

# Diseño de convertidor reductor de doble entrada (TIBuck) como driver de LEDs para comunicaciones por luz visible (VLC) basado en el reparto de la potencia.

Daniel G. Aller<sup>1</sup>, Diego G. Lamar<sup>1</sup>, Manuel Arias<sup>1</sup>, Juan Rodríguez<sup>2</sup>, Pablo F. Miaja<sup>1</sup>, and Javier Sebastián<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Univ. de Oviedo, Gijón, España.

<sup>2</sup>Centro de Electrónica Industrial (CEI), Univ. Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España.

## Abstract:

Este trabajo propone la modificación de un convertidor reductor de doble entrada (TIBuck) como driver de alto rendimiento para LEDs y transmisor de comunicaciones por luz visible (VLC). La propuesta aprovecha las ventajas del TIBuck, como el menor contenido armónico en la tensión de salida, el menor estrés de tensión y menores pérdidas de conmutación en los dispositivos en comparación con el convertidor reductor tradicional, haciéndolo especialmente interesante para trabajar a altas frecuencias de conmutación. Esto hace que el convertidor TIBuck supere al convertidor reductor tradicional en términos de rendimiento y ancho de banda.

La segunda tensión necesaria para el convertidor TIBuck es proporcionada mediante un convertidor reductor auxiliar funcionando a menor frecuencia de conmutación que el TIBuck. Este convertidor auxiliar además implementa la función de control de corriente media por la carga de LEDs, mientras que el TIBuck únicamente reproduce la señal de comunicaciones necesaria para la transmisión VLC.

El rendimiento del convertidor es mejorado al reducir la cantidad de potencia que es procesada a alta frecuencia. La mayor parte de la potencia es procesada por el convertidor reductor auxiliar de baja frecuencia. Como resultados experimentales, se presenta el diseño de un convertidor TIBuck basado en dos convertidores reductores, uno de baja y otro de alta frecuencia, conectados en paralelo con respecto a la carga. La propuesta alcanza un rendimiento del 94 %, reproduciendo una modulación digital 64-QAM, alcanzando un tasa binaria máxima de 1.5 Mbps.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de las comunicaciones inalámbricas están basadas en el espectro de radiofrecuencia

Este trabajo está financiado en parte por los fondos Europeos de Desarrollo Regional, en parte por el Gobierno Español bajo el proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R, PID2019-110483RB-I00 y RTI2018-099682-A-I00 y en parte por el Gobierno del Principado de Asturias bajo el proyecto IDI/2018/000179 y la beca BP17-91.

Email: garciaadaniel@uniovi.es

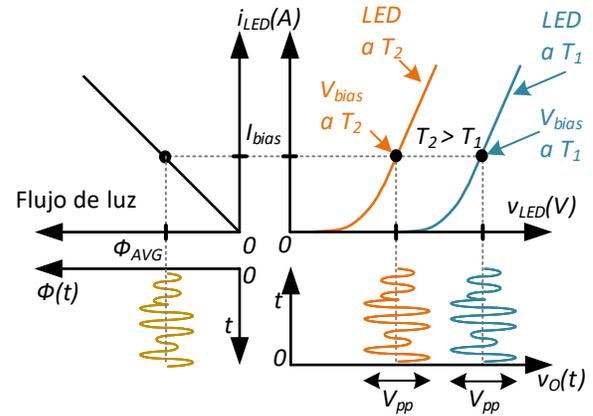


Fig. 1: Efecto de la temperatura sobre las curva tensión corriente en un LED.

(Radio frequency, RF), como por ejemplo en tecnologías como WiFi, Bluetooth, 5G, etc. Además, se predice un constante incremento del uso de comunicaciones inalámbricas en los próximos años, lo que llevará a mayores restricciones sobre el uso del espectro RF y mayor congestión [1].

Una de las soluciones que se ha propuesto en los últimos años es la utilización del espectro de luz visible para comunicaciones (Visible Light Communication, VLC) como una alternativa al espectro de RF. La tecnología VLC resulta especialmente interesante en entornos o aplicaciones donde ya hay una infraestructura de iluminación basada en LED o en entornos donde el espectro RF esté limitado o no es una opción viable (aviones, hospitales, etc) [2]–[4]. La tecnología VLC aprovecha el despliegue de sistemas de iluminación basados en LEDs (Solid-State Lighting, SSL), en los cuales se usa la posibilidad que brindan los LEDs de poder modular la luz emitida por los mismos.

Para poder utilizar LEDs en un sistema VLC, el transmisor ha de ser capaz de realizar dos tareas: polarizar los LEDs y

generar la señal de comunicaciones. La función principal de un driver de LEDs es mantener un nivel de polarización del cual depende la iluminación media que emite. La polarización se realiza controlando la corriente media que circula por el LED, independientemente de cualquier efecto que modifique la respuesta del LED (e.g. incremento de temperatura) como puede verse en la figura 1. En ella se observa el efecto de la temperatura sobre la respuesta del LED en las curvas tensión-corriente y corriente-flujo de luz para dos temperaturas diferentes  $T_1$  y  $T_2$ , donde  $T_2$  es mayor que  $T_1$ . Debido a la modificación de la tensión de codo del LED dependiendo de la temperatura, la curva tensión/corriente se desplaza a tensiones menores.

Debido a este efecto, el driver del LED ha de controlar la corriente media por el LED haciéndolo trabajar en el punto medio de la zona lineal, lo cual maximiza el rango de trabajo para la señal de comunicación. Aunque hay un claro efecto de la temperatura sobre la tensión de codo en el LED, el efecto de la temperatura sobre el rango dinámico del LED es despreciable, pudiendo considerarse constante. Este efecto permite mantener constante la máxima señal de comunicaciones  $v_{pp}$  que se puede aplicar al LED. Los límites sobre la señal  $v_{pp}$  vienen dados por la tensión de codo del LED y la máxima tensión y corriente permitidas. Dentro de esa región de funcionamiento, la respuesta tensión-corriente puede aproximarse por una respuesta lineal.

La mayor parte de las topologías propuestas para transmisores VLC están basados en polarizar los LEDs mediante el uso de drivers tradicionales de iluminación (que controlan la corriente de polarización  $I_{bias}$ ) y en añadir la función de comunicaciones mediante el uso de amplificadores lineales (e.g. amplificadores en Clase A o B) [5], [6]. Estas propuestas destacan por su simplicidad a la hora de adaptar técnicas ya conocidas a VLC, pero presentan rendimientos máximos bajos que vienen penalizadas por el bajo rendimiento de los amplificadores lineales. El máximo rendimiento de los amplificadores en clase A o B es de 50% y 78% respectivamente, llegando a ser más bajas cuando se usan modulaciones complejas de amplitud no constante.

Por otra parte, se han presentado propuestas basadas en la adaptación de convertidores CC-CC de respuesta rápida como driver y transmisor VLC [7]–[11] como alternativa al bajo rendimiento de las propuestas basadas en amplificadores lineales. Estos transmisores consiguen rendimientos altos (en torno al 90%) y alcanzando tasas binarias altas. Una de las desventajas de implementar ambas funciones en la misma topología es que tanto la potencia de polarización como la de comunicación son procesadas a alta frecuencia. En un sistema VLC, la potencia de polarización es mayor que la potencia de señal (aproximadamente 3/4 de la potencia es polarización y 1/4 señal). Además, debido a que el efecto de incremento de temperatura del LED tiene un comportamiento lento, no hay necesidad de procesar la potencia polarización a alta frecuencia ni tener un convertidor rápido para dicha función. Una forma de solucionar este problema se basa en el reparto de potencia entre dos convertidores [12]. En este caso se utilizan

dos convertidores, en el que cada uno de ellos realizaría una de las funciones de polarización o de comunicación. Esto evita el innecesario procesamiento de potencia de polarización a alta frecuencia. Usando un convertidor de menor frecuencia para la polarización y uno de mayor frecuencia para la comunicación se consigue desacoplar ambas funciones, pudiendo tener un convertidor optimizado para cada función. La desventaja en este caso es la complejidad de la topología y su necesidad de dos tensiones de entrada diferentes para poder realizar dicha técnica, lo cual desplaza el problema a etapas anteriores del sistema de iluminación que deberán generar dichas tensiones.

En este trabajo se presenta una modificación del convertidor reductor de dos entradas (*Two Input Buck converter*, TIBuck) como transmisor VLC basado en la idea del reparto de la potencia. El convertidor TIBuck es implementado mediante un convertidor reductor auxiliar de baja frecuencia y en lazo cerrado que genera la tensión auxiliar necesaria para el TIBuck. El convertidor auxiliar trabaja en lazo cerrado controlando la corriente media por los LEDs y, por lo tanto, controlando el punto de polarización. El convertidor auxiliar trabaja a una frecuencia de conmutación de 100 kHz mientras que el TIBuck trabaja a una frecuencia de 10 MHz. La mejora en el rendimiento radica en las diferentes frecuencias usadas para cada uno de los convertidores. El convertidor auxiliar procesa la mayor parte de la potencia a menor frecuencia y el convertidor TIBuck únicamente procesando la potencia de comunicaciones a alta frecuencia. La propuesta es validada transmitiendo una modulación digital 64-QAM, alcanzando una tasa binaria de 1.5 Mbps con un rendimiento total del 94%.

## II. USO DEL CONVERTIDOR TIBUCK EN VLC

El convertidor TIBuck fue originalmente propuesto como post-regulador [13]. En la figura 2 se muestra el esquema del TIBuck.

El convertidor TIBuck es una modificación del convertidor reductor en el cual el diodo  $D_{T1}$  está conectado a una tensión auxiliar  $V_2$  en lugar de al terminal negativo de la tensión de entrada  $V_1$ . Debido a esta modificación, la señal cuadrada a la entrada del filtro  $v_s$  varía entre las tensiones  $V_1$  y  $V_2$  como se muestra en la figura 3.

Como ventajas, el estrés de tensión en los semiconductores desciende de  $V_1$  a  $(V_1 - V_2)$  y, por consiguiente, se reducen las pérdidas en conmutación. Además, el contenido armónico de la señal cuadrada  $v_s$  también se ve reducido y la resolución en el control de la tensión de salida se ve aumentada con respecto al convertidor reductor tradicional. Por otro lado, como desventajas, la generación de una tensión auxiliar  $V_2$  es necesaria y el rango de regulación de la tensión de salida  $v_o$  se reduce, el cual solo puede ser variado entre  $V_1$  y  $V_2$  como puede verse en la figura 3.

La última desventaja no resulta realmente una limitación en el caso de usar el TIBuck como driver de LEDs para iluminación debido a que el rango de regulación de la tensión de salida viene limitado por la tensión de codo del LED y la máxima tensión. Si  $V_1$  se diseña para ser la máxima

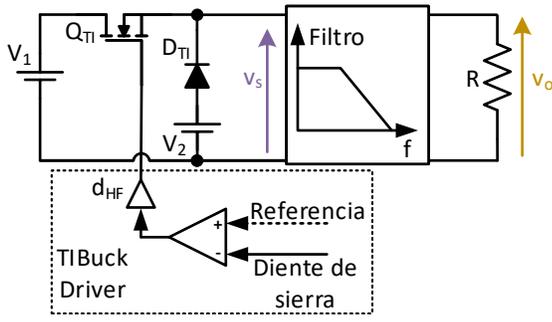


Fig. 2: Esquema del convertidor TIBuck.

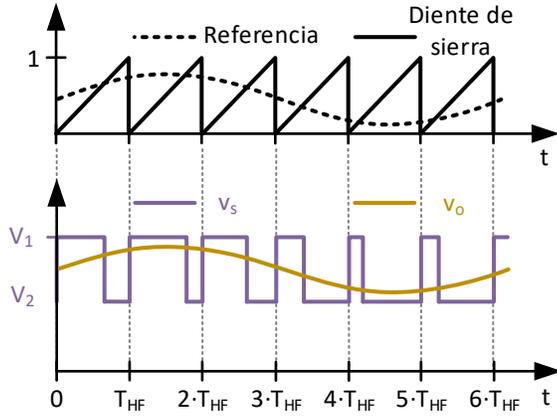


Fig. 3: Tensión en el nodo de conmutación  $v_s$  y tensión de salida  $v_o$  en un convertidor TIBuck cuando se usa una referencia no constante.

tensión admitida en el LED y  $V_2$  se mantiene cercana a la tensión de codo del LED, el convertidor TIBuck cubre todo el rango dinámico del LED y, además, con la máxima resolución posible de ciclo de trabajo [14]. El hecho de aumentar la resolución en el control de la tensión de salida resulta especialmente interesante a la hora de generar una señal de comunicaciones mediante un convertidor. Implementaciones actuales de modulaciones de ancho de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*) como la mostrada en la figura 3 son realizadas de forma digital en DSPs o FPGAs. La señal de diente de sierra se implementa digitalmente por un contador de frecuencia  $f_{CLK}$  y la referencia es un número que se compara con dicho contador. Para alcanzar una resolución de  $n$  diferentes niveles de ciclo de trabajo, la frecuencia del contador  $f_{CLK}$  tiene que ser  $n$  veces mayor que la frecuencia de la señal de diente de sierra, y, por tanto, que la de la señal PWM generada. En el caso de un convertidor CC-CC de alta frecuencia, las frecuencia de la señal PWM puede ser del orden de 10-20 MHz, haciendo la frecuencia requerida de  $f_{CLK}$  excesivamente alta si se quiere mantener una resolución alta.

Al usar un convertidor TIBuck, la resolución disponible en la implementación digital de la PWM puede ser usada enteramente en el rango de tensiones de regulación del LED y, por lo tanto, usado enteramente para generar la señal de comunicaciones. En un convertidor reductor tradicional la resolución es  $V_1/n$ , mientras que en el TIBuck es  $\frac{V_1-V_2}{n}$ .

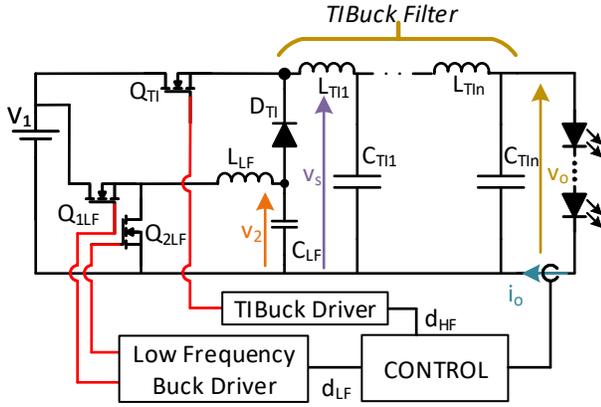
Otro punto principal es aplicar la máxima señal de comunicaciones dentro del rango dinámico del LED para utilizar toda la capacidad de generación de luz del LED para comunicaciones. Si la señal de comunicaciones esta ajustada en el rango de variación del ciclo de trabajo del TIBuck, la tensión de salida estará ajustada al rango dinámico del LED. Este hecho viene impuesto al diseñar  $V_1$  y  $V_2$  acorde con los límites del LED. Para realizar esto, debido a que las señales de comunicación tienen por lo general valor medio nulo, es necesario aplicar un offset sobre la referencia. Esto hace que el ciclo de trabajo del TIBuck  $d_{HF}$  tenga un valor medio  $D_{HF}$  dependiente del offset y una variación  $\Delta d_{HF}$  dependiente de la señal de comunicaciones. En la figura 3, un offset de  $D_{HF} = 0.5$  es aplicado para centrar la referencia y maximizar el rango disponible. Por simplicidad en la representación, la variación del ciclo de trabajo  $\Delta d_{HF}$  es una señal senoidal, aunque en la realidad será una señal de comunicaciones más compleja. La tensión de salida  $v_o$  puede ser expresada en función del ciclo de trabajo del TIBuck como

$$v_o = d_{HF}(V_1 - V_2) + V_2 \leftrightarrow (D_{HF} + \Delta d_{HF})(V_1 - V_2) + V_2. \quad (1)$$

La reducción de las pérdidas de conmutación, un menor contenido armónico y una mayor resolución en el ciclo de trabajo hacen al convertidor TIBuck idóneo para la implementación de convertidores de respuesta rápida y de alta frecuencia [15]–[17]. Mediante el diseño adecuado del filtro de salida del convertidor, la tensión de salida  $v_o$  puede reproducir la señal de comunicaciones modulada en PWM mediante el parámetro  $\Delta d_{HF}$  siempre y cuando se cumplan una serie de condiciones. La primera limitación viene impuesta por el teorema de *Nyquist–Shannon* de muestreo, donde la frecuencia de la PWM (que hace las funciones de muestreo) ha de ser al menos del doble de la frecuencia de señal. La segunda condición es que la frecuencia de corte del filtro de salida del convertidor ha de ser diseñada de tal forma que deje pasar la señal de comunicaciones pero elimine las componentes de frecuencia de conmutación que se encuentran en la señal PWM [18]. Este proceso de filtrado es el mismo que sucede en un convertidor reductor tradicional, dado que ambos convertidores disponen de un filtro paso bajo explícito a la salida. La ventaja en este caso del TIBuck es su menor componente armónica a la salida y, por lo tanto, el proceso de filtrado se hace de manera más sencilla, ya sea reduciendo el orden del filtro necesario o pudiendo subir la frecuencia de corte del filtro.

#### II-A. Adaptación del convertidor TIBuck como transmisor VLC y driver de LEDs

La modificación propuesta del convertidor TIBuck funcionando como transmisor VLC y driver de LEDs es mostrada en la figura 4. Debido a que dos tensiones de entrada  $V_1$  y  $V_2$  son necesarias, y dado que  $V_2 < V_1$ , la tensión auxiliar  $V_2$  puede ser obtenida directamente de  $V_1$  mediante un sencillo convertidor auxiliar reductor alimentado desde la tensión de entrada  $V_1$ . Se denomina el ciclo de trabajo del convertidor



**Fig. 4:** Modificación del convertidor TIBuck añadiendo un convertidor auxiliar y control del punto de polarización del LED.

reductor auxiliar como  $d_{LF}$  y la tensión auxiliar  $V_2$  se expresa como

$$V_2 = d_{LF}V_1. \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1), la tensión de salida puede ser expresada en términos del ciclo de trabajo de ambos convertidores como

$$v_o = d_{HF}(V_1 - d_{LF}V_1) + d_{LF}V_1. \quad (3)$$

Asumiendo que la frecuencia de conmutación del convertidor reductor auxiliar es mucho menor que la del TIBuck, el valor del ciclo de trabajo del TIBuck  $d_{HF}$  durante un periodo de conmutación del reductor auxiliar puede ser remplazado por su valor medio  $D_{HF}$ , el cual se fijó anteriormente a 0.5, obteniendo

$$v_o = 0,5(1 + d_{LF})V_1. \quad (4)$$

De acuerdo con (4), el control de la tensión media sobre los LEDs, (y por lo tanto su corriente y luz media emitida) puede ser implementado a través de  $d_{LF}$ . Por otro lado, dado que la frecuencia de conmutación del TIBuck es mucho mayor, la tensión  $V_2$  se pueden considerar constante durante un periodo de conmutación y, por lo tanto, el valor instantáneo de la tensión de salida puede ser controlado por el TIBuck a través de  $d_{HF}$  siguiendo (1).

En resumen, el convertidor reductor auxiliar trabaja en lazo cerrado controlando la corriente media a través de los LEDs, mientras que el convertidor TIBuck trabaja en lazo abierto reproduciendo la señal de comunicaciones.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como resultados experimentales se presenta el prototipo de un convertidor TIBuck adaptado para funcionar como driver de LEDs y transmisor VLC. El diseño está basado en dos convertidores: un convertidor reductor auxiliar de baja frecuencia y el convertidor TIBuck de alta frecuencia. El convertidor auxiliar genera la tensión  $V_2$  necesaria para el convertidor TIBuck

desde la tensión de entrada  $V_1$ . Además, este convertidor funciona el lazo cerrado controlando la corriente media por los LEDs, como se vio anteriormente. El convertidor TIBuck funciona en lazo abierto y a mayor frecuencia que el reductor auxiliar generando la señal de comunicaciones sobre los LEDs. La carga del convertidor es un string de 8 HB-LEDs *XLamp MX-3* en serie. La tensión de entrada  $V_1$  es 28 V. Como se definió anteriormente, la tensión de entrada se diseña para estar próxima a la máxima tensión soportada por el string de LEDs a temperatura ambiente, de forma que se pueda maximizar la resolución del ciclo de trabajo del TIBuck. La corriente media se mantiene en 0.25 A, que es la mitad de la máxima corriente de los LEDs. El convertidor alcanza un rendimiento del 94% procesando 8 W. La medida del rendimiento se realiza comparando la potencia que es entregada por la fuente de entrada  $V_1$  con la potencia de salida del convertidor. En el cálculo de la potencia de salida se tiene en cuenta la potencia media debida a la polarización y la potencia RMS de la señal de comunicaciones.

#### III-A. Diseño del convertidor reductor auxiliar

El convertidor reductor auxiliar se diseña con una frecuencia de conmutación de 100 kHz, un filtro de 2° orden con frecuencia de corte de 10 kHz, una década por debajo. Los valores reactivos del filtro están mostrados en la tabla I. En la elección de la frecuencia de conmutación se ha de definir una relación de compromiso. Aumentar la frecuencia de conmutación hace que los elementos reactivos del filtro sean menores pero aumenta las pérdidas de conmutación. Por otro lado reducir la frecuencia aumentaría el volumen de los elementos reactivos pero reduciría las pérdidas de conmutación. Otro factor a tener en cuenta es el posible rizado en la tensión  $V_2$  que se ve trasladado a la tensión por los LEDs y por lo tanto a la luz emitida por los mismos. El filtro ha de ser diseñado para mitigar dicho rizado, pero si la frecuencia de conmutación se sube y se aproxima a las frecuencias del espectro de comunicación, este rizado añadiría ruido a la señal de comunicación.

**Tabla I:** COMPONENTES REACTIVOS DEL FILTRO DE SALIDA PASA BAJO DE 2° ORDEN DEL CONVERTIDOR REDUCTOR AUXILIAR.

$L_{LF}$	$C_{LF}$
$49\mu H$	$9\mu F$

El convertidor funciona en lazo cerrado y es controlado por una FPGA. La corriente es medida con un shunt colocado en serie con el string de LEDs. Un filtro paso bajo elimina las componentes de señal, dejando solamente el valor medio, el cual es introducido en la FPGA mediante un ADC. Se implementa un control PI con un ancho de banda de 10 Hz. El control de corriente media es requerido por los LEDs por la deriva de temperatura que sufren, que al ser un efecto con una dinámica muy lenta, el control no ha de ser rápido.

Cabe destacar que la planta, y por lo tanto su comportamiento dinámico, se puede aproximar al de un convertidor reductor tradicional siempre que se cumpla que las frecuencias de conmutación del convertidor reductor auxiliar y el TIBuck estén lo

suficientemente separadas, y por lo tanto las consideraciones hechas en la sección II sigan siendo correctas. La carga vista por el convertidor reductor auxiliar depende del número de LEDs (constante) y el valor medio del ciclo de trabajo del TIBuck (constante por diseño y fijado a 0.5).

Para la selección de componentes, se usan 2 MOSFETs CSD88539 integrados en el mismo chip como  $Q_{1LF}$  y  $Q_{2LF}$  y un driver de medio puente ISL6700 como control.

### III-B. Esquema de comunicación

Para probar las capacidades de comunicación se elige usar una modulación digital 64-QAM, con una frecuencia de portadora de 1 MHz, un periodo de símbolo de 4 periodos de señal; alcanzando una tasa binaria máxima de 1.5 Mbps.

### III-C. Diseño del convertidor TIBuck

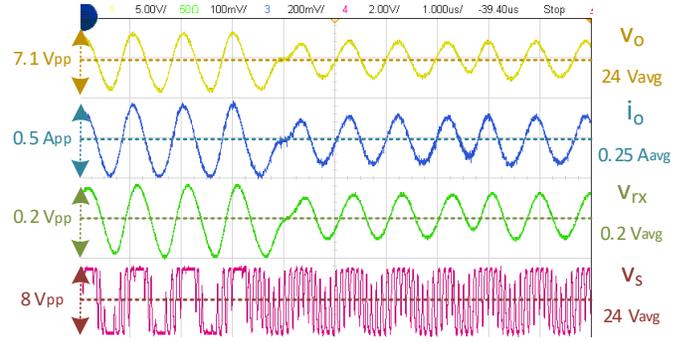
El convertidor TIBuck ha de ser capaz de reproducir una señal modulada de 1 MHz con baja distorsión y alto rendimiento. La frecuencia de conmutación, frecuencia de corte y el orden del filtro se diseñan a partir del esquema de modulación elegido. Además, se tiene que encontrar una solución de compromiso entre rendimiento, resolución y el orden del filtro. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayores serán las pérdidas de conmutación y menor será la resolución del ciclo de trabajo, pero el diseño del filtro se simplifica, pudiendo reducir el orden del filtro necesario. Por otro lado, reducir la frecuencia permite reducir las pérdidas de conmutación y aumentar la resolución del ciclo de trabajo, pero complica el diseño del filtro. El filtro ha de ser capaz de dejar pasar correctamente el espectro de comunicaciones y atenuar suficientemente las componentes de frecuencia de conmutación y armónicos. Esto impone unas restricciones sobre cuanto se pueden aproximar la frecuencia de conmutación del convertidor y la máxima frecuencia de comunicación en función del orden del filtro, tipo de filtro y distorsión [9], [18]. La frecuencia de conmutación elegida es de 10 MHz, una década por encima de la frecuencia de portadora de la señal de comunicaciones. El filtro usado es un filtro paso bajo de 6° orden con frecuencia de corte 2.5 MHz. Los valores reactivos se muestran en la tabla II.

Los componentes usados son el MOSFET de RF PD84010S-E como  $Q_{TI}$  y el diodo UPS115UE3 como  $D_{TI}$ . Debido a la alta frecuencia de conmutación, se usan el driver EL7155CSZ y el aislador digital ISO721 para controlar el transistor  $Q_{TI}$ .

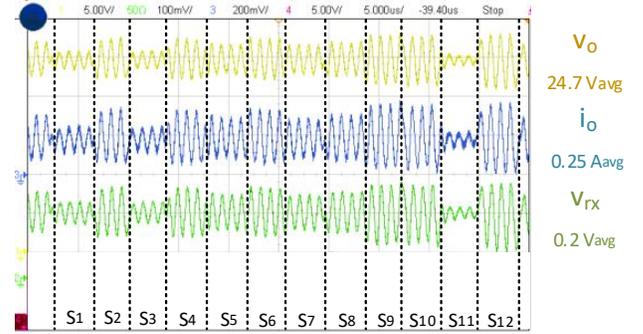
**Tabla II:** COMPONENTES REACTIVOS DEL FILTRO DE SALIDA PASA BAJO DEL FILTRO DE 6° ORDEN DEL CONVERTIDOR TIBUCK.

$L_{TI1}$	$C_{TI1}$	$L_{TI2}$	$C_{TI2}$	$L_{TI3}$	$C_{TI3}$
$1,7\mu H$	$9,9nF$	$2,2\mu H$	$9,9nF$	$1,9\mu H$	$5,72nF$

La figura 5 muestra las formas de onda más representativas del convertidor TIBuck cuando reproduce una señal de comunicaciones.  $v_o$  e  $i_o$  son la tensión y la corriente por el string de LEDs. La corriente media se mantiene constante controlada por el convertidor reductor auxiliar, mientras que el valor instantáneo de la corriente sigue la señal de comunicaciones impuesta por el convertidor TIBuck.  $v_s$  es la tensión en el nodo



**Fig. 5:** Tensión de salida  $v_o$ , corriente de salida  $i_o$ , tensión en el receptor óptico  $v_{rx}$  y tensión en el nodo de conmutación  $v_s$  en el convertidor TIBuck.



**Fig. 6:** Tensión de salida  $v_o$ , corriente de salida  $i_o$  y tensión en el receptor óptico  $v_{rx}$  durante la transmisión de 12 símbolos.

de conmutación del TIBuck, siendo esta una señal cuadrada que varía entre  $V_1$  y  $V_2$ . El valor de  $V_2$  es controlado por el convertidor reductor auxiliar con el fin de controlar la corriente media por el string de LEDs. La señal  $v_{rx}$  es la tensión a la salida de un receptor óptico posicionado delante del string de LEDs.

La figura 6 muestra la transmisión de una secuencia de símbolos más larga, en este caso 12 símbolos diferentes de la modulación 64-QAM. El convertidor es capaz de reproducir las variaciones de amplitud y fase necesarias para la comunicación, como puede ser observado en las señales de tensión  $v_o$ , corriente  $i_o$ . La señal del receptor  $v_{rx}$ , y por lo tanto la luz emitida por los LEDs, también es capaz de reproducir los diferentes símbolos de la comunicación.

## IV. CONCLUSIONES

Como conclusiones se obtiene que la utilización del convertidor TIBuck como transmisor VLC mejora considerablemente con respecto a la topología Buck tradicional. La implementación original es modificada ligeramente, de forma que solamente se necesita utilizar una tensión de entrada. La integración del convertidor reductor auxiliar que genera la tensión auxiliar  $V_2$  necesaria para el TIBuck permite además el control de la corriente media por los LEDs a través del convertidor auxiliar, dejando al TIBuck la función únicamente de comunicación. La idea está basada en el reparto de potencia entre dos convertidores. La mayor parte de la potencia,

asociada a la polarización de los LEDs, es entregada por un convertidor de baja frecuencia debido a que no se necesita una respuesta rápida por parte de este convertidor, lo que permite aumentar el rendimiento. Eso reduce considerablemente la potencia entregada por el convertidor de alta frecuencia, el cual se limita a entregar la señal de comunicaciones. Además de una mejora en el rendimiento, la topología TIBuck presenta ventajas debido a la reducción del estrés de tensión sobre los semiconductores de la etapa de alta frecuencia, los cuales en general no están diseñados para soportar altas tensiones. El TIBuck presenta la ventaja de reducir el contenido armónico de frecuencia de conmutación a la salida, reduciendo la distorsión de la señal de comunicaciones y facilitando el diseño del filtro de salida, elemento clave en los convertidores de respuesta rápida. En los resultados experimentales se presenta que el convertidor alcanza un rendimiento del 94% en una transmisión VLC usando una modulación digital 64-QAM, llegando a una tasa binaria de 1.5 Mbps.

#### REFERENCIAS

- [1] Cisco Systems. (2017) Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021.
- [2] "Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1–309, Sept 2011.
- [3] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, December 2013.
- [4] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, September 2011.
- [5] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O'Brien, and H. Haas, "Led based wavelength division multiplexed 10 gb/s visible light communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, July 2016.
- [6] J. Vučić, C. Kottke, K. Habel, and K. D. Langer, "803 mbit/s visible light wdm link based on dmt modulation of a single rgb led luminary," in *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, March 2011, pp. 1–3.
- [7] J. Rodríguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, and J. Sebastian, "Reproducing Single-Carrier Digital Modulation Schemes for VLC by Controlling the First Switching Harmonic of the DC-DC Power Converter Output Voltage Ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7994–8010, Sept 2018.
- [8] J. Sebastian, D. G. Lamar, D. G. Aller, J. Rodriguez, and P. F. Miaja, "On the Role of Power Electronics in Visible Light Communication," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2018.
- [9] J. Rodriguez, D. G. Lamar, D. G. Aller, P. F. Miaja, and J. Sebastian, "Efficient Visible Light Communication Transmitters Based on Switching-Mode dc-dc Converters," *Sensors*, vol. 18, no. 4, 2018.
- [10] J. Rodríguez Mendez, D. G. Lamar, D. G. Aller, P. F. Miaja, and J. Sebastián, "Reproducing multicarrier modulation schemes for visible light communication with the ripple modulation technique," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 2, pp. 1532–1543, Feb 2020.
- [11] F. Loose, L. Teixeira, R. R. Duarte, M. A. Dalla Costa, and C. H. Barriuello, "On the Use of the Intrinsic Ripple of a Buck Converter for Visible Light Communication in LED Drivers," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 1235–1245, Sep. 2018.
- [12] J. Rodríguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, D. G. Aller, and J. Sebastian, "Power Efficient VLC Transmitter Based on Pulse-Width Modulated DC-DC Converters and the Split of the Power," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1–1, 2018.
- [13] J. Sebastian, P. J. Villegas, F. Nuno, and M. M. Hernando, "High-efficiency and wide-bandwidth performance obtainable from a two-input buck converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 706–717, July 1998.
- [14] M. Arias, D. G. Lamar, J. Sebastian, D. Balocco, and A. A. Diallo, "High-efficiency LED driver without electrolytic capacitor for street lighting," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 1, pp. 127–137, 2013.
- [15] V. Yousefzadeh, E. Alarcon, and D. Maksimovic, "Three-level buck converter for envelope tracking applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 549–552, March 2006.
- [16] M. Rodríguez, P. Fernández-Miaja, A. Rodríguez, and J. Sebastián, "A multiple-input digitally controlled buck converter for envelope tracking applications in radiofrequency power amplifiers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 369–381, 2010.
- [17] P. F. Miaja, A. Rodriguez, J. Sebastian, and M. Rodriguez, "Enhancements of the multiple input buck converter used for Envelope Tracking applications by improved output filter design and multiphase operation," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, pp. 1841–1848, 2012.
- [18] J. Sebastián, P. Fernández-Miaja, F. J. Ortega-González, M. Patiño, and M. Rodríguez, "Design of a Two-Phase Buck Converter With Fourth-Order Output Filter for Envelope Amplifiers of Limited Bandwidth," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 11, pp. 5933–5948, Nov 2014.