

# Convertidor CA/CC trifásico basado en resistencias libres de pérdidas para alimentar LED de alta eficiencia

Ignacio Castro, Diego G. Lamar, Manuel Arias, Javier Sebastián y Marta M. Hernando

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Gijón 33204, España  
(e-mail: castroignacio@uniovi.es)

**Resumen**—Este artículo presenta una fuente de alimentación para diodos emisores de luz de alta eficiencia (*High Brightness Light Emitting Diodes*, HB-LED) en redes trifásicas. Dicha fuente de alimentación cumple con los requisitos impuestos por la normativa IEC 1000-3-2 para Clase C, obteniendo además un alto Factor de Potencia (FP) y una baja Distorsión Armónica Total (DAT). Esta solución también capaz de obtener *dimming* total eliminando a su vez el condensador electrolítico y proporcionando aislamiento galvánico al conjunto. Su principio básico está basado en el uso de seis celdas de cuatro puertos con su entrada conectada a la red trifásica y su salida conectada en paralelo. Cada una de estas celdas es en un convertidor CC/CC operando como Resistencia Libre de Pérdidas (RLP). Para validar el concepto, el comportamiento de la RLP lo define un convertidor de retroceso o *flyback* operando en Modo de Conducción Discontinuo (MCD). Finalmente, se ha construido un prototipo capaz de operar en todo el rango de tensión Europeo de distribución trifásica, que varía entre 380V y 420V eficaces, con una tensión a la salida de 48V y una potencia máxima de 90W, que valida experimentalmente la presente propuesta.

**Palabras Clave**—Trifásica, Corrección del Factor de Potencia, HB-LED, Resistencia Libre de Pérdidas, eliminación del electrolítico.

## I. INTRODUCCIÓN

Los diodos emisores de luz de altas prestaciones (*High-Brightness Light-Emitting Diodes*, HB-LED) están empezando a ser omnipresentes en todo el rango de productos de iluminación, debido a sus grandes ventajas frente a la iluminación tradicional. Por otro lado, se debe tener en cuenta que muchas instalaciones a nivel comercial o industrial en todo el mundo reciben acceso a la red de distribución de energía eléctrica en formato trifásico (trifásica, a partir de ahora), cuya tensión entre línea y neutro varía en función de la localización: Canadá recibe tensiones de 347V eficaces, EE.UU. de 480V eficaces y la Unión Europea 230V eficaces, a excepción del Reino Unido. A la vista de lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta: ¿Por qué no alimentar HB-LED en redes trifásicas?

Tradicionalmente, las fuentes de alimentación CA/CC para HB-LED se diseñan para una distribución monofásica, y normalmente teniendo en cuenta un rango de tensión de entrada universal (80 a 265V). Por lo tanto, el uso de este tipo de fuentes de alimentación para alimentar luminarias en redes con acceso único a trifásica requiere normalmente el uso de un autotransformador reductor de baja frecuencia, a la vez que acceso al neutro [1]. El uso de este autotransformador reductor reduce el rendimiento de todo el sistema, no siendo nunca mayor

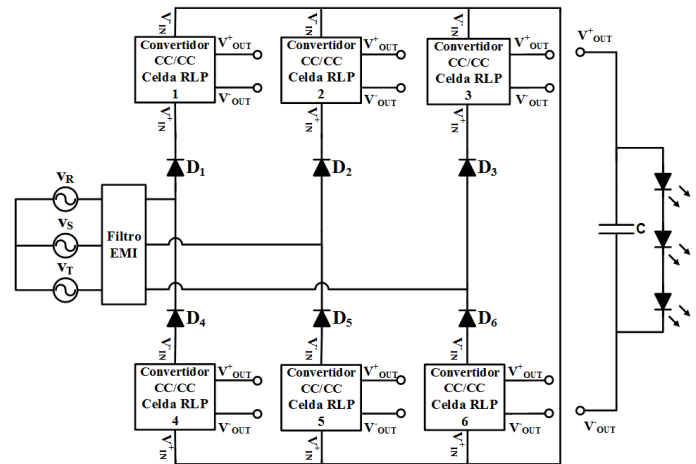


Fig 1. Diagrama de la fuente de alimentación multi-celda trifásica para HB-LED.

del 95%. Otro de los aspectos que necesita ser tenido en cuenta es que este elemento hace que el tamaño y el peso de la fuente de alimentación sean excesivos con las soluciones monofásicas basadas en fuente de alimentación conmutadas [2]. Por lo tanto, el objetivo es encontrar una solución más compacta y específica para esta aplicación.

En la literatura, hay infinidad de trabajos dedicados al estudio de fuentes de alimentación CA/CC alimentadas desde trifásica, y que están a su vez sintetizadas en [3]. La gran parte de estos convertidores se basan en topologías con un solo interruptor, las cuales tienen un Factor de Potencia (FP) alto a base de permitir un alto nivel de tensión de salida. Para evitar estos problemas, se puede plantear al uso de una fuente de alimentación basada en un convertidor multi-celda compuesto por Resistencias Libres de Pérdidas (RLP). Este tipo de fuentes de alimentación, propuestas por Delco [4] y basadas en el uso de un convertidor CC/CC que actúa como RLP por fase, son más complejas desde el punto de vista de su control, al añadir más componentes, y por tanto, pudiendo llegar a ser más caras. Sin embargo, son capaces de conseguir una mejor relación FP-DAT-tensión de salida. En la literatura se pueden encontrar algunos trabajos en RLP para rectificadores trifásicos basados en topologías: flyback [5][6], Cúk [7], SEPIC [8], operando como RLP.

En este trabajo se propone el uso de este tipo de convertidores multi-celda como fuente de alimentación para alimentar HB-LED. Es importante remarcar, que el uso de convertidores

trifásicos con PF cercano a la unidad, se traduce en que la potencia a la salida del convertidor no es pulsada, ya que la suma de la potencia instantánea al doble de la frecuencia de red de las tres fases no lo es [4-8]. Este hecho implica que es posible eliminar el condensador electrolítico presente en los correctores de factor de potencia monofásicos. Así se mejoraría la calidad de la luz en instalaciones comerciales e industriales, evitando el *flicker*, tal y como se verá en la Sección III, y alargando la vida útil del equipo.

Por otro lado, cabe mencionar que en el campo de la iluminación, ya se han propuesto trabajos en trifásica para lámpara fluorescentes [12]. En el caso de los HB-LED nunca había sido propuesta una fuente de alimentación específica. Sin embargo, el presente artículo propone una solución compacta para alimentar HB-LED en redes trifásicas, basada en la idea de la fuente alimentación de [6], mediante el uso de celdas basadas en RLP.

Desde el punto de vista del cumplimiento de la normativa de inyección de armónicos de baja frecuencia (i.e. IEC 1000-3-2 [9-11]), los equipos trifásicos se clasifican como Clase A, aunque teniendo en cuenta la potencia de las luminarias y dado que se trata de equipo de iluminación, el objetivo será que la fuente de alimentación para HB-LED cumpla con la normativa de la Clase C, que es la más restrictiva de las dos.

En resumen, el uso de convertidores CA/CC trifásicos permite eliminar el componente más crítico desde el punto de vista de la vida útil de la fuente de alimentación que es el condensador electrolítico. El precio a pagar es conectar la fuente de alimentación para HB-LED a la línea mediante tres cables en lugar de dos. Lo que aquí se propone no es distribuir en trifásica para la iluminación con HB-LED, sino aprovechar los lugares donde sea posible esta conexión.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA HB-LED

El concepto de la fuente de alimentación CA/CC para HB-LED propuesta en este trabajo y mostrada en la Fig. 1, se basa en el uso de convertidores trifásicos constituidos por convertidores CC/CC (i.e. celdas) operando como RLP [5], para conseguir corrientes de fase sinusoidales sin condensador electrolítico. El convertidor de la Fig. 1 se basa en la idea presentada [6].

Cada una de las celdas mostradas en la Fig. 1, en este caso son convertidores de retroceso o *flyback* operando en Modo de Conducción Discontinuo (DCM), tal y como se muestra en la Fig. 2.

Como es bien conocido [13], un convertidor CC/CC *flyback* operando en MCD suministra una corriente fija a la carga demandando una corriente proporcional a su tensión de entrada, que en este caso son los HB-LED. Es decir, su comportamiento visto desde de entrada es resistivo, y teóricamente libre de pérdidas. El valor de la RLP de un *flyback* en MCD, viene determinado por:

$$R_{celda} = \frac{2L}{d^2T}, \quad (1)$$

donde  $d$  es el ciclo de trabajo del convertidor,  $L$  es la inductancia magnetizante de la bobina acoplada y  $T$  es el periodo de conmutación. Al forzar a los *flyback* a trabajar en MCD con un ciclo de trabajo y una frecuencia constante, se puede asegurar que el comportamiento resistivo es independiente de la tensión de entrada. Por lo tanto, en el convertidor de la Fig. 1, cada fase va a demandar una corriente sinusoidal, garantizando así alto FP y baja DAT.

De ahora en adelante y con objeto de simplificar el análisis

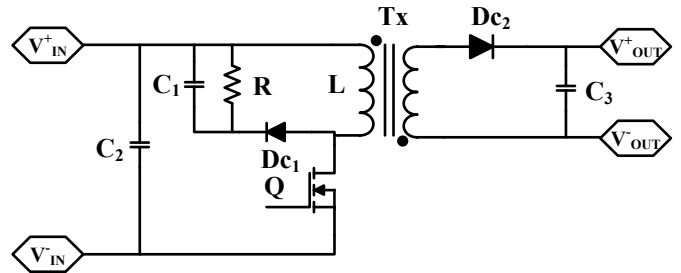


Fig 2. Esquemático de la celda RLP basada en *flybacks* operando en MCD.

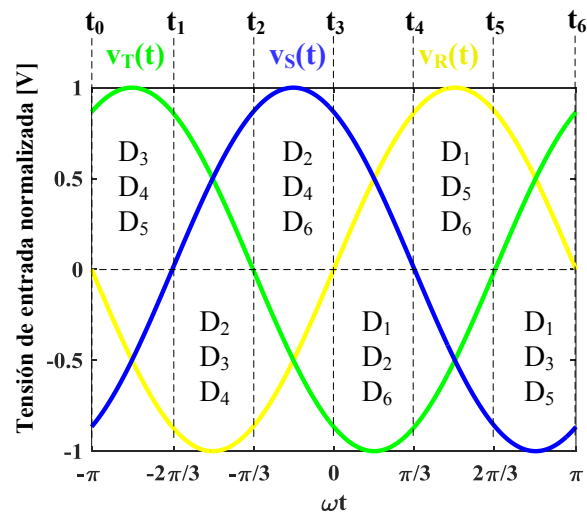


Fig 3. Conducción teórica de los diodos de la fuente de alimentación propuesta en función de la tensión entre fase y neutro.

sobre la fuente de alimentación CA/CC propuesta, se considerará a las celdas de RLP como resistencias ideales, cuyo valor será considerado igual, no teniendo en cuenta las tolerancias de los componentes de los distintos *flyback*.

Es importante destacar que la fuente de alimentación de HB-LED va a demandar una corriente sinusoidal, ya que cada uno de los diodos del rectificador conduce durante un semiciclo de red. Un análisis básico de la estructura de la Fig. 1 se puede deducir que conducen tres diodos diferentes cada  $\pi/3$  de  $\omega t$  en función de las tensiones que haya en cada una de las fases ( $v_R$ ,  $v_S$ ,  $v_T$ ). Esta secuencia de conducción se resume en la Fig. 3. Por ejemplo,  $D_2$  conduce durante el semiciclo positivo de la fase S, de  $t_1$  a  $t_4$ , (Fig. 3). Al mismo tiempo, conducen otros dos diodos

en función de las tensiones de las fases R y T. Sin embargo, no comparten el periodo de conducción de  $D_2$  [ $t_1, t_4$ ], lo que significa que cada  $\pi/3$  de  $\omega t$  conduce un conjunto diferente de tres diodos.

Es este el motivo que permite dividir la fuente de alimentación en tres etapas para cada uno de los diodos. Estas tres etapas se muestran como ejemplo para el diodo  $D_2$  en la Fig. 4a, b y c, donde  $D_2$  es el diodo que conduce de  $t_1$  a  $t_4$  y  $D_1, D_3, D_4$  y  $D_6$  son los diodos que se van turnando en la conducción en función de las tensiones de las fases R y T.

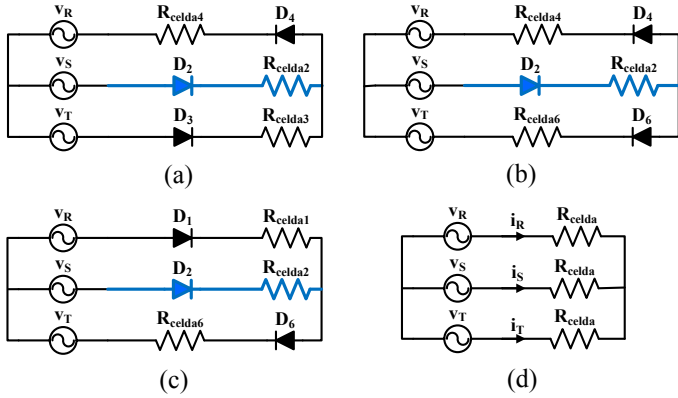


Fig 4. (a) Circuito equivalente durante  $[t_1, t_2]$  (b) Circuito equivalente  $[t_2, t_3]$  (c) Circuito equivalente  $[t_3, t_4]$  (d) Circuito equivalente simplificado de la fuente de alimentación.

El análisis realizado para  $D_2$ , es equivalente para el resto de diodos. Por tanto, si se considerará un periodo de red, la fuente de alimentación de HB-LED, desde el punto de vista de la entrada, se puede considerar como una conexión trifásica en estrella (Y) de las RLP, tal y como se puede ver en el Fig. 4d. Como consecuencia la corriente de entrada para cada fase ( $i_N$ ) es sinusoidal, y se puede definir como:

$$i_N = \frac{v_N(t)}{R_{celda}} = \frac{v_p}{R_{celda}} \cos(\omega t - \varphi_N), \quad (2)$$

donde  $v_N$  es la tensión fase-neutro de una de las fases (la letra N indexa la fase R, S o T),  $v_p$  es la tensión de pico de la tensión de entrada fase-neutro y  $\varphi_N$  es el desfase de la tensión de fase del sistema trifásico.

Como se asegura teóricamente FP unidad en cada fase, no habrá potencia pulsada a la entrada de la fuente de HB-LED, y por lo tanto, la potencia de entrada del convertidor puede ser definida por la suma de las potencias de cada fase:

$$p(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{v_N^2(t)}{R_{celda}} = \frac{3v_p^2}{2R_{celda}} = \frac{3v_p^2 d^2 T}{4L} = P \quad (3)$$

De (3) se pueden deducir lo anteriormente expuesto, la suma de las componentes sinusoidales a dos veces la frecuencia de red se anulan, siendo por tanto, la potencia de entrada del convertidor una constante.

En la Fig. 4, se puede observar que las corrientes de línea sufren una caída de tensión correspondiente a tres diodos del rectificador, lo cual es una importante ventaja frente a la

topología propuesta en [5], donde la corriente de línea sufre la caída de tensión de seis diodos. Esto se traduce potencialmente en un mayor rendimiento.

En lo que respecta a la conexión de las salidas, cada uno de los secundarios de las celdas con RLP (convertidores *flyback*) se va a conectar en paralelo a los HB-LED. De la misma manera, si se tiene en cuenta la simplificación realizada en la Fig. 4d con el conexionado especificado anteriormente, se llega a la Fig. 5. En esta figura se explica el funcionamiento básico del convertidor mediante tres celdas activas que alimentan los HB-

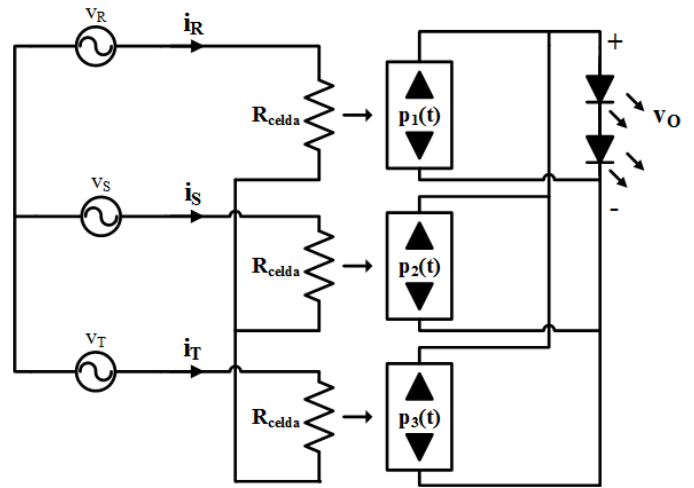


Fig 5. Fuente de alimentación trifásica para HB-LED simplificada con RLP.

LED, representando las celdas como fuentes de potencia.

Esta conexión en paralelo de las salidas permite la eliminación del condensador electrolítico dado que la potencia a la salida no es pulsada. Por tanto, un condensador de una tecnología diferente (i.e cerámico, de película de plástico, etc.) puede ser usado, simplemente para reducir el rizado de la tensión de salida a la frecuencia de conmutación. Este hecho conlleva un aumento de la vida útil de la fuente de alimentación, pudiendo compararse con la de los propios HB-LED. Esto es particularmente interesante para entornos en los que las luminarias tengan un difícil acceso, o para equipos en los que su precio haga que se necesite garantizar una larga vida útil.

Por ende, si la potencia no pulsada se inyectara a una carga resistiva, que fuera equivalente a los HB-LED, se puede relacionar la potencia a la entrada, a partir de(4).

$$P = \frac{3v_p^2}{2R_{celda}} = \frac{v_o^2}{R_L} \rightarrow M = \frac{v_o}{v_p} = \sqrt{\frac{3R_L}{2R_{celda}}}, \quad (4)$$

donde  $v_o$  es la tensión de salida y  $R_L$  es el valor de la resistencia de carga. Dado que  $v_o$  va a ser una constante, se puede asumir que no habrá rizado en la corriente de salida en condiciones ideales.

De la ecuación (4) se puede obtener el ciclo de trabajo necesario para controlar la fuente de alimentación, considerando que se usara la misma señal de modulación de ancho de pulso

(Pulse Width Modulation, PWM) para controlar a todos y cada de los convertidores *flyback* o celdas.

$$d = \frac{2v_o}{v_p} \sqrt{\frac{L}{3R_L T}} \quad (5)$$

En la presente propuesta, la condición de atenuación total (*dimming*) de luz en los HB-LED se conseguirá mediante la reducción del ciclo de trabajo de las celdas. Esto incrementa el valor de la resistencia equivalente a la entrada (debido a (2)), disminuyendo la corriente que demanda la fuente de alimentación, mientras se mantiene en todo momento corrientes sinusoidales.

Desde el punto de vista del diseño, se deberá realizar un cálculo del ciclo de trabajo teórico (5) y de la potencia máxima (3) para las especificaciones de la fuente de alimentación. Una vez realizado este cálculo, se procederá al diseño de la RLP garantizando que, al ciclo de trabajo teórico y potencia máxima, cada celda RLP esté operando en MCD, tal y como se explica en [13], y considerando una tensión de entrada en cada celda igual a la tensión fase-neutro. Además, desde el punto de vista del diseño de celda, se deberá considerar que cada convertidor *flyback* va a manejar un sexto de la potencia de la fuente de alimentación. Finalmente, es importante destacar que dado que los convertidores *flyback* se van a manejar con la misma señal de control, se requerirá un circuito de control con aislamiento debido a que los MOSFET de las celdas RLP no están referidos a las mismas masas.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### A. Descripción y primeros resultados.

La fuente de alimentación para HB-LED propuesta y analizada en las secciones anteriores ha sido diseñada para una potencia máxima de 90W. Esta fuente de alimentación recibe una entrada trifásica de 400V eficaces de línea y alimenta cinco cadenas de doce HB-LED (W42180T2-SW) con sus respectivas resistencias de equalización a 48V/1,8A a plena carga. La frecuencia de conmutación de cada uno de los convertidores *flyback* es de 100kHz operando siempre en MCD siguiendo el esquema de la Fig.2. Sus componentes se resumen en la Tabla I. Cada uno de los *flyback* maneja un sexto del total de la potencia, 15W. El resto de los componentes que conforman la fuente de alimentación trifásica para HB-LED se muestran en la Tabla II. Finalmente, la Fig. 6 muestra una imagen del prototipo construido para validar los conceptos propuestos en este trabajo. Es importante destacar que los transformadores de los *flyback* se encuentran en la otra cara de la PCB.

TABLA I. COMPONENTES DE LA CELDA DEL PROTOTIPO

Referencia Fig. 2	Valor
Dc <sub>1</sub>	STTH208U
Dc <sub>2</sub>	FES8BT-E3/45
C <sub>1</sub>	1μF 800V Condensador Cerámico
C <sub>2</sub>	100nF 50V Condensador de Película
C <sub>3</sub>	1μF 50V Condensador de Película
R	10,5kΩ
Q	IPP65R225C7
T <sub>x</sub>	Coilcraft Z9007-BL

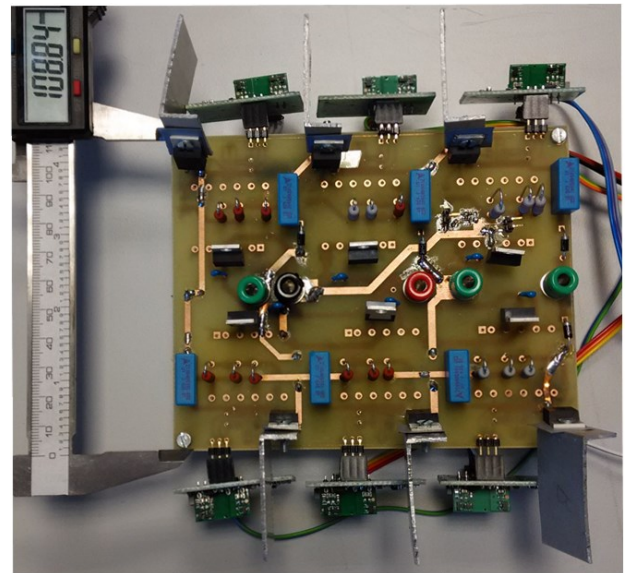


Fig 6. Prototipo de la fuente de alimentación para HB-LED

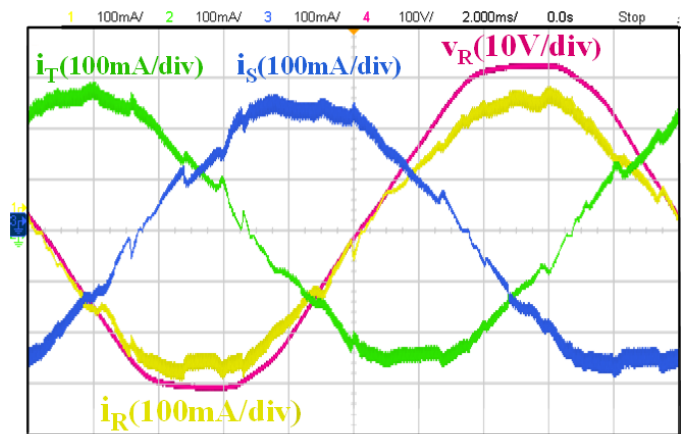


Fig 7. Corrientes de entrada de las tres fases y la tensión de entrada de la fase R a plena carga.

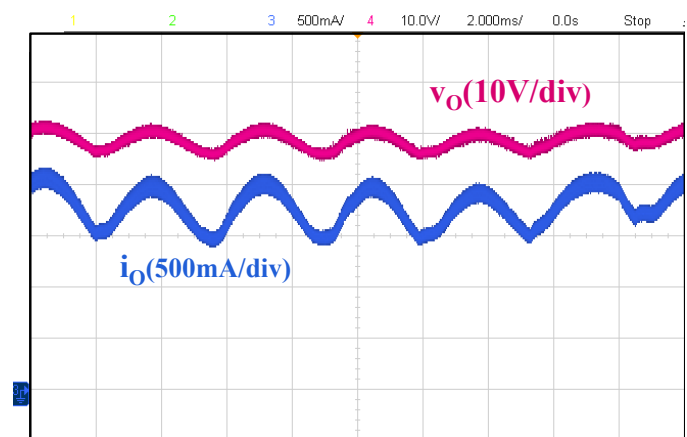


Fig 8. Corriente y tensión de salida a plena carga.



TABLA II. RESTO DE COMPONENTES DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE HB-LED

Referencia Fig. 1	Valor
D <sub>1</sub> -D <sub>6</sub>	1N4007
C	10μF 100V Condensador Cerámico
FPGA	XC7A100T-1CSG324C

Todas las pruebas con este prototipo se han realizado conectadas a la red trifásica real, lo cual justifica la distorsión que se muestra en la tensión de fase R en la Fig. 7. En esta misma figura se muestra una captura del osciloscopio donde también se muestran las corrientes de entrada a la fuente de alimentación. Tal y como se puede observar, la corriente ( $i_R$ ) sigue a la tensión ( $v_R$ ), demostrando por tanto que la corrección del factor de potencia existe. Además, el desfase entre corrientes se corresponde con los 6,6 ms ( $2\pi/3$  de  $\omega t$ ), propios de una distribución trifásica. En la Fig. 8 se muestra tanto la tensión como la corriente de salida, donde se puede ver el pequeño rizado que tienen ambas, usando un condensador de película de plástico de valor 10 μF.

Es importante reseñar, que el rizado de 300Hz, que es apreciable en la forma de onda de la tensión de salida proviene de las no idealidades de las celdas o de la tensión de entrada. Esto hace que la potencia demandada por cada fase sea distinta provocando por tanto la variación que se observa en la Fig. 8 de la tensión y la corriente en los HB-LED.

El concepto de la fuente de alimentación para HB-LED propuesta se validará mediante varias medidas. En primer lugar se realizará una validación de la fuente en función de la atenuación de la luz. Para ello se varía la corriente de salida: 1,8A (plena carga), 0,9A y 0,45A. En segundo lugar, la fuente de alimentación necesita operar en todo el rango de tensiones de la trifásica europea y por ello se tomarán tres puntos de operación, 380, 400 y 420V.

Para analizar correctamente las formas de onda en todos los escenarios, se han extraído del osciloscopio datos, que posteriormente se procesaron con MATLAB®, que han completado el cálculo de: rendimiento, DAT, FP, armónicos para la regulación con la Clase C de la norma IEC 1000-3-2 [10-12] y la recomendación sobre el parpadeo de la luz en los HB-LED (*flicker*) [19,20] para la validación del *dimming*.

### B. Validación de la fuente de alimentación en función de la corriente de salida.

El FP y DAT para diferentes puntos de atenuación de luz, se muestran en la Tabla III para cada fase. A su vez se puede observar que la DAT crece al decrecer FP, no obstante se puede observar que el DAT es realmente pequeño incluso en los puntos más desfavorables que serían los de menor demanda de potencia. La Fig. 9 se muestra el rendimiento en función de la corriente a la salida. Tal y como se puede observar, la fuente de alimentación muestra un 88% de rendimiento a plena carga y un 73% en el punto de atenuación total de luz. Aunque el rendimiento obtenido esté por encima de la solución para limentación trifásica de HB-LED basada en autotransformador reducir más fuente de alimentación monofásica, está lejos de ser óptimo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el objeto

del prototipo construido no ha sido la optimización del rendimiento sino verificar el concepto: alimentar HB-LED desde redes trifásicas. Es más, dicho rendimiento depende completamente del convertidor CC/CC utilizado como celda, siendo bien conocidas las limitaciones de un convertidor *flyback* en cuanto a rendimiento. De hecho, el rendimiento total del sistema será una media del rendimiento de las celdas teniendo en cuenta la caída de tensión en el diodo que tiene asociado cada una de ellas en la estructura trifásica (Fig. 1).

TABLA III. RESUMEN DE VALORES DE DAT Y FP PARA TRES VALORES DIFERENTES DE CORRIENTE DE SALIDA

Output Current/Phase		1,8A	0,9A	0,45A
R	FP[%]	99,81	99,72	99,56
	DAT[%]	5,71	6,97	8,03
S	FP[%]	99,87	99,75	99,59
	DAT[%]	4,62	6,96	7,71
T	FP[%]	99,85	99,73	99,58
	DAT[%]	5,26	6,86	7,97

Las formas de onda capturadas se han utilizado, además, para extraer los armónicos mediante la aplicación de la serie de Fourier. Una vez extraídos, los armónicos se han comparado

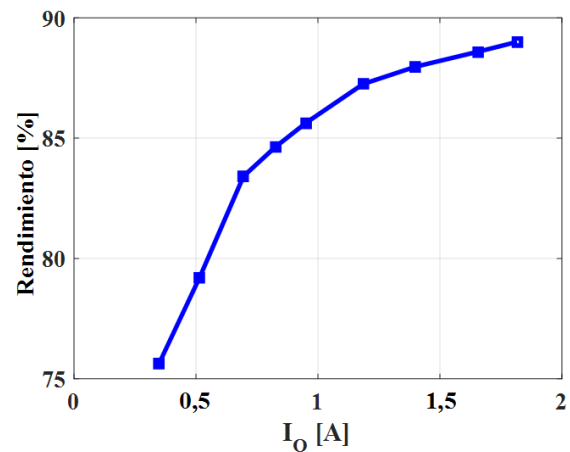


Fig. 9. Rendimiento frente a la corriente de salida.

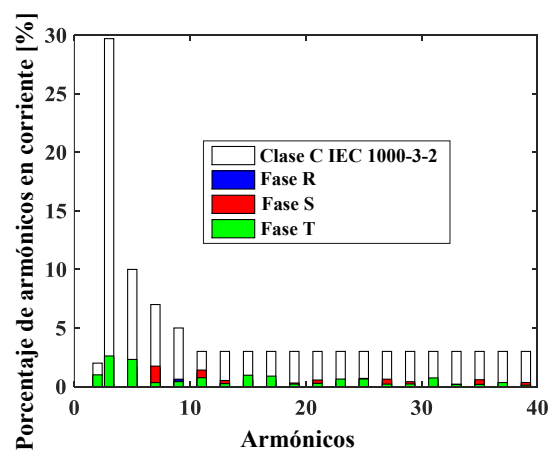


Fig. 10. Contenido armónico de cada fase comparado con la regulación de clase C.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto y comprobado el funcionamiento de una fuente de alimentación para CA/CC trifásica para la alimentación de HB-LED. La fuente presenta un alto FP y una baja DAT. También, garantiza el cumplimiento de la normativa IEC 1000-3-2 para la Clase C. El análisis llevado a cabo a diferentes niveles de atenuación de luz muestra que no existe ningún tipo de *flicker* que pueda tener consecuencias a corto o largo plazo sobre la salud. Finalmente, con esta solución se garantiza una vida útil muy alta debido a la eliminación del condensador electrolítico. Esto hace a esta solución adecuada para la alimentación de HB-LED en entornos con acceso de CA trifásica.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado mediante la financiación del Gobierno de España a través del proyecto DPI2013-47176-C2-2-R, mediante la financiación del Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto FC-15-GRUPIN14-143 y de la Beca Predoctoral "Severo Ochoa"BP14-140 y los fondos FEDER.

#### REFERENCIAS

- [1] Gray, G.; "Demystifying 347V and 480V Lighting Installations," e-Craftsmen.
- [2] "480V to 277V Step-Down Autotransformers For applications up to 375 Watts", GE lighting.
- [3] Singh, Bhim; Singh, B.N.; Chandra, A.; Al-Haddad, K.; Pandey, A.; Kothari, D.P., "A review of three-phase improved power quality AC-DC converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.51, no.3, pp.641,660, June 2004
- [4] Roger F. Brewster; Alfred H. Barret, "Three Phase AC to DC voltage converter with Power Line Harmonic Current Reduction", U.S. patent 4 143 414, March 6, 1979.
- [5] Singer, S.; Fuchs, A., "Multiphase AC-DC conversion by means of loss-free resistive networks," *Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings -*, vol.143, no.4, pp.233,240, Aug 1996
- [6] J. Sebastian, I. Castro, D. G. Lamar, A. Vázquez and K. Martin, "High Power Factor Modular Polyphase AC/DC Converters with Galvanic Isolation based on Resistor Emulators," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016.
- [7] Kamnarn, U.; Chunkag, V., "Analysis and Design of a Modular Three-Phase AC-to-DC Converter Using CUK Rectifier Module With Nearly Unity Power Factor and Fast Dynamic Response," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.8, pp.2000,2012, Aug. 2009
- [8] Tibola, G.; Barbi, I., "Isolated Three-Phase High Power Factor Rectifier Based on the SEPIC Converter Operating in Discontinuous Conduction Mode," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, no.11, pp.4962-4969, Nov. 2013
- [9] Draft of the Proposed CLC Common Modification to IEC 61000-3-2 Document, 2006.
- [10] Draft of the Proposed CLC Common Modification to IEC 61000-3-2/A2 Document, 2010.
- [11] Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 3: Limits-Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input current < 16 A per Phase), IEC1000-3-2, 1995.
- [12] Sabahi, M.; Hosseini, S.H.; Sharifian, M.B.B.; Goharrizi, A.Y.; Gharehpetian, G.B., "A Three-Phase Dimmable Lighting System Using a Bidirectional Power Electronic Transformer," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.3, pp.830,837, March 2009
- [13] Erickson, R.; Madigan, M.; Singer, S., "Design of a simple high-power-factor rectifier based on the flyback converter," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990. APEC '90, Conference Proceedings 1990, Fifth Annual*, vol., no., pp.792,801, 11-16 March 1990
- [14] Glaser, J.S.; Witulski, A.F., "Application of a constant-output-power converter in multiple-module converter systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE*, vol., no., pp.909-916 vol.2, 29 Jun-3 Jul 1992
- [15] Yuehui Huang; Tse, C.K., "Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC-DC Converters," in *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol.54, no.5, pp.1099-1108, May 2007
- [16] Yuehui Huang; Tse, C.K., "Classification of parallel DC/DC converters part II: Comparisons and experimental verifications," in *Circuit Theory and Design, 2007. ECCTD 2007. 18th European Conference on*, vol., no., pp.1014-1017, 27-30 Aug. 2007
- [17] Ridley, R.B "Average small-signal analysis of the boost power factor correction circuit", *VPEC Seminar Proceedings*, 1989, pp. 108-120
- [18] Mather, B.A.; Maksimovic, D., "Quantization effects and limit cycling in digitally controlled single-phase PFC rectifiers," in *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, vol., no., pp.1297-1303, 15-19 June 2008
- [19] "RP-16-10, Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering", *Illuminating Engineering Society*.
- [20] IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers," in *IEEE Std 1789-2015*, vol., no., pp.1-80, June 5 2015.

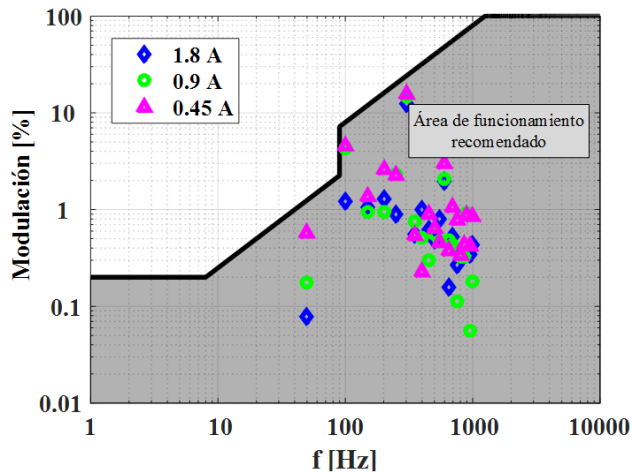


Fig 11. Área de funcionamiento recomendada para evitar el Flicker, P1789 [19].

con los límites armónicos de Clase A de la normativa IEC 1000-3-2 al tratarse de una fuente de alimentación trifásica. Sin embargo, dado que los límites de la Clase A son absolutos y el nivel de potencia manejado por la fuente de alimentación es bajo, ya era obvio antes de su comprobación su cumplimiento. Es éste el motivo que lleva a comparar el contenido armónico con la Clase C, aparte del hecho de que sea una fuente de alimentación para iluminación. En la Fig. 10 se puede observar la comparativa del contenido armónico de cada fase en relación a los límites impuestos por la Clase C. Tal y como se muestra, la fuente de alimentación propuesta cumple la normativa.

Para limitar los efectos biológicos perjudiciales para la salud humana y detectar el *flicker* de la luminaria, el valor de la Modulación (%), expresada en (6), debe mantenerse dentro de los límites de la región sombreada definida en [19]:

$$\text{Modulación (\%)} = 100 \cdot \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{(L_{\max} + L_{\min})} \quad (6)$$

donde  $L_{\max}$  y  $L_{\min}$  se corresponden con el máximo y el mínimo de la luminancia para cada uno de los armónicos que induce en los HB-LED la componente de alterna que pueda contener la corriente de salida.

En este caso, para su cálculo se considera la proporcionalidad entre luminancia y las componentes de alterna de la corriente de salida en los HB-LED. Los resultados de este análisis se muestran en la Fig. 11 para 1,8A, 0,9A y 0,45A medios a la salida, ya que en el punto de atenuación total no hay luz (se consideran los 50Hz como la frecuencia fundamental). Tal y como se puede ver, todos los armónicos de las componentes de alterna en el rango de frecuencia hasta 3kHz se encuentran dentro de la región recomendada, incluso aquellos de frecuencias menores de 90Hz, que son los más críticos. Por lo tanto, se puede garantizar una buena calidad de luz y evitar los efectos nocivos para la salud.