electricidad se destina a este fin [Franz, 2017].

La iluminación LED (*Light Emitting Diodes*) constituye una alternativa altamente eficiente frente a las lámparas incandescentes tradicionales, ya que convierte la electricidad directamente en luz visible, reduciendo significativamente el desperdicio energético en forma de calor [Haldeman, 2008; Ribeiro, 2012]. Una lámpara LED consume aproximadamente un 82% menos energía que una incandescente, lo que representa un ahorro económico y ambiental notable [Santos, 2015; Youssef, 2020]. En cuanto a la electrónica de potencia para LEDs, los convertidores buck convencionales permiten regular la corriente, pero muestran limitaciones en

aplicaciones de alta potencia y baja tensión de entrada. Alternativamente, los convertidores buck-boost proporcionan flexibilidad en el voltaje de salida [Youssef, 2020], y los convertidores conmutados por capacitores (*switched-capacitor*) han alcanzado eficiencias de hasta 92% en un amplio rango de tensiones de entrada, posicionándose como una opción prometedora para superar las restricciones de los buck convencionales [Ng, 2012].

Antecedentes

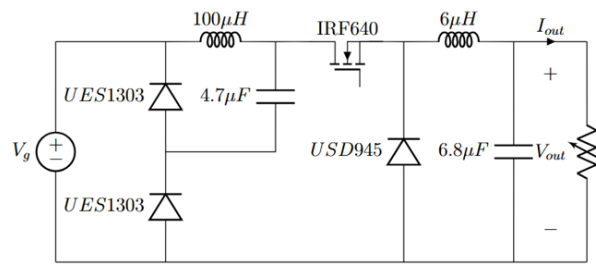
La evolución de los convertidores CD/CD refleja un desarrollo continuo orientado a mejorar la eficiencia energética y la adaptación a nuevas aplicaciones tecnológicas. En las últimas siete décadas se han desarrollado más de 800 prototipos, y su clasificación sistemática ha facilitado su estudio y aplicación, consolidando su relevancia en la electrónica de potencia y su impacto en la industria moderna [Luo, 2016]. Históricamente, los primeros convertidores de potencia incluían rectificadores de arco de mercurio, que permitieron convertir corriente alterna en continua y fueron clave en la electrificación inicial y la transmisión de energía a larga distancia [Alexanderson, 1944]. Posteriormente, los choppers tipo A y B dieron lugar a los convertidores buck, boost y buck-boost, que permitieron regular eficientemente voltaje y corriente. Durante las décadas de 1980 y 1990, la creciente demanda de convertidores CD/CD impulsó la creación de configuraciones avanzadas como Cúk, SEPIC y Luo, con mayor eficiencia y flexibilidad para aplicaciones de alta densidad de potencia [Luo, 2016].

En particular, los convertidores CD/CD de tipo cuadrático, introducidos en los años 90, destacaron por ampliar el rango de conversión de voltaje; en 1991, Maksimovic propuso la familia de “convertidores de amplio rango de conversión” con relación cuadrática, permitiendo un manejo más versátil de voltajes de entrada y salida [Maksimovic, 1991]. Uno de estos convertidores se muestra en la Figura 1.

Estado del arte

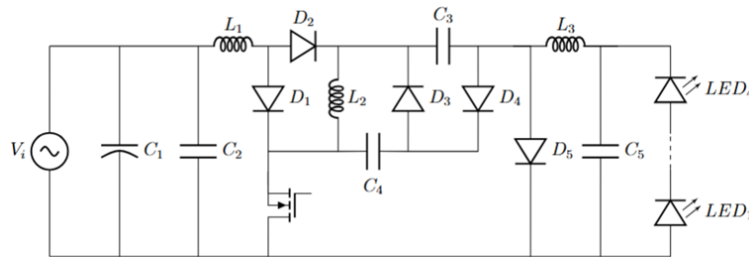
La historia de los convertidores cuadráticos comienza con convertidores PWM de un solo transistor, cuya relación de conversión de voltaje es cuadrática respecto al

ciclo de trabajo, diseñados para superar las limitaciones de las topologías convencionales [Maksimovic, 1991]. La síntesis sistemática permitió derivar convertidores de cuarto orden con una sola conmutación activa, con rango de conversión superior al de topologías básicas como buck, boost y buck-boost, adecuados para alta frecuencia y drivers de lámparas LED. En Lodo [2013], se propuso un convertidor buck-boost cuadrático (QBB) fuera de línea con alto factor de potencia, diseñado para alimentar LEDs de potencia, empleando un solo interruptor y dos inductores, lo que permite reducir las capacitancias de filtrado y aumentar el tiempo medio entre fallas (MTBF) del sistema (Figura 2).



Fuente: [Maksimovic, 1991].

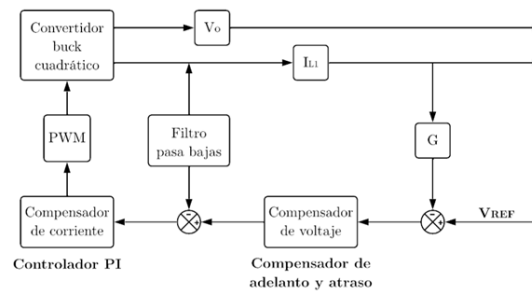
Figura 1 Convertidor cuadrático experimental propuesto por Maksimovic.



Fuente: [Lodo, 2013].

Figura 2 Convertidor buck-boost cuadrático propuesto por Lodo.

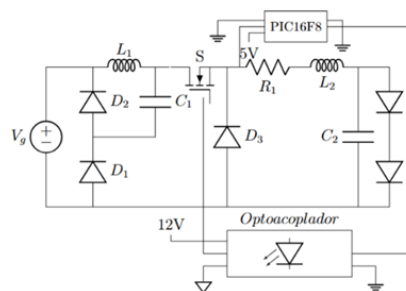
El convertidor buck cuadrático (QBC) se ha utilizado como controlador de lámparas LED [Yadlapalli, 2017], ofreciendo una relación de conversión de voltaje cuadrática con el ciclo de trabajo, lo que permite un mejor control en el voltaje de salida logrando así, reducir el parpadeo y lograr un atenuado suave. Simulaciones y pruebas experimentales muestran que el QBC alcanza eficiencias del 70 – 80% como driver de LED, siendo las pérdidas en los interruptores y el capacitor de salida las principales limitantes a altas frecuencias de conmutación, Figura 3.



Fuente: [Yadlapalli, 2017].

Figura 3 Diagrama a bloques del sistema controlador de lámparas LED.

Demian Junior propuso un convertidor buck cuadrático controlado mediante un microcontrolador PIC16F873A para mejorar la eficiencia y durabilidad de los drivers de lámparas LED [Demian, 2007]. La topología utilizada mantiene una corriente constante a través de los LEDs, y los resultados experimentales mostraron una regulación eficiente de la corriente de salida y una alta eficiencia luminosa, de aproximadamente 272.2 lm/W . Estos hallazgos indican que los convertidores buck cuadráticos constituyen una alternativa eficiente y duradera frente a soluciones de iluminación convencionales, Figura 4.

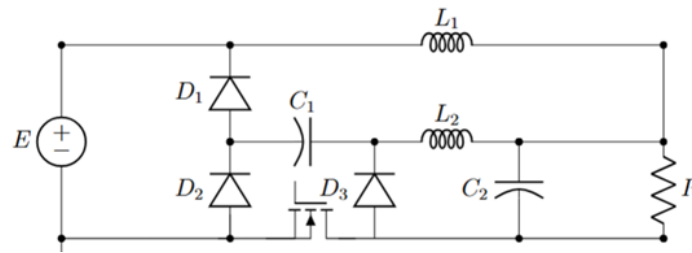


Fuente: [Demian, 2007].

Figura 4 Convertidor buck cuadrático propuesto por Demian.

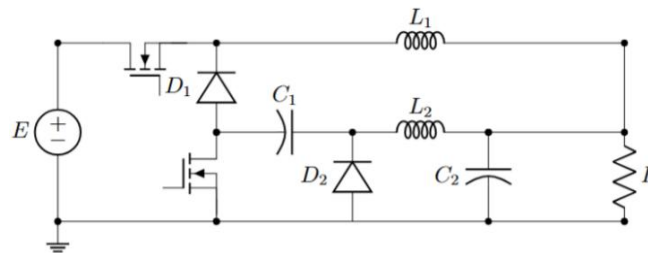
Esta investigación se centra en optimizar el rendimiento de sistemas de iluminación LED de potencia mediante la comparación de convertidores de energía eficientes y confiables. Se analizaron dos topologías de convertidores buck cuadráticos como drivers de LEDs, utilizando control por modos deslizantes para mejorar la eficiencia, la respuesta dinámica y la regulación de corriente. El primer convertidor fue desarrollado por los investigadores Marco Antonio Contreras Ordaz y Richard Jacinto Márquez Contreras en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (Figura 5).

Para la comparación, se seleccionó un convertidor buck propuesto en el artículo de Panigrahi [2021]. Este convertidor forma parte de una familia de convertidores reductores con respuesta cuadrática y, según los autores del artículo, presenta las mejores características entre sus pares (Figura 6). Como nota adicional, para simplificar la referencia a los convertidores, se denominará convertidor 1 al diseño mostrado en la Figura 5 y convertidor 2 al presentado en la Figura 6.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Convertidor buck cuadrático propuesto.



Fuente: [Panigrahi, 2021].

Figura 6 Convertidor buck cuadrático de Panigrahi.

2. Métodos

A continuación, se describe el proceso mediante el cual se obtuvieron los modelos de los convertidores, así como las ecuaciones de equilibrio y las ecuaciones para garantizar el modo de conducción continua. Asimismo, se presenta el diseño de ambos convertidores y de la técnica de control empleada.

Modelo matemático de los convertidores

A partir de los diagramas de las topologías propuestas, se optó por emplear el método de grafos para la obtención del modelo del convertidor. Este enfoque consiste en representar los circuitos como grafos y posteriormente, realizar

operaciones matriciales a partir de la información obtenida. Se analizan dos condiciones de operación: cuando los dispositivos de conmutación permanecen encendidos ($u = 1$) y cuando están apagados ($u = 0$), Figuras 7 y 8.

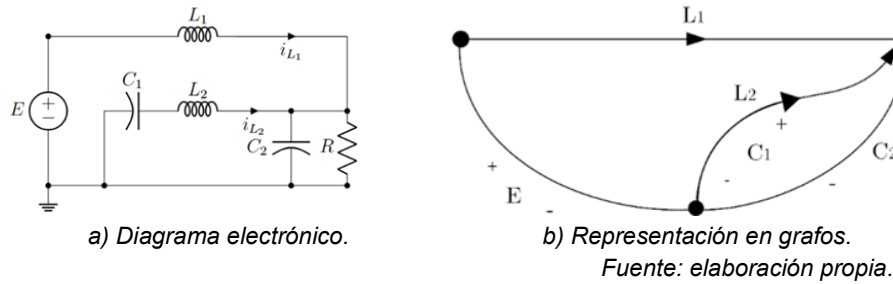


Figura 7 Convertidor 1 en estado de encendido ($u = 1$).

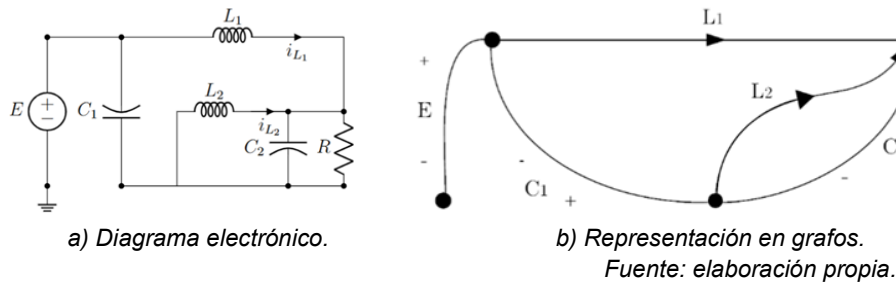


Figura 8 Convertidor 1 en estado de encendido ($u = 0$).

A partir de la representación matricial de estos grafos y las operaciones correspondientes, se obtiene el modelo matemático del convertidor 1, el cual se muestra en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}
 & [L_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ C_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ L_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ C_2] [i_{L_1} \ v_{C_1} \ i_{L_2} \ v_{C_2}] \\
 & = \left[Eu + v_{C_1}(u - 1) - v_{C_2} i_{L_1}(1 - u) - i_{L_2} u v_{C_1} u - v_{C_2} i_{L_1} + i_{L_2} - \frac{v_{C_2}}{R} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

Ecuaciones de equilibrio

Con el modelo obtenido, es posible derivar las ecuaciones de equilibrio, que describen el comportamiento de los estados del sistema cuando ha alcanzado un estado estable, las cuáles se muestran en las Ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$v_{C_1} = DE \quad (2)$$

$$v_{C_2} = D^2 E \quad (3)$$

$$i_{L_1} = \frac{D^3 E}{R} \quad (4)$$

$$i_{L_2} = \frac{D^2 E(1 - D)}{R} \quad (5)$$

La expresión presentada en la Ecuación 3 es especialmente relevante, ya que representa el voltaje de salida del sistema. Dicha expresión puede reescribirse como en la Ecuación 6 y se relaciona directamente con la función de transferencia del convertidor (Ecuación 7). Estas expresiones reflejan claramente el comportamiento cuadrático característico de este tipo de convertidores.

$$V_o = V_{C_2} = D^2 E \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{C_2}}{E} = D^2 \quad (7)$$

Ecuaciones para el modo de conducción continuo

Otro aspecto importante es la obtención de las condiciones que aseguren el modo de conducción continua, es decir, que la corriente en los inductores nunca caiga a cero. Estas condiciones se derivan del modelo matemático y de las ecuaciones de equilibrio presentadas previamente, y se expresan en las Ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

$$L_1 > \frac{(1 - D^2)R}{2D^2 f} \quad (8)$$

$$L_2 > \frac{R}{2f} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{D^3 E(1 - D)}{fR\Delta v_{C_1}} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{\Delta i_{L_1} + \Delta i_{L_2}}{8f\Delta v_{C_2}} \quad (11)$$

Es importante destacar que ambos convertidores comparten el mismo modelo matemático, las mismas ecuaciones de equilibrio y las mismas condiciones para el modo de conducción continua. Esto se debe a que, aunque los circuitos presentan ligeras diferencias, su representación mediante grafos es equivalente. Por lo tanto, al realizar las operaciones correspondientes, los modelos resultan idénticos.

Especificaciones de diseño del sistema

El sistema propuesto considera como voltaje de entrada los 180 V obtenidos tras rectificar la red monofásica. El voltaje de salida requerido es de 14 V, destinado a alimentar un arreglo de 4 LEDs LZ4-00WW00 conectados en paralelo, los cuáles se modelan como una resistencia equivalente de 5Ω . Se seleccionó una frecuencia de conmutación de 50 kHz, buscando un balance entre el tamaño y costo de los componentes y el nivel de ruido en las señales. Para garantizar una comparación justa entre ambos convertidores, se usaron mismos valores de componentes y condiciones de operación. Las especificaciones de diseño se resumen en Tabla 1.

Tabla 1 Especificaciones de diseño del sistema.

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada (E)	180 V
Voltaje de salida (V_o)	14 V
Resistencia equivalente (R)	5Ω
Rizo máximo en v_{C2} (Δv_{C2})	1 %
Frecuencia (f)	50 kHz

Fuente: elaboración propia.

Diseño de los convertidores

Con ayuda de las ecuaciones de equilibrio obtenidas, así como de las correspondientes al modo de conducción continua, se realizaron las operaciones correspondientes para obtener los valores de los componentes a utilizar, con el objetivo de satisfacer los requerimientos mostrados en la Tabla 1. De esta manera, los valores resultantes para los componentes de los circuitos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Especificaciones de diseño del sistema.

Componente	Valor calculado	Valor propuesto
L_1	592.8 μH	1 mH
L_2	50.0 μH	220 μH
C_1	22.43 μF	33 μF
C_2	32.92 μF	47 μF

Fuente: elaboración propia.

Es necesario mencionar que, debido a que se obtuvieron valores no comerciales, se decidió optar por un valor comercial superior para cada componente, con el fin

de garantizar el modo de conducción continua. Los valores de la Tabla 2 son los utilizados para ambos convertidores, dado que comparten modelos y ecuaciones. Además, utilizar los mismos valores de componentes permite que la comparación entre ambos convertidores sea más justa.

Diseño del control

Para esta aplicación, se seleccionó una variante del control por modos deslizantes en la que se emplea una ley de llegada de tipo exponencial. En Fallaha [2010] se presenta dicha ley de llegada, así como la superficie de deslizamiento definida en la Ecuación 12.

La Ecuación 13 describe la ley de llegada utilizada en este trabajo, cuya principal ventaja es una convergencia más rápida desde la fase de alcance hasta la fase de deslizamiento, debido a su comportamiento exponencial; $N(S)$ se define en la Ecuación 14, mientras que la función signo se presenta en la Ecuación 15, para la implementación práctica se emplea una aproximación de alta frecuencia (Ecuación 16).

$$S = \lambda \int e dt \quad (12)$$

$$\dot{S} = -\frac{k}{N(S)} \cdot \text{sign}(S), \quad k > 0 \quad (13)$$

$$N(S) = \delta_0 + (1 - \delta_0) \cdot e^{-\alpha|S|^p}, \quad \delta_0, \alpha, p > 0 \quad (14)$$

$$\text{sign}(S) = \{1 \text{ si } S > 0 \quad 0 \text{ si } S = 0 \quad -1 \text{ si } S < 0 \quad (15)$$

$$u = -\frac{k * \text{sign}(S)}{\delta + (1 - \delta) * e^{(-\alpha|S|)^p}} \quad (16)$$

La selección de los parámetros para este convertidor se realizó mediante el uso de algoritmos genéticos, utilizando la función de MATLAB diseñada para este fin. Se llevaron a cabo pruebas con una función de optimización, cuyo objetivo era minimizar el error del sistema al aplicar el control.

Finalmente, con la ayuda de los algoritmos genéticos, utilizando 100 individuos y 200 generaciones como principales parámetros, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 3, los cuales son óptimos para ese número de individuos y generaciones.

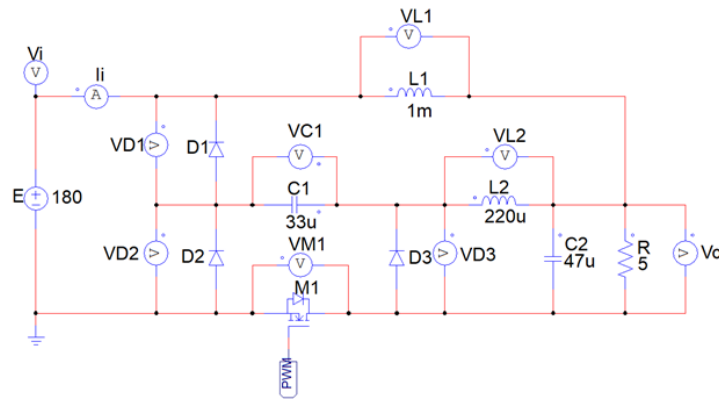
Tabla 3 Valores de los parámetros para el control.

Parámetro	Valor
k	-0.010938
p	1.3897
δ	0.0009
λ	0.87
a	-0.498

Fuente: elaboración propia.

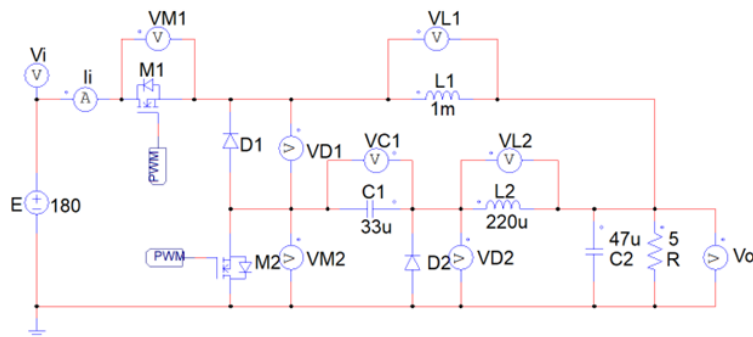
Simulaciones

Las simulaciones se realizaron en el software PSIM. En la Figura 9 se muestra el circuito utilizado para el convertidor 1, mientras que en la Figura 10 se presenta el circuito del convertidor 2. Para el caso del control, este se implementó en simulación mediante bloques. La Figura 11 muestra el circuito resultante, que es el mismo utilizado para ambos convertidores.



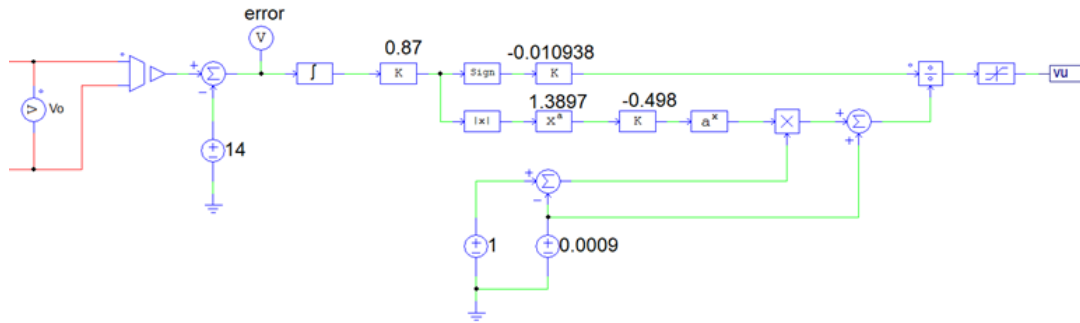
Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Simulación del convertidor 1 en PSIM.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Simulación del convertidor 2 en PSIM.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Circuito para el control por modos deslizantes.

Los parámetros empleados corresponden a los mostrados en la Tabla 3. Además, se incluyeron los valores de las resistencias parásitas de los componentes pasivos y activos del circuito, los cuales se presentan en las Tablas 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4 Valores parásitos de los componentes activos.

Componente	Modelo	Parámetro	Valor
Diodo	MUR820	Voltaje directo	0.975 V
		Resistencia directa	0.1083 Ω
Transistor	MOSFET IRF640	Resistencia de encendido	0.18 Ω
		Voltaje directo del diodo interno	2 V
		Resistencia del diodo interno	0.111 Ω

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5 Valores de las resistencias parásitas de los componentes pasivos.

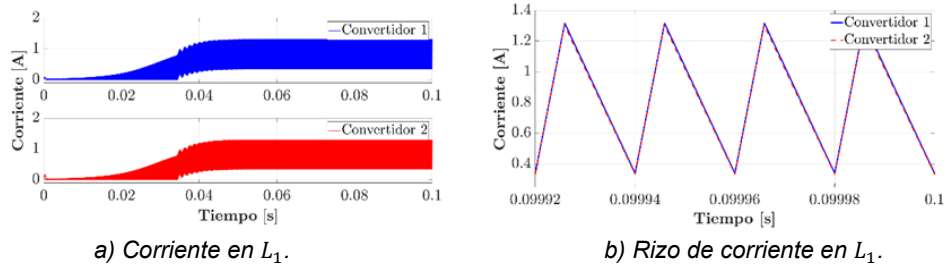
Componente	Modelo	Valor	ESR
L_1	Murata - 1410524C	1 mH	277 m Ω
L_2	Murata - 1422455C	220 μ H	62 m Ω
C_1	KEMET - A759KS336M1K	33 μ F	55 m Ω
C_2	KEMET - A759KS476M1K	47 μ F	45 m Ω

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

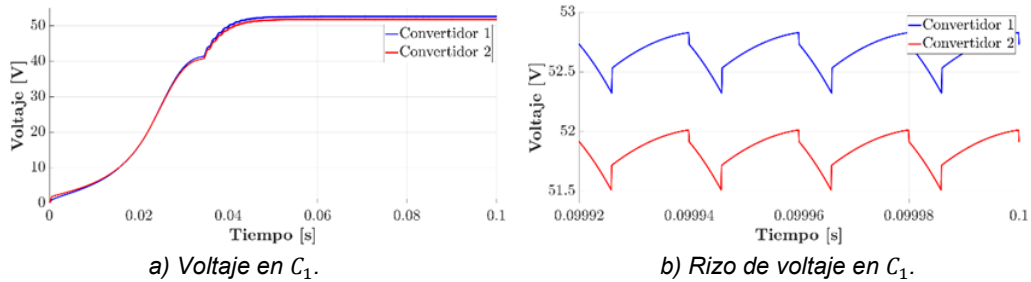
En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de los convertidores buck cuadráticos en PSIM aplicando una variante del control por modos deslizantes. Se muestran las gráficas correspondientes a los parámetros de mayor importancia para esta investigación, los cuales son los estados del sistema: los voltajes en los capacitores y las corrientes en los inductores. Las Figuras 12 y 14 muestran el comportamiento de la corriente en los inductores L_1 y L_2 ,

respectivamente, mientras que las Figuras 13 y 15 presentan el comportamiento del voltaje en los capacitores C_1 y C_2 .



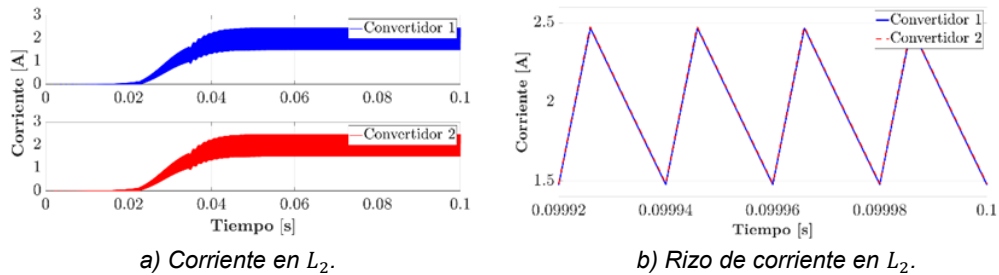
Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Forma de onda de la señal de corriente en el inductor L_1 en lazo cerrado.



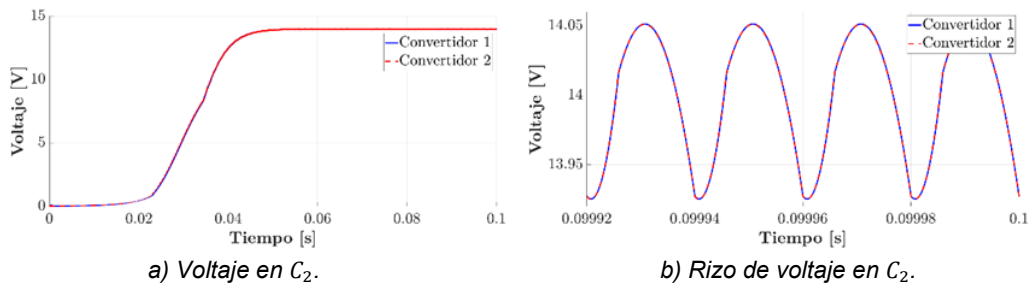
Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Forma de onda de la señal de voltaje en el capacitor C_1 en lazo cerrado.



Fuente: elaboración propia.

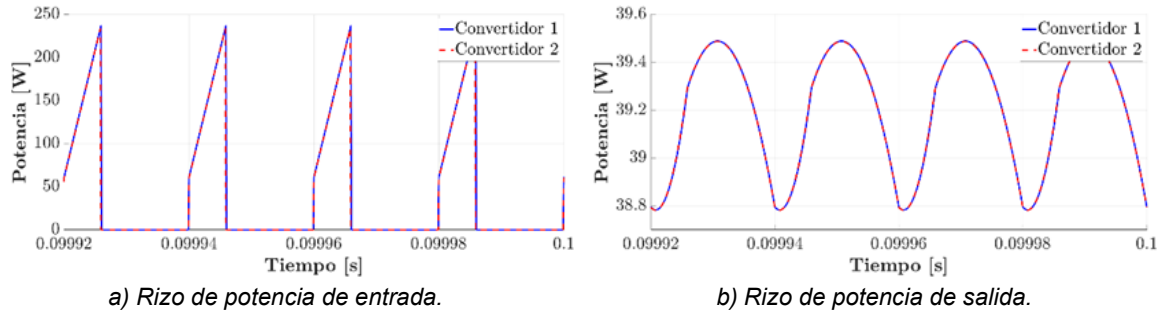
Figura 14 Forma de onda de la señal de corriente en el inductor L_2 en lazo cerrado.



Fuente: elaboración propia.

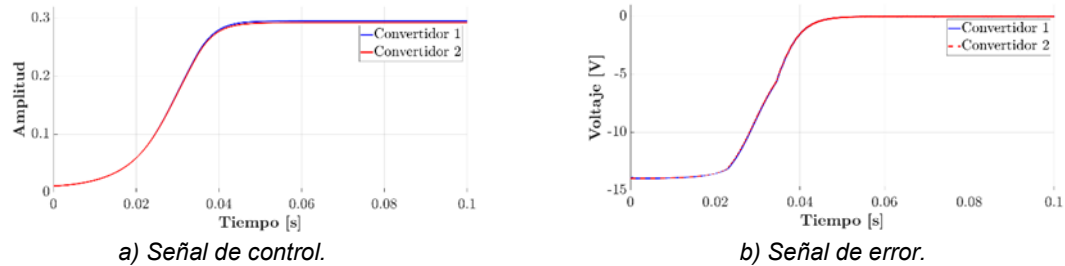
Figura 15 Forma de onda de la señal de voltaje en el capacitor C_2 en lazo cerrado.

En la Figura 16 se observan las señales de potencia tanto de entrada como de salida de ambos convertidores y en la Figura 17 se presentan las gráficas correspondientes a la señal de control del circuito y a la señal de error.



Fuente: elaboración propia.

Figura 16 Formas de onda de las señales de potencia del sistema.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17 Señales de control y de error del sistema.

Los principales parámetros obtenidos en las simulaciones en lazo cerrado se presentan en la Tabla 6, correspondiente al convertidor 1, y la Tabla 7, correspondiente al convertidor 2. Además, la Tabla 8 resume los datos más relevantes relacionados con la potencia y la eficiencia de ambos convertidores.

Tabla 6 Parámetros de desempeño del convertidor 1 en lazo cerrado.

Parámetro	Convertidor 1			
	i_{L1}	v_{C1}	i_{L2}	v_{C2}
Valor medio	0.8283 A	52.6622 V	1.9716 A	14.00 V
Valor pico	1.3154 A	52.8293 V	2.4647 A	14.0513 V
Sobretiro	58.8020%	0.3174%	25.0080%	0.3668%
Rizo	0.9751 A	0.5065 V	0.9861 A	0.1260 V
Tiempo de establecimiento	NA	45.046 ms	NA	45.90 ms
Tiempo se subida	23.22 ms	27.95 ms	8.222 ms	15.905 ms
Tiempo pico	60.506 ms	69.78 ms	71.366 ms	90.171 ms

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7 Parámetros de desempeño del convertidor 2 en lazo cerrado.

Parámetro	Convertidor 2			
	i_{L1}	v_{C1}	i_{L2}	v_{C2}
Valor medio	0.8200 A	51.8480 V	1.9799 A	14.00 V
Valor pico	1.3014 A	52.0134 V	2.4732 A	14.0511 V
Sobretiro	58.7079%	0.3189%	24.9167%	0.3653%
Rizo	0.9656 A	0.5012 V	0.9882 A	0.1259 V
Tiempo de establecimiento	NA	45.046 ms	NA	45.941 ms
Tiempo se subida	23.06 ms	28.63 ms	8.98 ms	16.06 ms
Tiempo pico	70.766 ms	70.60 ms	70.926 ms	109.291 ms

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8 Datos obtenidos para las potencias de entrada y salida.

Parámetro	Convertidor 1	Convertidor 2
Valor medio P_i (W)	44.7169 W	43.3411 W
Valor medio P_o (W)	39.2004 W	39.2004 W
Eficiencia (%)	87.6635%	90.4462%

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados de este trabajo se resumen en las Tablas 6, 7 y 8. Dichos resultados permiten confirmar que la técnica de control por modos deslizantes aplicada a los convertidores mejora de manera notable la estabilidad del sistema, al mismo tiempo que reduce de forma significativa los sobretiros tanto en el voltaje como en la corriente de salida. Asimismo, se observó que en lazo cerrado el voltaje se mantiene dentro de los valores establecidos para la carga, lo cual garantiza una operación confiable y segura. Sin embargo, es importante señalar que este beneficio viene acompañado de un ligero incremento en el tiempo de establecimiento, lo que representa un compromiso natural entre velocidad de respuesta y estabilidad global del sistema.

Los resultados obtenidos indican que ambos convertidores presentan un comportamiento muy similar, con una diferencia de eficiencia energética de aproximadamente el 3%. Durante las simulaciones en lazo cerrado, el convertidor 2 mostró una ligera ventaja; sin embargo, en un escenario de implementación práctica, se espera que el convertidor 1 sea más fácil de aplicar, ya que su circuito es más sencillo y requiere únicamente un interruptor activo. Además, el convertidor 1 ofrece un diseño más simple y menores costos de implementación, mientras que

el convertidor 2, aunque aporta una pequeña mejora en eficiencia en condiciones simuladas, implica mayor complejidad y costo.

5. Conclusiones

Los convertidores de potencia son fundamentales en aplicaciones como la iluminación, donde la eficiencia y la simplicidad del diseño son cruciales. Este estudio compara dos convertidores buck de topología cuadrática, destacando que un mayor número de componentes aumenta la complejidad y dificulta la obtención de modelos matemáticos precisos. Para agilizar este proceso, se empleó el análisis de grafos, que permite representar el convertidor en forma de grafo y derivar las matrices correspondientes para posteriormente obtener el modelo matemático. Aunque los modelos matemáticos no siempre reflejan todos los efectos prácticos, son esenciales para implementar técnicas de control que aseguren un funcionamiento estable. En esta investigación se utilizó un control por modos deslizantes, que mejora la estabilidad de la salida y la respuesta frente a perturbaciones externas.

En términos de desempeño, ambos convertidores muestran comportamientos similares en eficiencia. El convertidor 1 destaca por su simplicidad y menor número de componentes, mientras que el convertidor 2 alcanza una eficiencia ligeramente mayor. Las simulaciones permitieron comparar sus ventajas y desventajas, confirmando que ambos son viables para la aplicación en iluminación LED.

La elección del convertidor más adecuado depende del equilibrio entre eficiencia, costo y complejidad. En general, la aplicación de control robusto como el control por modos deslizantes demuestra ser eficaz para optimizar el desempeño de convertidores CD/CD en este tipo de sistemas.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Alexanderson, E. F. W., & Phillipi, E. L., (1944). History and development of the electronic power converter. *Electrical Engineering*, 63(9), pp. 654–657. IEEE.

- [2] Demian, A. E., de Britto, J. R., de Freitas, L. C., Farias, V. J., Coelho, E. A. A., & Vieira, J. B., (2007). Microcontroller-based quadratic buck converter used as LED lamp driver. In 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1–6. IEEE.
- [3] Fallaha, C. J., Saad, M., Kanaan, H. Y., & Al-Haddad, K. Sliding-mode robot control with exponential reaching law. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2), pp. 600–610, 2010.
- [4] FIDE – Fundación de la Industria Eléctrica, (2018). *Revista Eficiencia Energética*, 4(18). abril–junio de 2018. Consultado el 19 de septiembre de 2025. Disponible en: https://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/2018/05/REVISTAS/eficiencia_energetica-18/8/.
- [5] Franz, M., & Wenzl, F. P., (2017). Critical review on life cycle inventories and environmental assessments of LED-lamps. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(21), pp. 2017–2078. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1370989>.
- [6] Gobierno de México, (2024). Consejos sobre ahorro de energía en tu casa – Iluminación, Consultado el 13 de septiembre de 2025. Recuperado de <https://www.gob.mx/conueee/acciones-y-programas/consejos-sobre-ahorro-de-energia-en-tu-casa-iluminacion>.
- [7] Haldeman, B., Porter, W. A., & Ruppert, K. C., (2008). Energy Efficient Homes: Introduction to LED Lighting: FCS3280/FY1049, 6/2008. EDIS, 2008(5). <https://doi.org/10.32473/edis-fy1049-2008>.
- [8] Lodo, R., Silva, W., Freitas, L., Coelho, E., Freitas, L. C. G., & Júnior, J., (2013). Analysis, design and implementation of a boost-buck quadratic converter applied to a lighting system using LED lamps. *Eletrônica de Potência*, 18, pp. 1082–1090. <https://doi.org/10.18618/REP.2013.3.10821090>.
- [9] Luo, F. L., & Ye, H., (2016). *Advanced dc/dc converters*. crc Press.
- [10] Maksimovic, D., & Cuk, S., (1991). Switching converters with wide DC conversion range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6(1), pp. 151–157. IEEE.

- [11] Ng, V., & Sanders, S., (2012). A 92%-efficiency wide-input-voltage-range switched-capacitor DC-DC converter. In 2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp. 282–284. IEEE.
- [12] Panigrahi, R., Mishra, S. K., & Joshi, A., (2021). Synthesis of an optimum converter topology for a specified voltage conversion ratio. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(4), pp. 3923–3934. IEEE.
- [13] Ribeiro, A. C. C., Rosa, H. C. P., da Silva Correa, J. D., & da Silva, A. V., (2012). O emprego da tecnologia LED na iluminação pública. *E-xacta*, 5(1).
- [14] Santos, T. S. dos, Batista, M. C., Pozza, S. A., & Rossi, L. S., (2015). Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, pp. 595–602. SciELO Brasil.
- [15] Yadlapalli, R. T., & Kotapati, A., (2017). Efficiency analysis of Quadratic buck converter for LED lamp driver applications. In 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI), pp. 210–214. IEEE.
- [16] Youssef, M., Boubahri, C., Aloui, F., & Fetni, S., (2020). Design of DC-DC converter bench controlled by an Arduino microcontroller. *Int. J. Eng. Res. Technol. IJERT*, 9(7).