

INTEGRACIÓN DE TOPOLOGÍAS PARA ALUMBRADO PÚBLICO E INYECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A LA RED A PARTIR DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

Jesús Uriel Baltazar Hernández

Tecnológico Nacional de México en Celaya
jessurbalt@gmail.com

Elías José Juan Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México en Celaya
elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

José Antonio Beristáin Jiménez

Tecnológico Nacional de México en Sonora
jose.beristain@itson.edu.mx

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un convertidor para aplicación en un sistema de iluminación vial e inyección de energía a la red eléctrica. La propuesta actúa de tal manera que durante la noche funciona como controlador para una lámpara de LEDs, mientras que por el día inyecta toda la energía proveniente del panel fotovoltaico a la red eléctrica. La topología que se presenta está basada en la integración de un microinversor con un convertidor reductor-flyback. Se muestra un análisis detallado del funcionamiento de la topología, las ecuaciones de diseño y resultados de simulación. Así mismo, se presentan los resultados experimentales del prototipo en modo microinversor.

Palabra(s) Clave: Baterías, Controlador LEDs, Flyback, Iluminación vial y Microinversor.

Abstract

This paper presents the development of a converter applied to street lighting system and energy injection to the grid. The proposed converter works as LED driver during the night, while during the day, the converter inject all the energy produced of photovoltaic panel to the grid. The topology is based on the integration of microinverter and buck-flyback converter. The analysis, equations and numeric

simulations results of the converter are presented. Finally, experimental results of a microinverter prototype are presented.

Keywords: *Batteries, LEDs Driver, Flyback, Street light LED and Microinverter.*

1. Introducción

Hoy en día con el crecimiento demográfico y el agotamiento de los combustibles fósiles, se ha ido incrementando el uso de las energías renovables, así como el uso tecnologías que no dañen al medio ambiente [1]. Estas nuevas fuentes de energía son una buena opción para el suministro de energía eléctrica en muchas áreas, como por ejemplo en iluminación. Una de las mejoras que se están realizando en los sistemas de iluminación, es el reemplazo de lámparas de vapor de sodio por luminarias a base de diodos emisores de luz (LEDs, por sus siglas en inglés) ya que presentan varias ventajas tales como: bajo costo y consumo de energía, tienen periodo largo de vida de hasta 50,000 horas y además de que no contaminan [2]. También se está optando por sistemas autónomos, en los que integran un panel fotovoltaico (PF) y una batería. En éstos, la energía se recolecta durante el día a través del PF y es almacenada en la batería para su posterior uso (en la noche) y alimentar la luminaria LED. Sin embargo, a pesar de que este último sistema presenta una mejora, utiliza un componente crítico: la batería. Algunos de los elementos de los que se compone son el litio, mercurio, plomo, cadmio y níquel los cuales son sumamente tóxicos. Estudios realizados han demostrado que la producción, desecho y reciclado de las baterías puede traer varios problemas a la salud (dermatitis, daños renales, problemas gastrointestinales, edema pulmonar, entre otras) y al medio ambiente (contaminación de ríos, suelo y aire) [3]. Considerando lo anterior, una solución es eliminar la batería del sistema de iluminación y utilizar la red eléctrica como centro de almacenamiento como se muestra en la (figura 1). De esta manera, existirá un equilibrio entre la energía que se entrega a la red y la que se consume. En el sistema de iluminación propuesto, un convertidor realiza la tarea de entregar o extraer energía de la red. Por lo tanto, los tres principales objetivos de este trabajo son: proponer, diseñar e implementar una topología que realice las funciones anteriormente mencionadas.

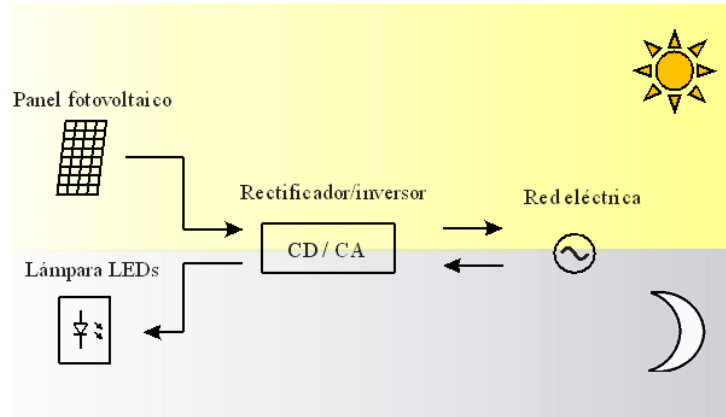


Figura 1 Esquema del sistema de iluminación propuesto.

Para ello es necesario seguir la siguiente metodología:

- Investigación de inversores con conexión a la red y balastos para lámparas LED.
- Proponer una topología en base a la investigación anterior.
- Diseñar y simular la topología propuesta.
- Desarrollar un prototipo.
- Realizar pruebas experimentales.

2. Desarrollo

Antecedentes inversores con conexión a la red y balastos luminarias LED

Como en el sistema de iluminación propuesto se utilizará un solo panel fotovoltaico, la configuración más conveniente para este trabajo es el llamado microinversor o también llamado módulo CA. Este esquema trabaja en rangos de potencia de 100 a 500 W. Tiene la ventaja de fácil interconexión y menos pérdidas respecto a otro tipo de configuraciones. Algunos ejemplos de este tipo son los presentados en [4, 5, 6, 7]. Pueden ser con enlace de CD [4] o con seudo enlace de CD [5, 6, 7]. En los primeros se utiliza una etapa para elevar el voltaje de la entrada al voltaje pico de la red mientras que los segundos funcionan como fuente de corriente. Un microinversor con seudo enlace de CD basado en un convertidor flyback ofrece muchas ventajas debido a su simplicidad, mayor fiabilidad, bajo costo, aislamiento galvánico y control simple [8]. Para su desarrollo es necesario tomar en

cuenta la norma CFE-G0100-04, en donde se detallan las especificaciones para interconexión a la red eléctrica de baja tensión las cuales son [9]:

- Rango de frecuencia: 59.2 – 60.8 Hz
- Distorsión Armónica Total de corriente: <5%
- Factor de Potencia: >0.9

Para el balastro de la lámpara LED, es necesario utilizar una configuración de tal manera que pueda integrarse con el inversor. En la literatura existe un número considerable de controladores de lámparas LED. Pueden ser de una sola etapa como por ejemplo un convertidor elevador [10] o de dos etapas como el presentado en [11], donde se integra un convertidor reductor y un flyback. De acuerdo a la norma NOM-031-ENER-2012 los balastos deberán cumplir las siguientes especificaciones [12]:

- Eficacia lumínica mínima: 70 lúmenes/W
- Distorsión Armónica Total de corriente: <20%
- Factor de Potencia: >0.9

Topología propuesta

La topología propuesta (figura 2) está basada en la integración de un microinversor flyback [6] con un convertidor reductor-flyback [11]. Ambos convertidores operan en modo de conducción discontinua. Se añadió un interruptor extra llamado S_{SEL} , el cual tiene la función de evitar que un modo de operación entre en función cuando no sea requerido, por ejemplo, que la lámpara encienda durante el día. Modos de operación:

- **Modo microinversor.** En modo microinversor (figura 3) el interruptor S_{SEL} se encuentra abierto. El PF convierte la energía proveniente del sol en energía eléctrica. Enseguida se tiene un diodo D_1 para evitar que la corriente retorne al PF y éste se dañe. Un condensador C_{in} mantiene el voltaje y la corriente constante, lo cual ayudará a realizar el MPPT (Seguimiento del punto de máxima potencia, por sus siglas en inglés). Posteriormente un convertidor Flyback tiene la función de generar una corriente sinusoidal rectificada en su

salida, la cual está a frecuencia de la red eléctrica (60 Hz). La corriente anterior entra a un puente completo el cual es conmutado en pares (S_1 con S_3 y S_2 con S_4) a frecuencia de la red eléctrica. Finalmente, es utilizado un filtro C_L a la salida para eliminar las componentes armónicas de la corriente haciendo que ésta sea lo más parecido a una forma de onda sinusoidal. Las ecuaciones para este modo de operación se presentan en tabla 1.

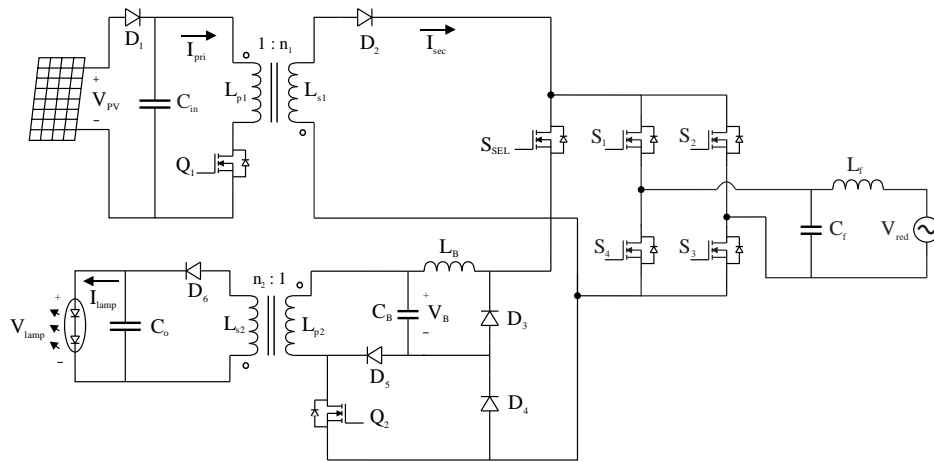


Figura 2 Topología propuesta.

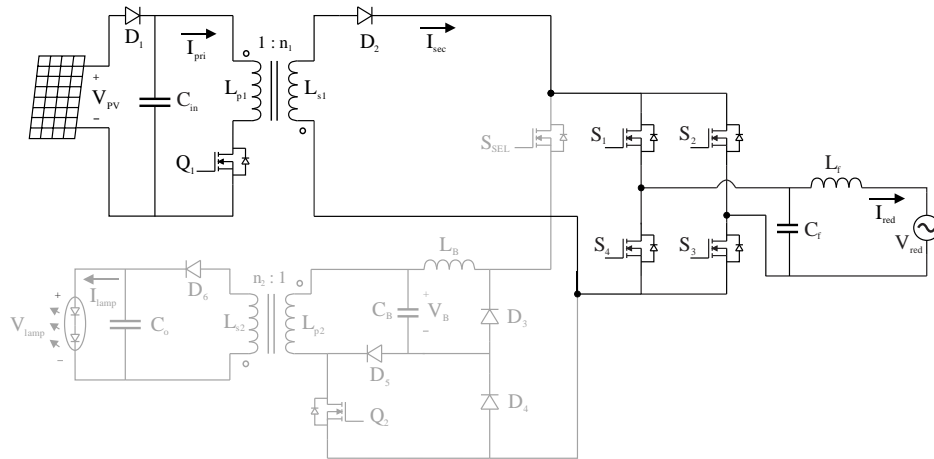


Figura 3 Modo microinversor.

- **Modo balastro.** Para este modo (figura 4) el interruptor S_{SEL} se encuentra cerrado. El puente completo rectifica el voltaje de la red eléctrica. Para ello los interruptores S_1 - S_4 se encuentran apagados. Enseguida se tiene un convertidor reductor con un convertidor Flyback. El primero tiene la función

de obtener un alto factor de potencia mientras que el segundo además de proveer aislamiento entre la lámpara y la red eléctrica realiza el control para mantener la corriente de la lámpara constante.

Tabla 1 Ecuaciones para modo microinversor.

Máximo ciclo de trabajo	$\lambda = \frac{V_{PV}}{V_{red,pico}} \quad (1)$
	$D \leq \left(1 + \frac{\lambda}{n}\right)^{-1} \quad (2)$
Corriente inyectada a la red eléctrica	$I_o = \frac{(2)(P_{panel})}{V_{red}} \quad (3)$
Corriente pico en devanado secundario del flyback	$I_{sec} = \frac{(f_s)(n)(I_o)(T_s)(2)}{(D)(\lambda)} \quad (4)$
Corriente pico en devanado primario del flyback	$I_{pri} = \frac{(I_{sec})}{n} \quad (5)$
Inductancia del devanado primario del transformador	$L_{p1} = \frac{(V_{pv})(D)}{(I_{pri})(f_s)} \quad (6)$
Inductancia del devanado secundario del transformador	$L_{s1} = \frac{L_{p1}}{n^2} \quad (7)$

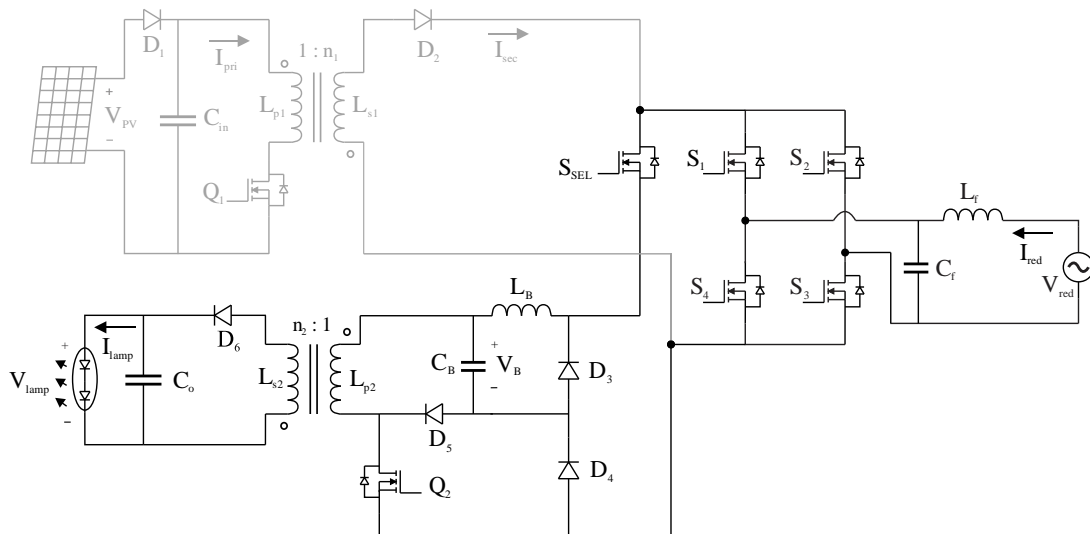


Figura 4 Modo balastro.

La tabla 2 muestra las ecuaciones para este modo balastro.

Tabla 2 Ecuaciones para modo balastro.

Ciclo de trabajo del balastro	$D_2 = \sin\left(\frac{180^\circ - \theta}{2}\right)$	(8)
Voltaje de salida del reductor	$V_B = (D_2)(V_{red})$	(9)
Potencia de salida balastro	$P_{salida} = \frac{(V_B)^2(D^2)}{(2)(L_{pri2})(f_{s2})}$	10)
Inductancia devanado primario	$L_{p2} = \frac{V_B^2 D_2^2}{2P_{salida} f_{s2}}$	(11)
Ángulo de conducción	$\alpha = \frac{V_{red}^2}{2V_B^2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{V_B}{V_{red}}\right) - \frac{1}{\pi V_B} \sqrt{V_{red}^2 - V_B^2}$	(12)
Inductancia del reductor	$L_B = (\alpha)(L_{p2})$	(13)
Relación de transformación	$n = \frac{(V_B)(D_2)(T_{s2})}{(V_{lamp})(t_{on2})}$	(14)

Diseño

Los parámetros de diseño del convertidor se detallan en la tabla 3. Con los valores de la tabla 3 y utilizando las ecuaciones de diseño del microinversor y el balastro, se obtuvieron los valores del convertidor mostrados en la tabla 4.

Tabla 3 Parámetros de diseño.

Características del módulo solar ERDM-SOLAR 150P6		Características de la lámpara LEDs MAGG CITI 55	
Potencia máxima	150 W	Potencia	53 W
Voltaje circuito abierto	22.12 V	Voltaje de alimentación	50.3 V
Voltaje óptimo de operación	18.45 V	Corriente de alimentación	1.04 A
Corriente de corto circuito	8.62 A	Resistencia	47.9 Ω
Corriente optima de operación	8.15 A		

Tabla 4 Cálculos obtenidos.

Parámetros del microinversor		Parámetros del controlador para lámpara LEDs	
f_{s1}	26 kHz	f_{s2}	50 kHz
D_1	0.7	D_2	0.27
n_1	0.5	n_2	0.5
L_{p1}	10.86 μH	L_{p2}	35.75 μH
L_{s1}	43.43 μH	L_{s2}	146.31 μH
C_f	0.47 μF	L_B	153.8 μH
L_f	3 mH	C_B	470 μF
		C_o	1 μF

3. Resultados

Simulación modo microinversor

Para validar los parámetros de diseño a continuación se muestran una serie de gráficas obtenidas a través del software PSIM. El diagrama de simulación para el modo microinversor se muestra en la (figura 5).

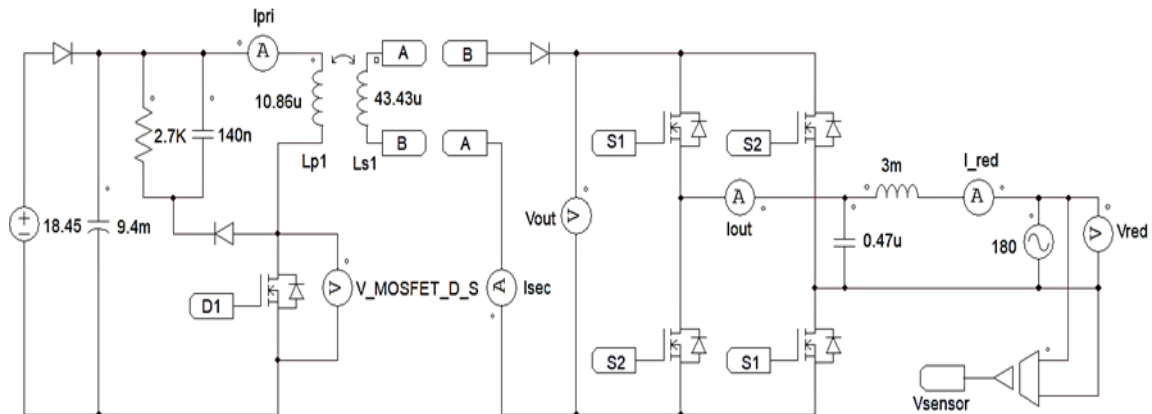


Figura 5 Diagrama de simulación del microinversor.

En la figura 6 se muestran las corrientes pico en los devanados primario y secundario del transformador Flyback. El máximo valor obtenido de la corriente primaria es de 46 amperes (A), mientras que en el secundario es de 23 A.

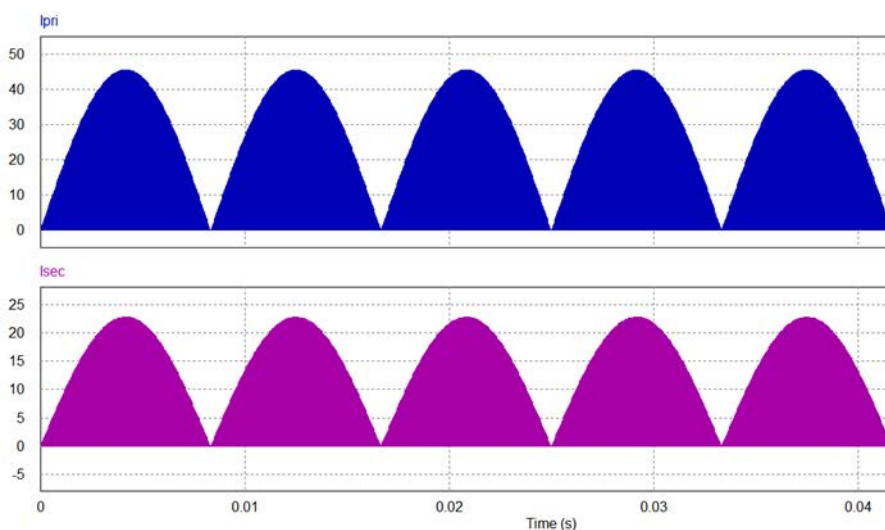


Figura 6 Corriente pico en devanado primario (azul) y secundario (magenta) del flyback.

En la figura 7 se muestra la corriente de salida, la cual es inyectada a la red y tiene un valor pico de 1.67 A. Se obtuvo una distorsión armónica total en corriente del 3.9% el cual cumple con los requerimientos de la norma CFE-G0100-04.

En esa misma figura también se muestra el voltaje de la red y la potencia de salida la cual es de un valor promedio de 147 Watts (W).

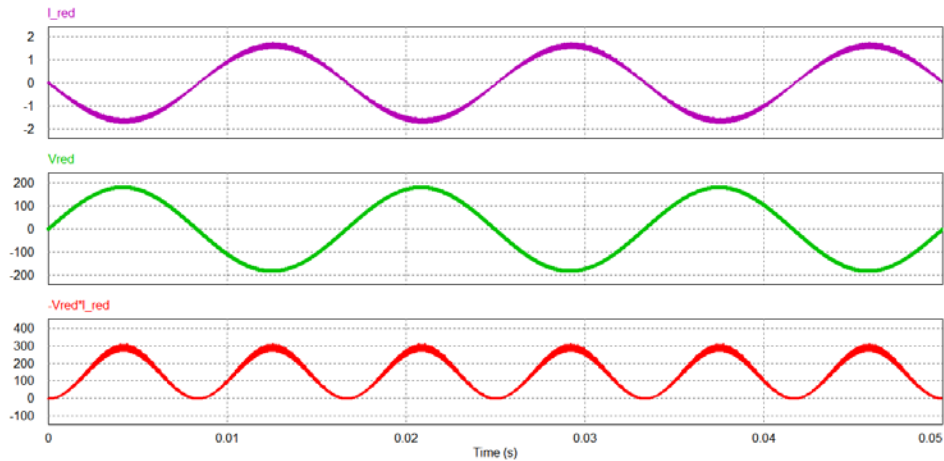


Figura 7 Corriente salida (magenta), voltaje de red eléctrica (verde) y potencia de salida.

Simulación modo balastro

El diagrama de simulación para el balastro se muestra en la figura 8. En la figura 9 se tiene la corriente demandada de la red eléctrica por la lámpara. La distorsión armónica total obtenida es del 18.63% y un factor de potencia de 0.98. Por lo tanto, el diseño cumple con las especificaciones de NOM-031-ENER-2012.

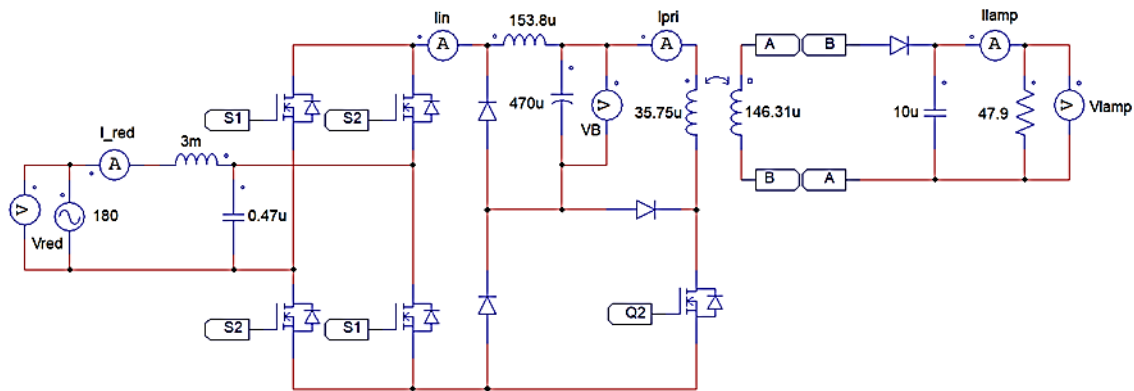


Figura 8 Diagrama de simulación del balastro.

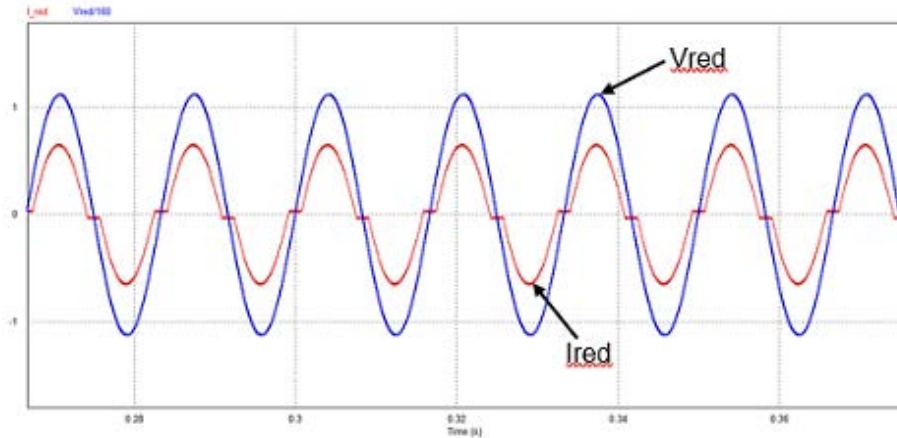


Figura 9 Corriente demanda de la red eléctrica.

En la figura 10 se observa la corriente de salida hacia los LEDs, la cual es de un valor promedio de 1 A. Así mismo se observa el voltaje de salida el cual alcanza un valor promedio de 50 V. Ambos resultados cumplen con las especificaciones de la luminaria LEDs.

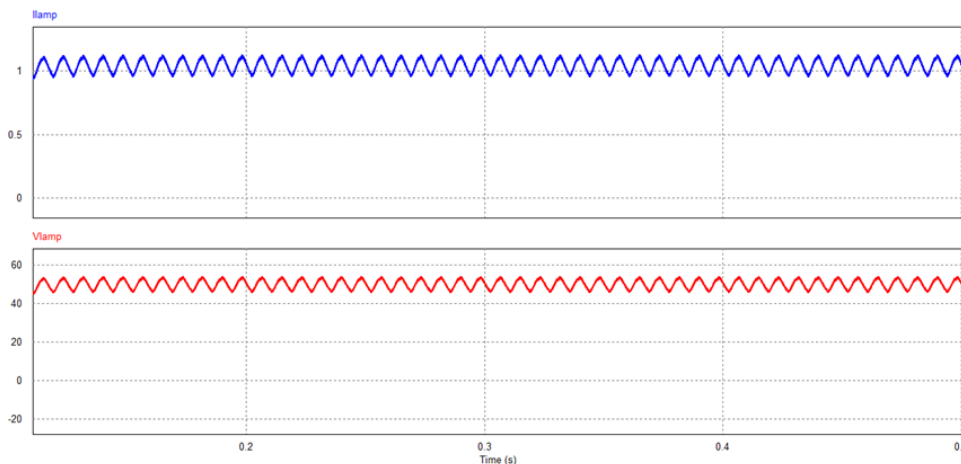


Figura 10 Corriente (azul) y voltaje (rojo) de la lámpara.

Simulación cambio de modo de operación

En la figura 11 se muestra el cambio de operación de modo microinversor a modo balastro. Como se observa la corriente pasa de estar desfasada 180 grados (inyección de energía a la red) a estar en fase con el voltaje de la red (demanda de energía de la red). En la misma imagen también se observa el encendido de la lámpara al realizarse el cambio de modo de operación.

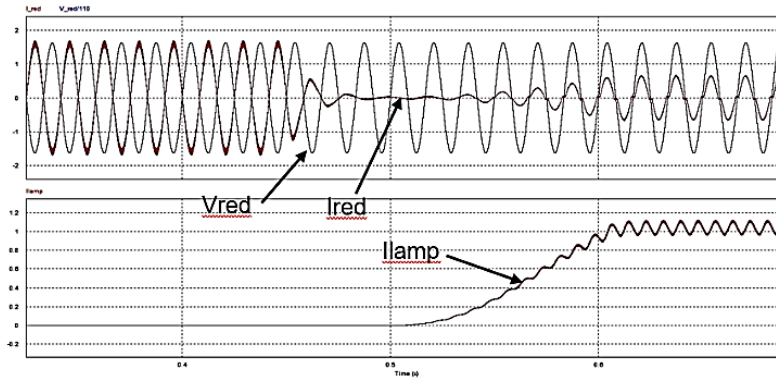


Figura 11 Cambio de modo de operación: microinversor-balastro.

En la figura 12 se muestra el cambio de operación de balastro a modo microinversor. En este caso se observa el apagado de la luminaria al realizarse el cambio.

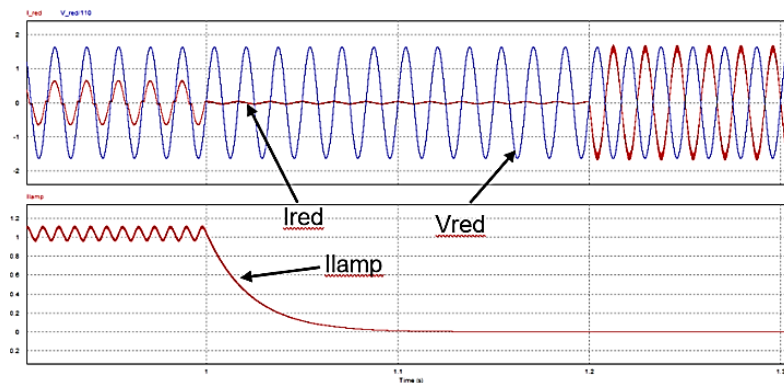


Figura 12 Cambio de modo de operación: balastro-microinversor.

Resultados experimentales del prototipo

Se realizó un prototipo solo considerando la etapa del microinversor. La descripción de éste se presenta en la figura 13.

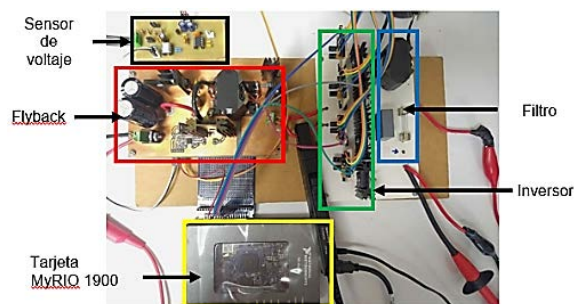


Figura 13 Prototipo de microinversor.

Prueba con carga resistiva

Se realizaron pruebas del prototipo con carga resistiva antes de ser conectado a la red eléctrica. Los parámetros utilizados para esta prueba se especifican en tabla 3.

Tabla 5 Parámetros de entrada, con carga resistiva.

Parámetro	Valor
Voltaje de la fuente	17.9 V
Corriente de entrada	5.5 A
Potencia de entrada	100 W
Resistencia	125 Ω
Ciclo de trabajo	0.6

En la figura 14 se muestran las corrientes pico de los devanados primario y secundario del transformador flyback. La corriente pico del primario es de 30 A, mientras que la del secundario es de 15 A.

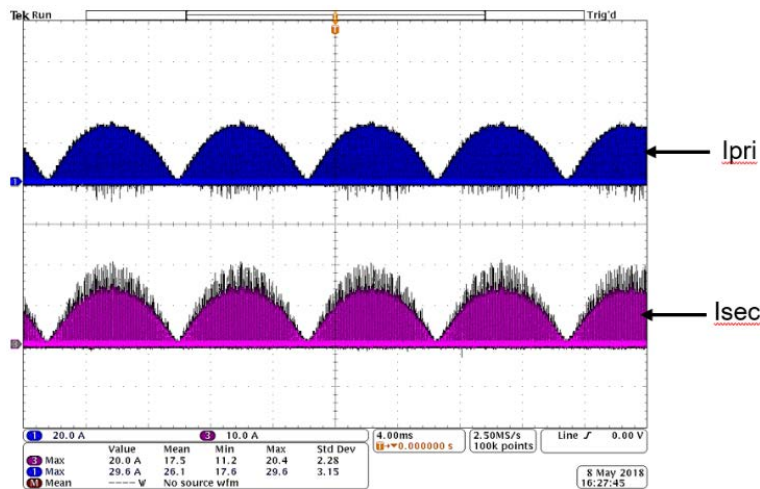


Figura 14 Corriente pico del devanado primario y secundario del transformador flyback.

La corriente de salida se muestra en la figura 15. El máximo valor alcanzado fue de aproximadamente 1 A. El voltaje de salida es de 136 V pico y la potencia promedio de salida obtenida es de 65 W.

Prueba con conexión a la red

Los parámetros utilizados para esta prueba se especifican en la tabla 6. En la figura 16 se muestran los resultados del prototipo con conexión a la red eléctrica.

La corriente inyectada es la señal del canal 3 (color magenta). La señal del canal 4 (color verde) es el voltaje rectificado de la red eléctrica visto a la salida del convertidor flyback y la señal del canal 1 (color azul) es el voltaje de la red eléctrica.

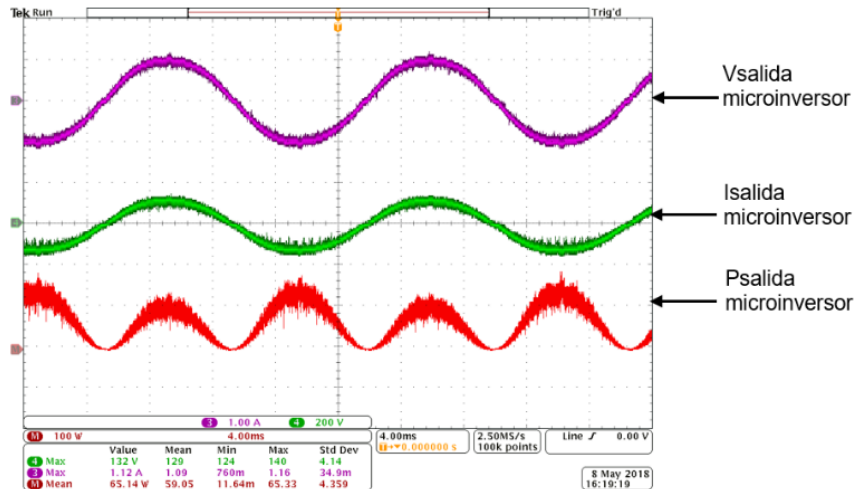


Figura 15 Corriente, voltaje y potencia de salida del microinversor con carga resistiva.

Tabla 6 Parámetros de entrada, con conexión a la red

Parámetro	Valor
Voltaje de la fuente	17.9 V
Corriente de entrada	3.3 A
Potencia de entrada	60 W
Voltaje pico de la red eléctrica	180 V
Ciclo de trabajo	0.4

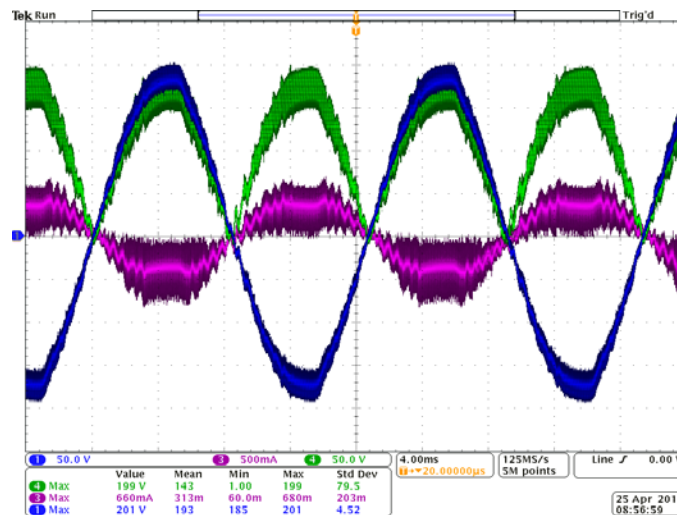


Figura 16 Inyección de corriente a la red eléctrica.

4. Conclusiones

El primer objetivo de este trabajo se logró satisfactoriamente, se propuso una topología basada en la unión de dos convertidores para ser aplicado en sistemas de iluminación vial. Los resultados de simulación demostraron el correcto funcionamiento de la topología obteniéndose resultados apropiados, por lo que el diseño fue adecuado. Por otra parte, fueron verificados los resultados experimentales de un prototipo de 100 W de la etapa del microinversor con carga resistiva, en donde se obtuvo una baja eficiencia del 65% debido principalmente a las pérdidas del transformador y del interruptor en el flyback. En conexión a la red se realizaron pruebas a una potencia de 60 W de entrada, sin embargo, la corriente presentó ruido debido al inductor de salida.

A pesar de que se presentaron los problemas anteriores (baja eficiencia y ruido en la corriente de salida) queda el antecedente de que la topología (modo microinversor) funciona.

Los trabajos futuros que quedan por realizar a este trabajo son:

- Implementar el balastro para la lámpara LEDs e integrarlo con el microinversor desarrollado.
- Mejorar la etapa del microinversor para que opere a una potencia de 150 W prestando especial atención en el diseño del transformador y del inductor de salida.
- Proponer una estrategia de control para realizar las dos funciones el cual pueda cambiar de un modo de operación a otro.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Hussain, S. Muhammad and M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, no. 1, pp. 12-28, May 2017.
- [2] Philips, «Philips Soporte,»: <http://www.lighting.philips.com.mx/soporte/soporte/preguntas-frecuentes/life-and-light-output/a-life-of-50000-hours>.
- [3] U.S. Department of Health & Human Services, "Agency for Toxic Substances and Disease Registry": <https://www.atsdr.cdc.gov/>.

- [4] Y. Zhao, T. Wei, H. Hu and Y. Xing, "A high-efficiency PV grid-tied micro-inverter," in 2015 IEEE 10th Conference on Industrial, Auckland, New Zealand, 2015.
- [5] Y.-H. Kim, S.-C. Shin, J.-H. Lee and Y.-C. Jung, "Design and Implementation of a Microinverter for Solar PV Rooftops," IEEE TRANSACTIONS ON, vol. 29, no. 2, pp. 863-872, 2014.
- [6] B.-Y. Choi, J.-W. Jang, Y.-H. Kim, Y.-H. Ji, Y.-C. Jung and C.-Y. Won, "Current Sensorless MPPT using Photovoltaic AC Module-Type Flyback inverter," in 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics , Taipei, Taiwan , 2013.
- [7] D. Meneses , O. García, P. Alou, . J. A. Oliver, R. Prieto and J. A. Cobos, "Single-Stage Grid-Connected Forward Microinverter with Constant Off-Time Boundary Mode Control," in 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2012..
- [8] G. C. Christidis, A. C. Nanakos and E. C. Tatakis, "Analysis of a Flyback Current Source Inverter under Hybrid DCM-BCM Operation," in 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, Switzerland, 2015.
- [9] CFE, "Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad de hasta 30 kW," : <http://www.cfe.com.mx>.
- [10] M. S. Abd El-Moniem, H. Z. Azazi and . S. A. Mahmoud, "A current sensorless power factor correction control for LED lamp driver," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 69-79, 2014.
- [11] P. C.V. Luz, M. R. Cosetin, P. E. Bolzan, T. Maboni, M. F da Silva and R. N. do Prado, "An Integrated Insulated Buck-Flyback Converter to Feed LED's Lamps to Street Lighting with Reduced Capacitances," in Industrial Technology 2015 IEEE International Conference, Santa Maria, Brazil, 2015.
- [12] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "gob.mx," 15 Marzo 2015: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/laboratorios-de-prueba-certificacion-nom-031-ener-2012>.