

DISEÑO DE UN CONVERTIDOR PARA APLICACIONES EN ILUMINACION DE NAVES INDUSTRIALES CON ALTO FACTOR DE POTENCIA A 480 VCA

DESIGN OF A 480 VAC CONVERTER WITH HIGH POWER FACTOR FOR INDUSTRIAL BUILDING LIGHTING

Lester Estévez García

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México

m2003017@itcelaya.edu.mx

Elías José Juan Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México

elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 1/noviembre/2021

Aceptación: 20/diciembre/2021

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un convertidor para el manejo de luminarios tipo Leds de suspensión en alturas utilizados en la industria. El convertidor de potencia es alimentado de la red eléctrica de 480 VCA y proporciona un voltaje de salida de 48 VCD, presenta un factor de potencia mayor a 0.9 para una potencia de 150 W. El convertidor se compone de dos etapas: la primera es un convertidor SEPIC operando en modo de conducción continua, se utiliza el circuito integrado UC3853 para corregir el factor de potencia y la segunda etapa es un convertidor puente completo operando en modo de conducción continua para el manejo del arreglo de Leds, esta etapa tiene la capacidad de hacer *dimming* (atenuación). Se presenta el diseño de cada etapa y las simulaciones en el software *LTspice* considerando los modelos de componentes reales para reducir el tiempo en su implementación.

Palabras Claves: Alto factor de potencia, atenuación, convertidor SEPIC, luminaria de gran altura, puente completo.

Abstract

In this work, the design of a converter for the management of suspension type LED luminaires at heights used in the industry is presented. The power converter is

powered from the 480 VAC mains and provides an output voltage of 48 VDC, presents a power factor greater than 0.9 for a power of 150 W. The converter is composed of two stages: the first is a SEPIC converter operating in continuous conduction mode, the UC3853 integrated circuit is used to correct the power factor, and the second stage is a full bridge converter operating in continuous conduction mode for the management of the LED arrangement, this stage has the ability to dimming. The design of each stage and the simulations in the LTspice software are presented considering the models of real components to reduce the time in their implementation.

Keywords: Dimming, full bridge, high-bay luminaire, high power factor, SEPIC converter.

1. Introducción

En la actualidad es común que se realicen instalaciones con luminarios tipo LED de gran altura en naves industriales donde la potencia consumida por la iluminación es un gasto significativo [Rivera, 2014]. En la figura 1 se muestra un ejemplo de estas luminarias, en este caso es un producto de 150 W con gran demanda proporcionado por la empresa HITECHLED. Este modelo tiene la característica de modificar su diseño de forma modular para poder conectar diferentes convertidores que puedan alimentar a la lámpara LED.

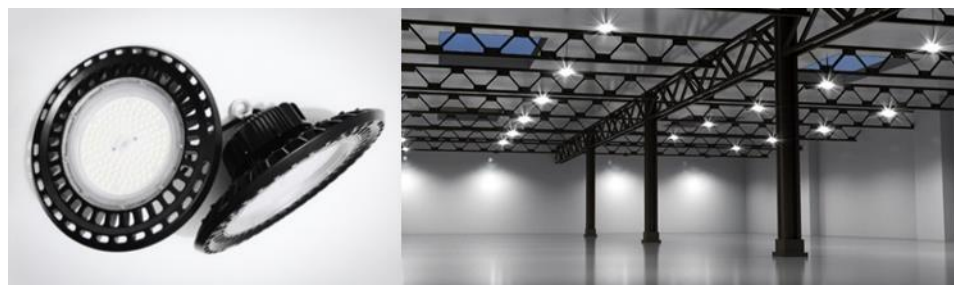


Figura 1 Luminarias comerciales [CO., 2021].

Al realizar una comparación de las principales características entre las diferentes tecnologías de iluminación se aprecian ventajas en el ahorro económico y en el consumo eléctrico, la calidad de la iluminación y la vida útil de las aplicaciones tipo

LED. En inversiones económicas de media y alta potencia se aprecian aún más estas mejoras, ya que, al aumentar el consumo, las pérdidas secundarias también lo hacen, estas pérdidas son producidas en los circuitos de control (balastos y *drivers*) que se incluyen junto a cada tipo de lámparas para suministrar la energía eléctrica en las condiciones de potencia que se requiere. Se producen principalmente en balastos electrónicos, elementos arrancadores, almacenadores de energía y en componentes conmutadores de potencia. En la tabla 1 se muestra esta comparación, realizando un promedio de los datos en un rango de potencia de 100 W a 300 W, cabe mencionar que la principal desventaja que posee la tecnología LED es el alto costo de inversión [Salazar, 2013]; [SENER, 2015].

Tabla 1 Principales características de las tecnologías de iluminación.

Características	Vapor de Sodio	Aditivos Metálicos	Fluorescente	LED
Vida útil (h)	24,000	10,000 – 15,000	24,000	50,000 – 120,000
Eficiencia (lm/W)	45 - 150	75 - 125	78	100 - 140
Temperatura de color (K)	1,900 – 2,200	2,500 – 5,000	5,000 – 6,500	2,700 – 7,000
Pérdidas Secundarias	Balastro 8%	Balastro 6%	Balastro 6.25%	Driver 1%
Pérdidas por calor en la lámpara	Altas	Altas	Medias	Medias
Costo inicial	Bajo	Medio	Medio	Alto

Esta tecnología se ha abierto camino en el mercado sustituyendo diferentes tipos de lámparas gracias a tres ventajas principales [Abeyweera, 2016]; [Chang, 2013]. Es considerable la disminución de los replazos y reparaciones debido a que sus componentes tienen una vida útil mayor, es común encontrar inversiones económicas que sacrifican ciertas características como el flujo luminoso para aprovechar esta ventaja y tener un costo reducido en periodos prolongados de tiempo [Vásquez, 2013]. También presenta una mejora en la calidad de la iluminación, evidenciada en las mediciones de $IRC > 80$ (Índice de Reproducción Cromática) y en un rango de CCT (Temperatura de Color Correlacionada) entre $2700K < T_c < 6500K$, [Andriessse, 2006]. Además, las luminarias LED disminuyen las pérdidas por calor o emisión de la luz en la dirección incorrecta aumentando la eficiencia con relación a las lámparas de diferente tecnología e igual potencia [Holcomb, 2003].

Es en esta tercera ventaja donde se enfoca el presente trabajo con el fin de optimizar la energía eléctrica que se consume. Para ello se establece el diseño de un convertidor utilizando dos etapas figura 2, alimentado a partir de la red eléctrica de 480 VCA, utilizando convertidores de alta frecuencia para obtener un factor de potencia aproximadamente unitario y un control de la corriente en la salida [Dongkyung, 2014].

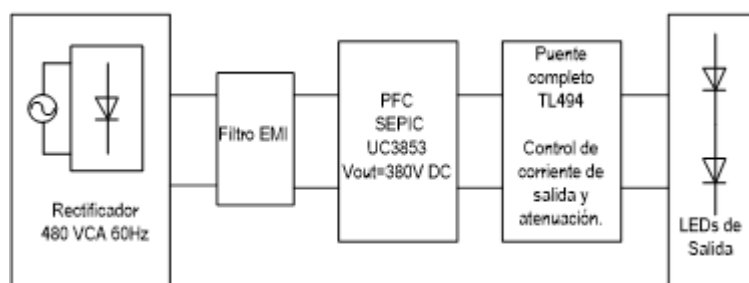


Figura 2 Diagrama general del convertidor propuesto.

En la figura 2 se puede observar el diagrama en bloques del diseño propuesto, el convertidor que alimenta a los Leds está constituido por un filtro EMI (Interferencia Electromagnética) en la entrada para eliminar las tensiones y corrientes parásitas creadas en la conmutación, un rectificador que alimenta un capacitor electrolítico de filtrado y dos convertidores en cascada que suministran y controlan la potencia para la lampara LED. El convertidor en la salida tiene como objetivo estabilizar la corriente consumida independientemente de las variaciones de voltaje en la entrada. Para que el convertidor sea capaz de corregir el factor de potencia, debe operar de tal manera que se perciba al resto del circuito como una carga resistiva desde el puente rectificador (emulador de resistencia), para ello la relación de transformación debe variar en cada ciclo. Es común usar el convertidor elevador (*Boost*) en modo de conducción continua para la etapa de corrección del factor de potencia (PFC) [Al-Absi, 2017]; [Dixon, 1990]. Debido al alto voltaje de alimentación de entrada y baja tensión en el arreglo de LEDs, topologías derivadas del *Buck – Boost* se comparan para la selección final, aspectos como la complejidad en el diseño, el esquema de control y los esfuerzos en los componentes de las topologías SEPIC y *Cuk* [Hernández, 1995] mostradas en la figura 3.

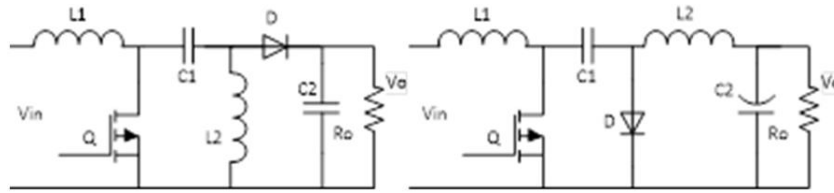


Figura 3 Topologías SEPIC y Cuk.

A pesar de que ambas topologías tienen el mismo número de elementos la diferencia en sus conexiones permite a la topología *Cuk* presentar bajo rizado de corriente en el condensador de alta frecuencia debido a que tiene la bobina *L2* en serie con la salida, además el voltaje de salida se encuentra invertido. La topología SEPIC, al trabajar con potencias cercanas a 150 W presenta los mejores resultados en pruebas de Distorsión Armónica Total y *PFC* [Hernández, 1995].

Para la etapa de *PFC* es necesario realizar un seguimiento de la corriente de entrada y el voltaje con un multiplicador para obtener la señal del comparador PWM, como se muestra en la figura 4. Existen varios circuitos integrados que incluyen las funciones necesarias para obtener la *PFC*: MC34262, L6561, UC3853, LT8312 entre otros. Analizando las características de operación que se ajustan más adecuadamente a la aplicación se selecciona el modelo del UC3853 para el diseño [Phillip, 1999].

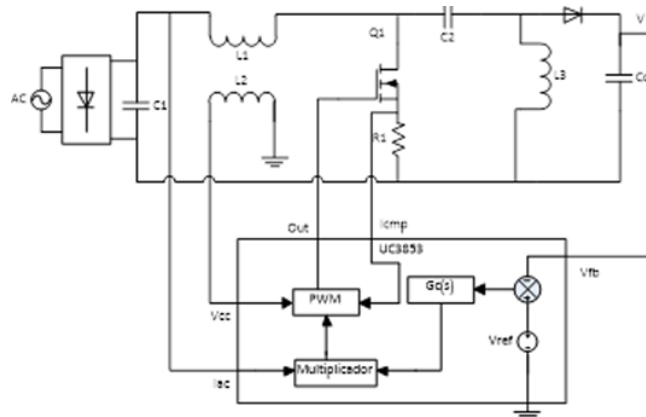


Figura 4 1ra etapa, convertidor SEPIC Lazo de control con *PFC* usando el UC3853.

En la segunda etapa se establece el modelo de Puente Completo [Gómez, 2016] para obtener los valores de voltaje y corriente de salida controlada frente a las

demás configuraciones que presentan aislamiento galvánico. El convertidor *Flyback* es comúnmente usado en aplicaciones de potencia menores a 100 W, dentro de sus características se destaca la forma inversa del bobinado del secundario en el transformador respecto al primario, por lo que el voltaje en la salida tiene polaridad opuesta.

El diseño del *Forward* se basa en un convertidor Buck, esta variante contiene un tercer devanado en el transformador para evitar la saturación y puede modificarse para obtener otra versión con dos interruptores y dos diodos aumentando la complejidad del diseño, también es usado normalmente en aplicaciones de baja potencia. El convertidor Puente Completo presenta mejor desempeño en aplicaciones de potencia, se seleccionó el circuito integrado TL494 para el control de los interruptores, figura 5 [TL494, 1983].

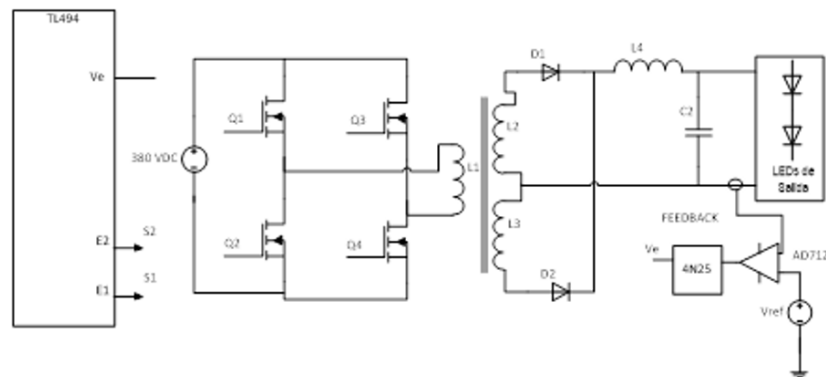


Figura 5 2da etapa, convertidor puente completo controlado por el TL494.

2. Métodos

Las características principales consideradas para el diseño se muestran en la tabla 2, tomando los valores de entrada de la línea de voltaje industrial se crean las condiciones de un bus de 380 VCD entre ambas.

Tabla 2 Especificaciones de diseño.

Primera Etapa (SEPIC) UC3853	$V_{in} = 480 \pm 30 \text{ VCA}$ $V_o = 380 \text{ V}$	$P_o = 165 \text{ W}$ $f_s = 75 \text{ kHz}$	$\Delta V_o = 2 \%$ $\Delta I_o = 25 \%$
Segunda Etapa (Puente Completo) TL494	$V_{in} = 380 \text{ V}$ $V_o = 48 \text{ V}$	$P_o = 150 \text{ W}$ $f_s = 20 \text{ kHz}$	$\Delta V_o = 5 \%$ $\Delta I_o = 10 \%$

Diseño de la primera etapa

El diseño comienza con la rectificación del voltaje de entrada para obtener los valores pico que recibe el convertidor SEPIC, ecuación 1.

$$V_p = 680 \pm 40 \quad (1)$$

El rizo en el voltaje y la corriente de salida se obtienen de las consideraciones hechas en el diseño mostradas en la tabla 2, ecuaciones 2 y 3. Los valores máximos y mínimos del ciclo de trabajo se obtienen usando los V_p y V_o en la ecuación 4.

$$\Delta I_o = 25 \% I_o = 0.13A \quad (2)$$

$$\Delta V_o = 1 \% V_o = 3.8V \quad (3)$$

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_p} \quad (4)$$

De las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 se obtienen los valores de inductancia y capacitancia que se ajusten a las consideraciones de rizo tabla 3, la selección del transistor de efecto de campo (*mosfet*) y el diodo dependen del valor de voltaje pico inverso, la corriente eficaz (RMS) y la corriente pico. La suma del V_p y V_o es el esfuerzo en voltaje tanto en el diodo como en el *mosfet* y el esfuerzo en corriente es la suma de I_{L1} e I_{L2} .

$$L1 \geq \frac{(1 - D_{min})^2 R_o}{D_{min} 2f_{sw}} \quad (5)$$

$$L2 \geq \frac{(1 - D_{min})R_o}{2f_{sw}} \quad (6)$$

$$C1 \geq \frac{I_o D_{max}}{f_{sw} \Delta V_{in}} \quad (7)$$

$$C2 \geq \frac{I_o D_{max}}{f_{sw} \Delta V_o} \quad (8)$$

Tabla 3 Valores obtenidos.

L1	L2	C1	C2	$V_{D,G}$	$I_{D,G}$
$\geq 8.9 \text{ mH}$	$\geq 4.7 \text{ mH}$	$\geq 0.12 \mu\text{H}$	$\geq 2 \mu\text{H}$	1.1 kV	0.39 A

Los valores de los elementos auxiliares del UC3853 se pueden obtener siguiendo los pasos de diseño indicados en la Nota de Aplicación U-159 de este circuito integrado [Phillip, 1999]. En la figura 6 se observa el diseño de la 1ra etapa obtenido luego de ajustar los componentes con los modelos matemáticos en *LTspice*.

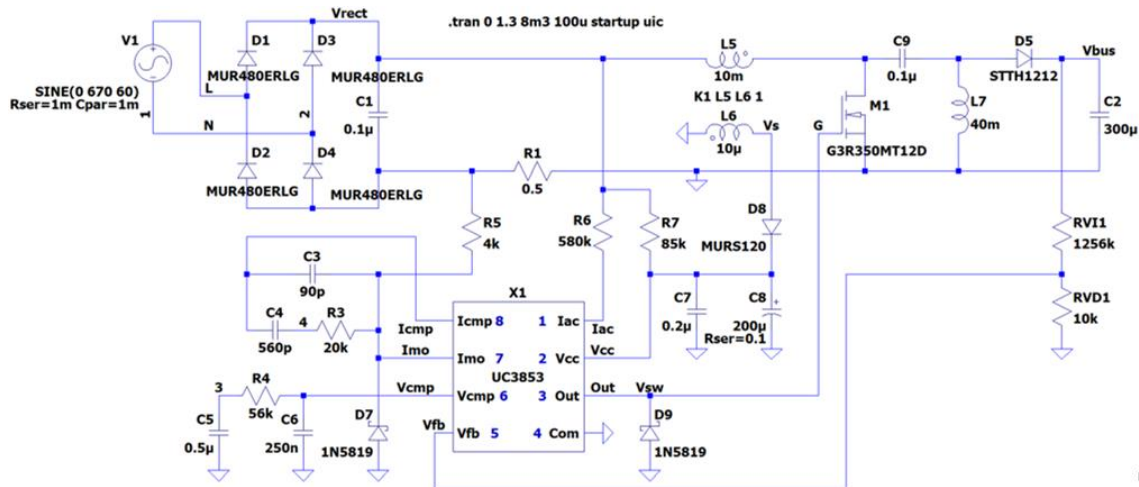


Figura 6 Circuito de la primera etapa (SEPIC).

Diseño de la segunda etapa

Para el diseño del convertidor Puente completo se establece el siguiente modo de operación: el transistor superior e inferior de cada rama conmutan de forma alterna y coordinada, existiendo instantes en el ciclo de trabajo en que los cuatro se encuentran abiertos, en la figura 7 se presenta el diagrama esquemático completo de esta etapa.

Las especificaciones obtenidas y consideradas en la etapa inicial se muestran en la tabla 2. Para obtener los valores del circuito se considera que el ciclo de trabajo de los interruptores es máximo $D = 0.9$, pero debido a la inductancia de dispersión existen pérdidas que se estimaran por el momento del 20% consideradas en la potencia entregada por el primer convertidor, en consecuencia, el ciclo de trabajo efectivo sería de $D_{eff} = 0.7$ [Chang, 2013], ecuación 9.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_2}{N_1} D_{eff} \quad (9)$$

El capacitor y bobina en el filtro LC de salida se obtiene de ecuaciones 10 y 11.

$$C_o = \frac{I_o}{8f_{sw}\Delta V_o} \quad (10)$$

$$L_o = V_L \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad (11)$$

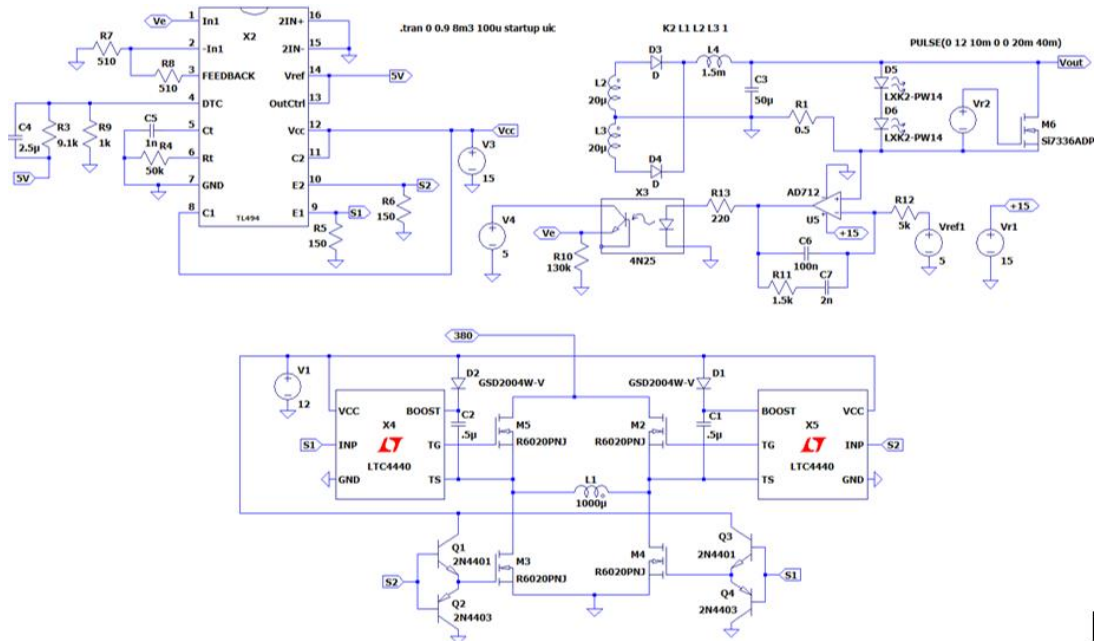


Figura 7 Circuito de la segunda etapa (puente completo).

Control de corriente de salida

El diodo LED es un dispositivo de corriente constante y tiene una caída de tensión directa. En otras palabras, la tensión recibida debe superar a su voltaje de encendido o *forward* para que permita el flujo de corriente y funcione de manera óptima. Por ende, al controlar la corriente se controla la intensidad de luz de las luminarias [Andriessse, 2006]; [Chang, 2013]; [Huang, 2010].

En general, se fabrican controladores de dos tipos: corriente constante (CC) y tensión constante (CV). Los *drivers* de corriente constante dotan energía eléctrica a las luminarias variando el voltaje en el circuito, de tal manera que los dispositivos mantengan una corriente eléctrica invariable a la salida. Por ello, la corriente suministrada a los LEDs no cambia, pese a la variación que pudiera presentarse en el voltaje, en consecuencia, la calidad de la iluminación será estable. Los equipos de voltaje constante mantienen una tensión fija que suele ser de 12 V o 24 V.

Cada proyecto debe ser analizado por un especialista para realizar la elección del tipo de control que se adecue a las necesidades específicas. En los requisitos de este trabajo se desea controlar la corriente de salida $I_o = 3 A$ con una potencia de 150 W.

Utilizando una resistencia de medición de 0.5Ω en serie con los LEDs, se obtiene una señal equivalente a la que circula a través de ellos. Esta señal se compara con la referencia deseada y se filtra en el controlador para obtener una respuesta de primer orden a la salida. Para el lazo de control se usó el amplificador operacional AD712 alimentado de 15 V. El opto - acoplador 4N25 separa esta señal de control antes de ser recibida por el TL494, el cual se encarga de generar los pulsos de trabajo en los interruptores del Puente Completo.

En la figura 7 se puede observar un circuito de prueba para realizar *dimming* en los Leds de salida, este circuito está compuesto por el mosfet M6 y una señal de control a una frecuencia de 25 Hz con un ciclo de trabajo del 50%. Existen varios métodos para realizar atenuación: Por PWM o analógicamente ajustando la resistencia de medición, estos métodos pueden ser implementados con el regulador de corriente constante LM3406 para conducir LED de alta potencia [LM3406, 2008].

Con el fin de simplificar el diseño en el método, se puede colocar un dispositivo de derivación externo como el FET M6 que se muestra en la figura 7 en paralelo a la cadena de LED para desviar rápidamente la corriente de salida del convertidor [Rosen, 2011].

Dentro de las múltiples tecnologías que existen para supervisar, calibrar o mejorar el desempeño del convertidor frente a los usuarios, cabe mencionar las maneras de atenuar a distancia ya sea por cable o inalámbrico. La iluminación LED con sistema *DALI* es una alternativa que surge para el control y automatización de sistemas de iluminación industrial. En este sistema se instalan sensores compatibles con el convertidor y por medio de la programación de un PLC se puede sacar el máximo provecho al ahorro de energía [Lunatone, 2021]. Otra opción para controlar la atenuación es el sistema de LED inteligente inalámbrico *Digital Lumens*, que integra sensores propios o de otros fabricantes en una plataforma denominada *Intelligence Overhead* que permite el control individual de cada equipo [Family, 2020].

3. Resultados

Para evaluar las características del diseño obtenido al conectar ambas etapas del convertidor se utilizó el software *LTspice*, se realizaron simulaciones variando la entrada de alimentación $V_{in} = 480 \pm 30 \text{ VCA}$ se obtuvieron las mediciones de voltaje y corriente que se muestran en las figuras 8 y 9.

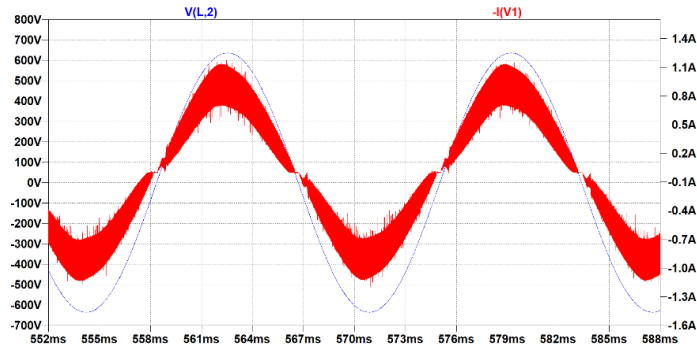


Figura 8 Formas de onda de V_p y I_{in} con $V_{in} = 450 \text{ VCA}$.

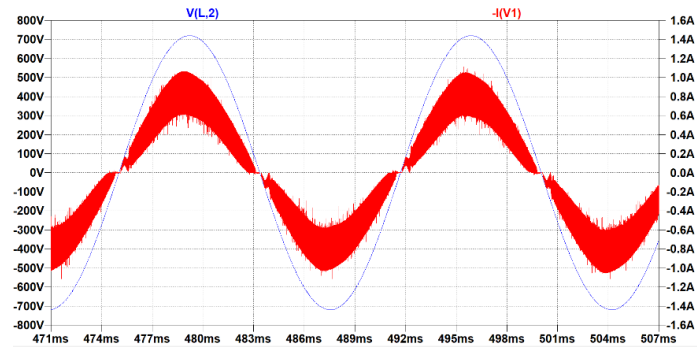


Figura 9 Formas de onda de V_p y I_{in} con $V_{in} = 510 \text{ VCA}$.

En el rango de voltaje de entrada de 450 – 510 VCA, la primera etapa del convertidor realiza el seguimiento del voltaje con la señal de corriente, estableciendo el factor de potencia cercano a 1. Los valores picos de voltaje para las figuras 8 y 9 son 636 V y 721 V respectivamente y se puede apreciar la disminución en el consumo de la corriente pico de 1.2 A – 1.05 A. Los próximos resultados serán simulados con el valor promedio de $V_{in} = 480 \text{ VCA}$.

La figura 10 muestra los valores máximos de esfuerzo en tensión que oscila en un rango de 0.5 – 1.1 kV y corriente de 0 – 2.5 A del *mosfet* M1.

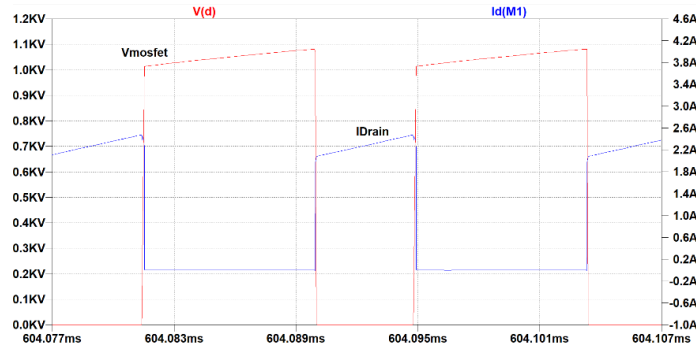


Figura 10 Formas de onda de V_D y I_{Drain} .

La figura 11 muestra los valores máximos de esfuerzo en tensión que oscila en un rango de 0.4 – 1.1 kV y corriente de 0 – 2.5 A del diodo D5. En la figura 12 se muestra el valor del voltaje a la salida de esta primera etapa, que presenta un rizo menor al 1% de V_{bus} aproximadamente ± 3 V. En la figura 13 se muestra el valor de la corriente y el voltaje a la salida de la segunda etapa junto a la corriente en el inductor de salida del puente completo. La atenuación se muestra en figura 14.

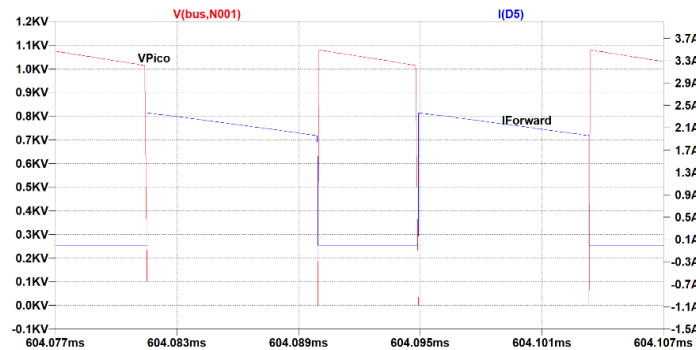


Figura 11 Formas de onda de V_{Pico} y I_F .

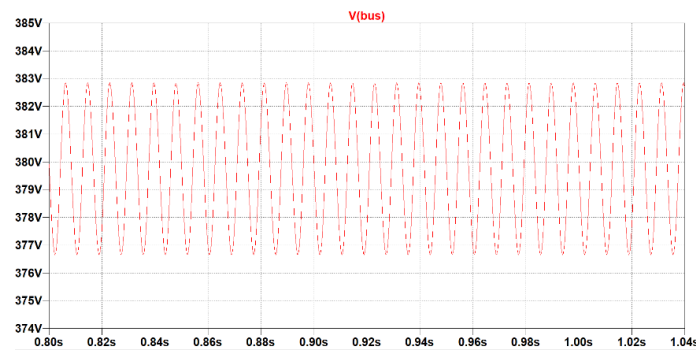


Figura 12 Formas de onda de V_{bus} en la 1ra etapa.

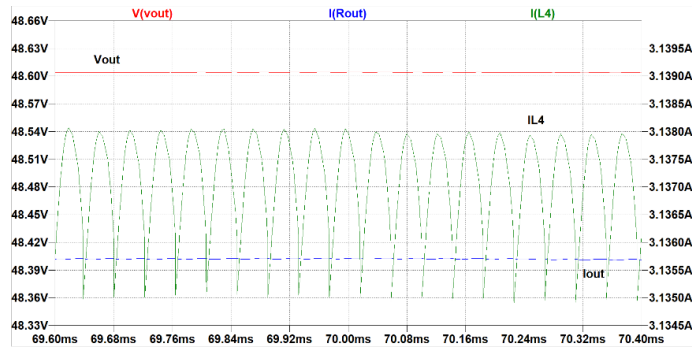


Figura 13 Formas de onda de I_{L4} , V_0 y I_0 en la 2da etapa.

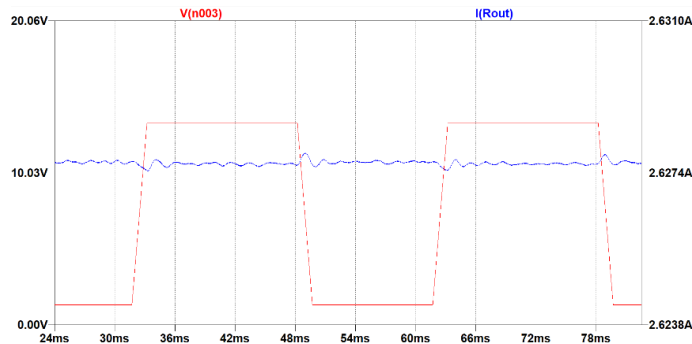


Figura 14 Atenuación.

4. Discusión

Para la obtención de los resultados se establecieron los modelos de los componentes reales proporcionados por *LTspice* con el objetivo de reducir el tiempo en su implementación. En la tabla 4 se muestran los códigos de estos componentes y sus referencias en el diseño.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó un convertidor de dos etapas con alto factor de potencia capaz de ser utilizado en las instalaciones de iluminación LED de gran altura en el sector industrial. Los resultados de simulación demuestran que el convertidor propuesto presenta un alto factor de potencia que beneficia a todo el diseño, y a pesar de que la primera etapa posee una respuesta lenta por la naturaleza del circuito, la segunda etapa lo compensa al realizar un control rápido de la corriente en la salida. Este control también permite la atenuación, a través del *mosfet* M6 y la

señal externa de control, de la luz adaptándose a todo tipo de aplicaciones y al realizar un control centralizado es posible aprovechar la energía que se consume para la iluminación de forma óptima. La integración de este convertidor diseñado, en lámparas de iluminación comercial tiene como base el ahorro de energía y una reducción de costos a lo largo de su vida útil.

Tabla 4 Componentes utilizados en el modelo del convertidor.

Referencia	Componente	Descripción
D1, D2, D3, D4	MUR480ERLG	Diodo Rectificador $V_R = 800 V, I_F = 4 A$.
M1	G3R350MT12D	Mosfet Canal N $V_{DS} = 1.2 kV, I_D = 8 A, R_{DS} = 350 m\Omega$.
D5	STTH1212	Diodo Rectificador $V_R = 1.2 kV, I_F = 12 A$.
D7, D9	1N5819	Diodo Rectificador $V_R = 200 V, I_F = 1 A$.
D8	MURS120	Diodo Rectificador $V_R = 200 V, I_F = 1 A$.
X1	UC3853	Circuito Pre - regulador de factor de alta potencia.
U1, U2	LTC4440	Impulsor <i>Driver</i> para <i>Mosfet</i> .
U3	TL494	Circuito PWM de propósito general.
M2, M3, M4, M5	R6020PNJ	Mosfet Canal N, $V_{DS} = 600 V, I_D = 20 A, R_{DS} = 250 m\Omega$.
D6, D10	GSD2004W-V	Diodo Rectificador $V_R = 300 V, I_F = 225 mA$.
Q1, Q3	2N4401	Transistor npn $V_{CEO} = 40 V, I_C = 600 mA$.
Q2, Q4	2N4403	Transistor pnp $V_{CEO} = 40 V, I_C = 600 mA$.
U4	4N25	Opto - acoplador.
U5	AD712	Amplificador Operacional.
D11, D12	ES3DB	Diodo Rectificador $V_R = 150 V, I_F = 3 A$
D13, D14	STW8B12C	LED de alta intensidad $V_f = 3 V, I_F = 100 mA, CRI = 80 Ra$

En el futuro del diseño se propone mejorarlo incluyendo auto – alimentación en la segunda etapa para obtener los voltajes sin depender de fuentes externas, además es posible utilizar el bus intermedio de 380 V para conectar una fuente de alimentación secundaria, pudiendo ser esta, un banco de baterías o paneles fotovoltaicos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Abeyweera, R., & Senanayake, N., (2016). Evaluation of Effectiveness of LED Lighting in Buildings. SLEMA, 19.
- [2] Al-Absi, M., Khalifa, Z., & Hussein, A. J., (2017). A new capacitor-less buck DC-DC converter for LED applications. Active Passive Electronic Components.
- [3] CO., H. T., (2021). Luz alta bahía UFO LED 150W.

- [4] Andriesse, J. W., Philips Lighting Company, E., Netherlands, (2006). LEDs in Real Lighting Applications. IEEE.
- [5] Chang, Y. N., Cheng, H. L., & Kuo, C. M., (2013). Design of high efficiency illumination for LED lighting.
- [6] Dixon, L. H., (1990). Optimizing the Design of a High Power Factor Switching Preregulator. Power Supply Design Seminar.
- [7] Dongkyung, P., Zhidong, L., & Hoi, L., (2014). A 40 V 10 W 93%-Efficiency Current-Accuracy-Enhanced Dimmable LED Driver With Adaptive Timing Difference Compensation for Solid-State Lighting Applications. IEEE, 49(8).
- [8] Family, D., (2020). Intelligent High Bay Luminaire. www.digitallumens.com.
- [9] Gomez Menendez, A., (2016). Estudio comparativo de un convertidor CC-CC en Puente Completo con dispositivos semiconductores basados en silicio y en nitruro de galio. ETSII UPM.
- [10] Hernández Nieto, M. L., (1995). Análisis comparativo entre las topologías "BOOST", "SEPIC" Y "CUK" usadas como correctoras del factor de potencia. CENIDET.
- [11] Holcomb, M. O., Mueller Mach, R., Mueller, G. O., Collins, D., Fletcher, R. M., Steigerwald, D. A., Krames, M., (2003). The LED lightbulb: are we there yet? progress and challenges for solid state illumination. IEEE.
- [12] Huang, B., Hsu, P., Wu, M., & Chen, K., (2010). A high-performance stand-alone solar PV power system for LED lighting. Paper presented at the 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- [13] LM3406, (2008). 1.5 A, Constant Current, Buck Regulator for Driving High Power LEDs. Texas Instruments.
- [14] Lunatone, (2021). DALI 1Ch LED Dimmer CV. Datasheet.
- [15] Phillip C, T., (1999). Boost Power Factor Corrector design with the UC3853. Texas Instruments Incorporated.
- [16] Rosen, R., (2021). LM3406, LM3409 Dimming Techniques for Switched-Mode LED Drivers. POWER designer.
- [17] SENER, (2015). Estudio de mercado sobre diodos emisores de luz (LEDs). Estudios en materia de Eficiencia Energética.

- [18] Rivera Sierra, R., (2014). Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su comportamiento armónico. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [19] Salazar, D. G., (2013). Análisis comparativo entre iluminación convencional e iluminación LED utilizando el método de los Lúmenes. Universidad Veracruzana.
- [20] TL494, (1983). Pulse-Width-Modulation Control Circuits, Texas Instruments, SLVS074H.
- [21] Vásquez, D., & Fernando, J., (2013). Iluminación general de altura de dos naves industriales destinadas al proceso de trefilado de alambre. Proyecto Final de Ingeniería (UADE).