

Desarrollo de un transmisor para comunicaciones en luz visible (VLC) basado en un convertidor CC/CC conmutado de respuesta rápida.

Daniel G. Aller, Juan Rodríguez, Javier Sebastián y Diego G. Lamar

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Gijón 33204, España

Email: garciaadaniel@uniovi.es

Resumen—En este artículo se presenta un sistema de transmisión de información usando luz visible (*Visible-Light Communication*, VLC) basado en un convertidor CC/CC conmutado de respuesta rápida y un sistema de caracterización en frecuencia de LEDs de alta eficiencia (*High Brightness Light Emitting Diodes*, HB-LED). Por una parte se presenta un sistema transmisor/receptor para caracterización en frecuencia de HB-LEDs basado en un amplificador lineal como transmisor y un amplificador de transimpedancia y fotodiodo como receptor. Este sistema permite caracterizar la relación tensión/corriente/luz en frecuencia y permite el estudio de la utilidad de HB-LEDs en sistemas VLC. Debido a la baja eficiencia del amplificador lineal, se presenta además un convertidor CC/CC de respuesta rápida como propuesta de transmisor real para un sistema VLC con alta eficiencia y mayores niveles de potencia de transmisión.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayor parte de las transmisiones inalámbricas de información se basan en la utilización de la banda de radiofrecuencia (*Radio Frequency*, RF). Debido a la saturación de dicha banda y por su estricta regulación, surgen nuevas formas de aprovechar el espectro electromagnético disponible.

Los sistemas de transmisión de información usando luz visible (*Visible-Light Communication* buscan utilizar la banda de luz comprendida entre 400 y 750 nm para el envío de información de forma inalámbrica. El espectro de luz visible tiene como ventajas que es ~ 10.000 más grande que la banda RF y actualmente se encuentra sin regulación para su uso como medio de transmisión de información inalámbrica.

En los últimos años, aprovechando el creciente uso de sistemas de iluminación basados en LEDs, y en especial HB-LEDs, se han propuesto sistemas y estándares que integren ambas funciones, iluminar y transmitir información [1, 2].

Un sistema de transmisión VLC busca combinar la función de iluminación de los HB-LEDs con la de transmisión de información mediante variaciones rápidas de su luz. El objetivo es conseguir un nivel continuo de emisión de luz, que hace la función de iluminación del sistema, y en torno a ese punto de operación realizar variaciones rápidas de la luz donde se porta la información. Dichas variaciones han de ser lo suficientemente rápidas para no afectar ni ser detectadas por el ojo humano.

En la figura 1 se ilustra el funcionamiento del HB-LED con la curvas características tensión/corriente y corriente/flujo luminoso relativo. En este ejemplo, el valor medio de ilumi-

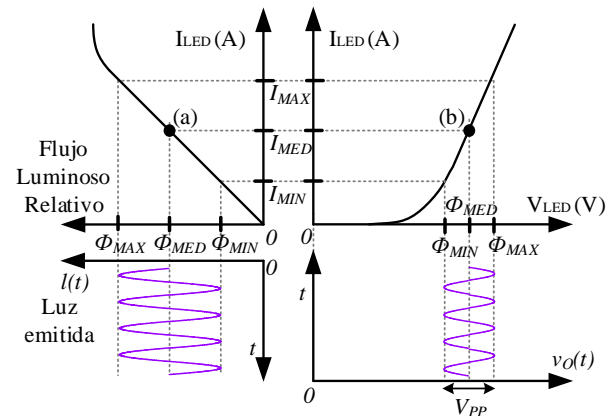


Figura 1: Curvas de tensión/corriente y corriente/flujo de luz relativo de un HB-LED.

nación se controla con el punto de polarización en tensión V_{MED} , el cual genera una corriente media I_{MED} y un flujo luminoso ϕ_{MED} . En torno a este punto de operación de continua y mediante variaciones de la tensión sobre el HB-LED entre V_{MAX} y V_{MIN} , se producen variaciones de corriente entre I_{MAX} e I_{MIN} y del flujo luminoso entre ϕ_{MAX} e ϕ_{MIN} respectivamente.

A la hora de elegir los valores de polarización y de nivel de señal varias consideraciones han de ser tenidas en cuenta:

- **Zona lineal de trabajo:** Mientras que la relación corriente/flujo luminoso es próxima a un comportamiento lineal, no sucede lo mismo con la relación tensión/corriente. El valor de señal V_{MIN} ha de ser seleccionado de forma que nunca sea menor que la tensión de codo del LED, e incluso ligeramente mayor, de forma que se evite el entorno no lineal de la tensión de codo. Si el HB-LED opera siempre en su zona lineal se puede modelar como un diodo ideal, en serie con una tensión continua de valor la tensión de codo y en serie con una resistencia, de valor la inversa de la pendiente de la curva tensión/corriente.
- **Valores máximos de funcionamiento:** El valor de señal V_{MAX} ha de ser elegido de forma que no se supere nunca los límites de tensión o corriente máximos proporcionados por el fabricante.
- **Valor de polarización:** El valor V_{MED} define el valor

medio de iluminación, pero también limita la amplitud máxima de la señal que se puede transmitir a través del HB-LED. Se ha de encontrar una solución de compromiso entre el nivel de iluminación media y el nivel de señal que se desea transmitir. En este artículo se sigue el criterio de maximizar el valor de señal, y por lo tanto, el nivel de polarización será el punto medio de la zona lineal de funcionamiento del HB-LED.

Una de las motivaciones de este artículo radica en el estudio en frecuencia de la respuesta de los HB-LEDs. La información proporcionada por el fabricante, y mostrada en la figura 1, corresponde a su comportamiento en régimen estático y no se disponen de datos de su comportamiento en función de la frecuencia. Es decir, se desconoce el comportamiento de la luz cuando las variaciones de la tensión o corriente por el HB-LED suceden a alta frecuencia, del orden de los MHz. Además, en publicaciones en el contexto de VLC con HB-LEDs de iluminación, se ha reportado que los LEDs blancos basados en luz azul y filtrado por fosforo (para obtener luz blanca), presentan una dinámica más lenta que LEDs RGB, debido a dicho filtrado. En [3–5] se reportan variaciones del ancho de banda de los HB-LEDs desde 1 MHz hasta 20 MHz, siendo éste un parámetro no proporcionado por el fabricante en este tipo de HB-LEDs y necesario para sistemas VLC.

En este trabajo se propone el diseño de un transmisor y receptor capaces de obtener la respuesta en frecuencia entre tensión, corriente y flujo lumínico con el objetivo de caracterizar en frecuencia HB-LEDs. El transmisor ha de poder controlar independiente la tensión de polarización del HB-LED y el nivel de señal que se aplica. Además, ha de ser capaz de variar dicha señal en frecuencia en un rango amplio, desde algunos kHz hasta decenas de MHz. Para facilitar la caracterización, se utilizan señales sinusoidales en la excitación del HB-LED, y por lo tanto el transmisor tiene que ser lo más lineal posible para evitar distorsiones de la señal.

El receptor recibe la señal de luz emitida por el HB-LED y la convierte a tensión para así poder ser medida. El receptor ha de tener un ancho de banda lo suficientemente amplio para poder realizar la caracterización correctamente dentro del ancho de banda de transmisión del transmisor anterior. El receptor está formado por un fotodiodo polarizado en inversa que transduce las variaciones de luz que recibe en variaciones de corriente, y una etapa de acondicionamiento y amplificación de la señal. Los factores de diseño del receptor son los siguientes:

- **Ancho de banda del receptor:** En ancho de banda de todo el receptor está limitado por el ancho de banda del fotodiodo y de la circuitería de acondicionamiento.
- **Ganancia:** Las corrientes producidas por un fotodiodo son del orden de los μA y necesitan ser amplificadas para su correcta recepción. Debido a la utilización de amplificadores operacionales, existe una relación entre ancho de banda y nivel de ganancia y por lo tanto, se ha de llegar a una relación de compromiso entre ambos.

- **Respuesta espectral:** El fotodiodo ha de poner recibir en las longitudes de onda de emisión de los HB-LED de iluminación, comprendido entre 400 y 750 nm.

Un fotodiodo convierte la luz recibida en una corriente, que ha de ser acondicionada. Para ello se utiliza un amplificador de transimpedancia (*TransImpedance Amplifier*, TIA) que proporciona una tensión proporcional a la corriente del fotodiodo, y una etapa de filtrado en el ancho de banda deseado para evitar ruidos.

Teniendo ya caracterizado el HB-LED como medio de transmisión en un sistema VLC, posteriormente se propone el diseño de un convertidor CC/CC conmutado de respuesta rápida.

Hasta la fecha, la mayor parte de las publicaciones en VLC se centran en alcanzar tasas binarias altas [6, 7], uso de modulaciones de alta eficiencia [8, 9] y en capas del modelo OSI superiores a la física en la comunicación [10, 11]. En muchos de los sistemas actualmente presentados se utilizan transmisores de HB-LEDs basados en amplificadores lineales de baja eficiencia o incluso sin transmisor aplicando la salida de un generador de señal directamente al HB-LED. Estos sistemas distan de ser eficientes o de ser propuestas realistas para sistemas reales debido a las bajas potencias que procesan.

En los últimos años se han propuesto convertidores CC/CC de respuesta rápida para sistemas de seguimiento de envolvente (ET) y eliminación y restauración de envolvente (EET), que son capaces de variar la tensión de salida a frecuencias altas, del orden de las decenas de MHz. En [12] se proponen adaptaciones de dichas técnicas a sistemas VLC, donde el convertidor hace la función de transmisor del HB-LED, como se muestra en la figura 2.

La tensión de salida del convertidor hace las funciones de polarizar los LEDs y de generar la señal. El valor medio de la tensión de salida define el punto de polarización y las variaciones rápidas de la tensión generan la señal a transmitir. Los factores de diseño son los siguientes:

- **Niveles de tensión de salida:** Los valores de tensión están limitados por los valores máximos y mínimos de tensión mostrados en la figura 1 para que el HB-LED funcione siempre en zona lineal, para así poder modelar la carga como una resistencia, facilitando el diseño.
- **Ancho de banda de la señal reproducida:** La señal aplicada a los HB-LEDs ha de estar por debajo del ancho de banda del LED, pero además está limitada por la frecuencia de conmutación. Para poder generar variaciones de la tensión del orden de decenas de MHz, se necesitan frecuencias de conmutación de entre 50-100 MHz.
- **Frecuencia de conmutación:** Relacionada con el punto anterior, ha de ser lo suficientemente alta para poder reproducir la señal deseada con suficiente resolución, pero se ha de buscar una relación de compromiso, dado que frecuencias de conmutación altas aumentan las pérdidas en conmutación, y por lo tanto reducen el rendimiento del sistema.

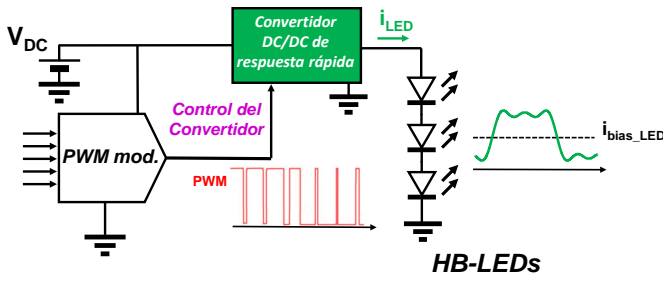


Figura 2: Control de un convertidor CC/CC para polarizar y generar la señal de excitación en los LEDs.

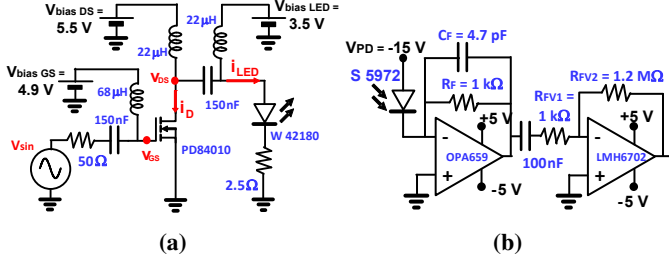


Figura 3: Sistema caracterizador de HB-LEDs donde (a) muestra el transmisor y (b) muestra el receptor.

- Diseño del filtro:** El filtro de salida del convertidor se diseña para dejar pasar la señal reproducida y eliminando los armónicos producidos por la modulación de ancho de pulso (*Pulse-Width Modulation*, PWM) del convertidor. En [13] se reporta el estudio del diseño del filtro para un reductor de doble fase.

II. DISEÑO DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN

Para poder evaluar la utilidad de los HB-LED en sistemas VLC se estudia su respuesta en frecuencia para poder obtener su ancho de banda de uso. El sistema propuesto está compuesto por el transmisor mostrado en la figura 3a y el receptor mostrado en la figura 3b.

II-A. Diseño del transmisor

El transmisor es un amplificador Clase-A con control del punto de polarización del MOSFET y del LED independientes. La configuración en clase-A del amplificador presenta un rendimiento muy bajo, pero se justifica su uso para la caracterización en frecuencia debido a su linealidad y facilidad de control, donde la eficiencia no juega todavía un papel importante.

La señal V_{sin} es la salida de un generador de señal que permite realizar fácilmente el barrido en frecuencia, mientras que las tensiones V_{biasGS} y V_{biasDS} polarizan en un punto de funcionamiento del MOSFET para alcanzar un funcionamiento como amplificador Clase-A y dependen del transistor elegido. En la figura 4 se muestran las gráficas de un MOSFET polarizado en Clase-A con una carga resistiva. En la figura se puede observar que la tensión V_{DS} y la corriente i_D son señales proporcionales a la señal aplicada en la puerta V_{GS} . Mediante

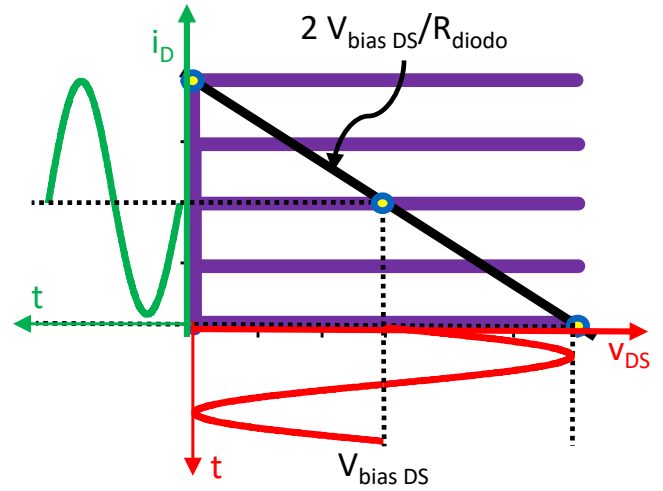


Figura 4: Curvas de funcionamiento de un MOSFET como amplificador Clase-A.

una selección adecuada de las tensiones de polarización se consigue que el amplificador reproduzca un ciclo completo de la señal, o lo que es lo mismo, su funcionamiento en Clase-A.

Como se ve en la figura 1, sobre el HB-LED se aplica una tensión continua de polarización, y sobre esa tensión, se aplica la señal deseada. La tensión de polarización del HB-LED viene definida por $V_{biasLED}$, y para poder controlarla de forma independiente, la componente de continua de la tensión de excitación V_{DS} se elimina por un condensador de desacoplo. De esta forma, la tensión continua de polarización del diodo se define mediante $V_{biasLED}$ y la componente de alterna mediante la componente de alterna de V_{DS} .

Como se comentó anteriormente, la tensión de polarización $V_{biasLED}$ se diseña para que el HB-LED funcione siempre en zona lineal y viene definida por la gráfica tensión/corriente dada por el fabricante. Por lo tanto, como se observa en la figura 4, la carga que ve el amplificador es una carga resistiva que depende únicamente del modelo de HB-LED usado.

II-B. Diseño del receptor

El receptor está formado por un fotodiodo y toda la circuitería necesaria para polarizar el fotodiodo, acondicionar la señal y amplificarla. El fotodiodo produce una corriente proporcional a las variaciones de luz recibidas cuando éste está polarizado en inversa con una tensión V_{PD} . Las corrientes producidas por un fotodiodo son muy pequeñas, del orden de los μA , por lo tanto necesitan ser amplificadas y transformadas en tensión para facilitar su medida.

En la figura 3b se muestra el circuito del receptor formado por un fotodiodo y dos etapas amplificadoras. La primera etapa amplificadora utiliza un TIA OPA659. Esta configuración genera una tensión a la salida proporcional a la corriente del fotodiodo y amplificada. Para el cálculo de los valores de realimentación se utiliza la ecuación 1.

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F C_D}} \quad (1)$$

La ecuación 1 permite calcular el ancho de banda del amplificador. Este ancho de banda depende del ancho de banda de ganancia unitaria del amplificador (GBP), de la capacidad parásita del fotodiodo C_D y de la resistencia de realimentación R_F . Mientras que el GBP y C_D dependen del amplificador y fotodiodo elegidos, R_F queda como único factor de diseño. Por lo tanto la elección correcta de fotodiodo y amplificador es crucial si se quieren conseguir anchos de banda altos, del orden de las decenas de MHz. El valor de GBP del amplificador OPA659 es de 650 MHz mientras que la capacidad C_D del conjunto fotodiodo S5972 y capacidad de entrada del amplificador utilizado es de 20 pF. Utilizando la ecuación 1 se obtiene una resistencia de realimentación $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ para un ancho de banda de 70 MHz. Además para garantizar estabilidad de la primera etapa se añade una compensación *lead* situado un condensador en paralelo con la resistencia de realimentación R_F de valor $C_F = 5 \text{ pF}$.

Se utiliza una segunda etapa para añadir amplificación al sistema completo. Debido a que en el diseño de un amplificador usando amplificadores operacionales se ha de buscar una relación de compromiso entre ancho de banda y nivel de amplificación, para alcanzar mayores niveles de ganancia manteniendo el mismo ancho de banda se necesita encadenar varias etapas. La segunda etapa es un amplificador de tensión con un ancho de banda igual a la primera. Sabiendo que el amplificador LMH6702 utilizado tiene un GBP de 1.7 GHz, se obtienen $R_{FV1} = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_{FV2} = 1.2 \text{ M}\Omega$ para una configuración de amplificador de tensión con un ancho de banda de 70 MHz. Como se vio anteriormente, la función del receptor es convertir la variaciones de la luz emitidas por el HB-LED en tensión que pueda ser medida. Pero el sistema transmisor emite un nivel de iluminación continua además de la señal transmitida. Este nivel de iluminación se traduce en un nivel de continua a la salida del primer amplificador, cuyo nivel será mayor al de señal y pudiendo producir una saturación en la siguiente etapa. Para evitar problemas de saturación, entre ambas etapas se utiliza un condensador cuya función es únicamente filtrar la continua y dejar pasar el ancho de banda de transmisión.

III. DISEÑO DEL TRANSMISOR BASADO EN CONVERTIDOR CC/CC

Como se comentó anteriormente, el rendimiento del transmisor basado en un amplificador lineal Clase-A es muy bajo, lo cual lo hace poco recomendable para aplicaciones con niveles de potencias altos. Debido a ésto se propone la utilización de un convertidor CC/CC conmutado de respuesta rápida basado en el convertidor reductor de doble fase utilizado en aplicaciones de seguimiento de envolvente [13] y mostrado en la figura 5. El convertidor es el encargado de generar la señal de excitación sobre los HB-LEDs y el nivel de continua mostrados en la figura 1.

Como parámetros de diseño se requiere un ancho de banda de la señal de salida, f_{signal} de 1 MHz y la frecuencia de conmutación, que tiene que ser al menos del doble para cumplir Nyquist-Shanon. Usando señales de 1 MHz se asegura

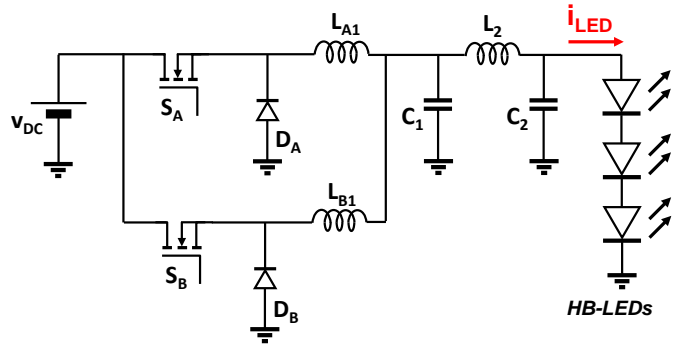


Figura 5: Esquema del convertidor reductor de doble fase con filtro de 4º orden a la salida y carga de HB-LEDs.

estar siempre funcionando dentro del ancho de banda del HB-LED. Además, la hora de elegir la frecuencia de conmutación se ha de encontrar una relación de compromiso entre pérdidas de conmutación (las cuales crecen con la frecuencia) y orden del filtro (el cual decrece con la frecuencia). Según estas especificaciones se diseña para una frecuencia de conmutación $f_{pwm} = 5 \text{ MHz}$.

El estudio de la utilización de diferentes filtros y ordenes se encuentra publicado en [13]. Siguiendo ese estudio se diseña un filtro Legendre-Papoulis de orden 4 con una frecuencia de corte de $f_c = 1.3 \text{ MHz}$. Los elementos del filtro son los mostrados en la tabla I.

Tabla I: VALORES DEL FILTRO LEGENDRE-PAPOULIS DE CUARTO ORDEN PARA $f_c = 1.3 \text{ MHz}$.

$L_{A1} = L_{B1} (\mu\text{H})$	$C_1 (\text{nF})$	$L_2 (\mu\text{H})$	$C_2 (\text{nF})$
3.15	25.4	1.39	9.79

La salida del convertidor está conectada directamente a los LEDs. Los LEDs son cargas no lineales, y en el diseño del filtro se ha supuesto que se comportan como cargas lineales. Esto es cierto siempre y cuando la tensión de salida sea superior a la tensión de codo del LED.

En un convertidor reductor en lazo abierto la tensión de salida depende de la tensión de entrada y del valor del ciclo de trabajo. Si se supone constante la tensión de entrada, mediante la modificación del ciclo de trabajo se controla la tensión de salida, que mediante variaciones rápidas del ciclo de trabajo se pueden conseguir variaciones rápidas de la tensión de salida. Además, esta tensión tiene que ser igual o superior a la tensión de codo del LED para asegurar en todo momento el trabajo en la zona lineal, y menor a la máxima tensión soportada.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales se dividen en caracterización de los HB-LEDs y el uso del convertidor CC/CC como transmisor VLC.

IV-A. Caracterización de los HB-LEDs

Los HB-LEDs utilizados para la obtención de resultados experimentales en la caracterización son W42180 de Seoul

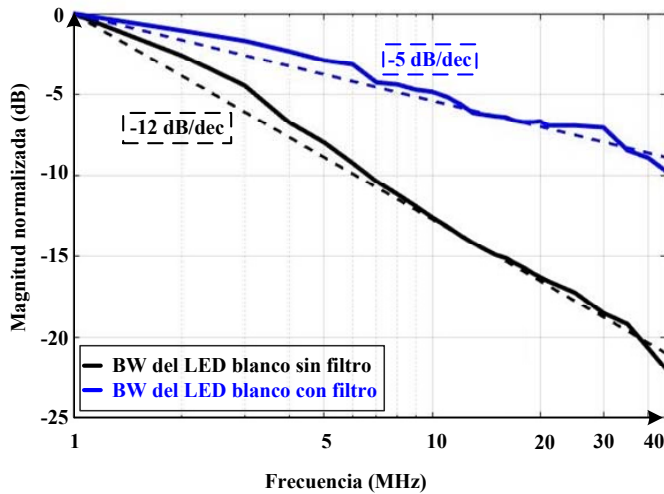


Figura 6: Respuesta en frecuencia del sistema completo para una carga de 1 HB-LED recibiendo todo el espectro de luz y recibiendo únicamente la componente azul de luz.

Semiconductor con una resistencia dinámica de 1.7Ω (proporcionada por el fabricante). Para la caracterización en frecuencia el HB-LED ha de trabajar siempre en su zona lineal para así poder obtener su función de transferencia.

A la entrada del amplificador Clase-A de la figura 3a se conecta a la salida del analizador de espectros HP-3598A programado para realizar un barrido entre 1 y 40 MHz. Con la entrada del analizador de espectros se mide tanto la relación tensión/corriente de los HB-LEDs como tensión/luz de los mismos. Para medir corriente por los HB-LEDs se utiliza una resistencia de 2.5Ω puesta en serie con ellos. Para medir luz se utiliza el receptor diseñado, mostrado en la figura 3b, mediante la conexión directa de la salida a la entrada del analizador.

Una de las consideraciones en el uso de HB-LEDs en sistemas VLC es la respuesta en frecuencia del filtro por fosforo que usan los HB-LEDs. Como se dijo anteriormente, la mayor parte de los HB-LEDs actuales de iluminación se fabrican a partir de un HB-LED azul y un filtro por fosforo que genera el resto de componentes de luz para producir así la luz blanca. Este efecto es conocido pero es dependiente del HB-LED usado y tiene que ser medido para cada modelo de HB-LED.

En la figura 6 se muestra la comparativa entre el ancho de banda de la respuesta corriente/luz del HB-LED de únicamente la componente azul de la luz comparada con la respuesta de todo el espectro de emisión del HB-LED. Para realizar las medidas, en el caso de medir únicamente la respuesta de la luz azul, se utiliza un filtro óptico entre transmisor y receptor. Conviene destacar que el filtro atenúa la señal recibida y por lo tanto el nivel de señal en ambas pruebas en el receptor no es el mismo. Por ésto mismo, la comparación se realiza con la magnitud normalizada.

Se puede observar que la caída en frecuencia es diferente en ambos casos, siendo más pronunciada en el caso de

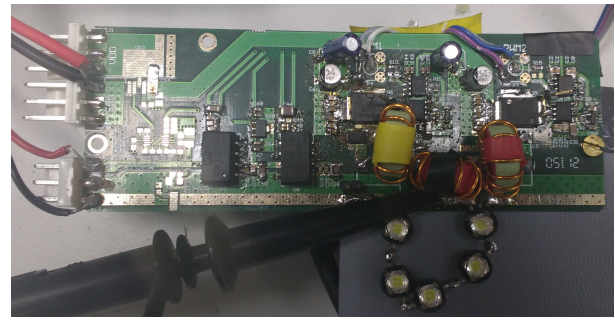


Figura 7: Circuito del convertidor reductor de doble fase con carga de 5 HB-LEDs en serie.

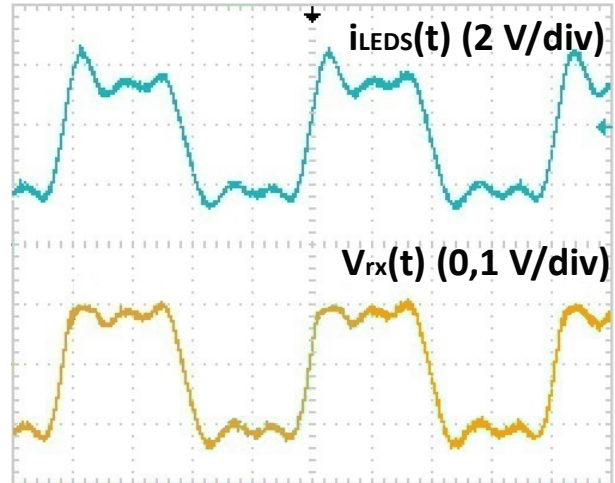


Figura 8: Formas de onda de funcionamiento del convertidor reductor de doble fase. En azul la señal sobre los HB-LEDs y en amarillo la tensión de salida del receptor.

tener en cuenta todo el espectro de emisión (-12 dB/dec.) comparada con únicamente la componente azul (-5 dB/dec.). Estos resultados son coherentes con los reportados en otras publicaciones [14, 15]. En términos de ancho de banda, la respuesta del HB-LED cae -3 dB a 2.5 MHz mientras que filtrando todas las componentes de luz excepto la componente azul el ancho de banda resultante es de entorno a 6 MHz.

IV-B. Resultados del convertidor reductor de 2 fases como transmisor VLC

El convertidor mostrado en la figura 2 es usado con una carga de 5 HB-LEDs del mismo modelo que el caracterizado en el apartado anterior. El prototipo es el mostrado en la figura 7 usando los parámetros de diseño mostrados anteriormente.

El convertidor funciona con una frecuencia de conmutación de 5 MHz para reproducir los 3 primeros armónicos de una señal cuadrada de 200 kHz (200 kHz de armónico fundamental, y 600 kHz y 1 MHz de 3º y 5º armónico). En la figura 8 se muestra en azul la corriente a través de los HB-LEDs, y en amarillo la salida del receptor midiendo la luz emitida por los HB-LEDs.

En la traza azul es una señal siempre positiva con un nivel de continua que polariza los HB-LEDs y un nivel de alterna

que es el que se quiere transmitir. La traza amarilla es la salida del receptor, donde solo se encuentra la componente de alterna de la señal recibida, dado que el nivel de continua ha sido previamente filtrado.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de caracterización en frecuencia de HB-LEDs y un transmisor VLC basado en un convertidor CC/CC reductor de doble fase con filtro de cuarto orden.

Con el sistema de caracterización propuesto basado en un amplificador clase-A como transmisor y fotodiodo y amplificador de transimpedancia como receptor se presenta una manera sencilla de caracterizar los HB-LEDs antes de usarlos como transmisores del sistema real. Conocer la respuesta en frecuencia es interesante para calcular el ancho de banda de transmisión y para técnicas de pre o post-equalización [16, 17] para aumentar ancho de banda del sistema global. El versatilidad del sistema propuesto permite la caracterización de los HB-LEDs en diferentes puntos de funcionamiento.

Con el sistema de transmisión basado en el convertidor CC/CC se consigue integrar la alimentación y transmisión de datos en un solo convertidor. Además permite un control sencillo mediante modulación PWM de la tensión a transmitir, permitiendo su integración con sistemas digitales. El uso de un convertidor de doble fase permite la eliminación del rizado de conmutación en la tensión de salida, permitiendo un ajuste mayor del filtro de salida.

Los resultados experimentales muestran una forma de obtener el ancho de banda de un HB-LED, llegando a 6 MHz filtrando la luz azul y 2.5 MHz sin filtrar. Además, con el uso de un convertidor reductor de doble fase como transmisor se consigue transmitir hasta 1 MHz usando HB-LEDs con una frecuencia de conmutación de 5 MHz. El convertidor alcanza una potencia de 20 W con una eficiencia del 90% haciendo las funciones de iluminación y transmisión.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado mediante la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R y la beca FPU con referencia FPU14/03268 y del Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto FC-15-GRUPIN14-143 (Grupín) y de los fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] "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.
- [2] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, March 2015, ch. 2: Optical wireless communication.
- [3] X. Li, L. Wu, Z. Liu, B. Hussain, W. C. Chong, K. M. Lau, and C. P. Yue, "Design and characterization of active matrix led microdisplays with embedded visible light communication transmitter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 14, pp. 3449–3457, July 2016.
- [4] X. Xiao, H. Tang, T. Zhang, W. Chen, W. Chen, J. Hao, R. Wang, and K. Wang, "Utilizing cdse/zns core/shell qds to improve the modulation bandwidth of wled for visible light communication," in *2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Aug 2016, pp. 1257–1261.
- [5] N. Lourenço, D. Terra, N. Kumar, L. N. Alves, and R. L. Aguiar, "Visible light communication system for outdoor applications," in *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, July 2012, pp. 1–6.
- [6] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, "8-gb/s rgby led-based wdm vlc system employing high-order cap modulation and hybrid post equalizer," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1–7, Dec 2015.
- [7] P. Manousiadis, H. Chun, S. Rajbhandari, R. Mulyawan, D. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. McKendry, M. Ijaz, E. Xie, E. Gu, M. D. Dawson, H. Haas, G. A. Turnbull, I. D. W. Samuel, and D. O'Brien, "Demonstration of 2.3 gb/s rgb white-light vlc using polymer based colour-converters and gan microleds," in *2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM)*, July 2015, pp. 222–223.
- [8] A. A. Abdulkafi, M. Y. Alias, and Y. S. Hussein, "Performance analysis of dco-ofdm in vlc system," in *2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, Nov 2015, pp. 163–168.
- [9] A. Singh, A. Jain, and P. Vyavahare, "A study of peak to average power ratio for different companding techniques in vlc-ofdm system," in *2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Sept 2016, pp. 2390–2393.
- [10] X. Wu, D. Basnayaka, M. Safari, and H. Haas, "Two-stage access point selection for hybrid vlc and rf networks," in *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept 2016, pp. 1–6.
- [11] X. Bao, X. Zhu, T. Song, and Y. Ou, "Protocol design and capacity analysis in hybrid network of visible light communication and ofdma systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1770–1778, May 2014.
- [12] J. Sebastián, D. G. Aller, J. Rodríguez, D. G. Lamar, and P. F. Miaja, "On the role of the power electronics on visible light communication," in *2017 Thirty-Two Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, March 2017.
- [13] 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.
- [14] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won, "100-mb/s nrz visible light communications using a postequalized white led," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 15, pp. 1063–1065, Aug 2009.
- [15] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "80 mbit/s visible light communications using pre-equalized white led," in *2008 34th European Conference on Optical Communication*, Sept 2008, pp. 1–2.
- [16] H. Li, X. Chen, B. Huang, D. Tang, and H. Chen, "High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 119–122, Jan 2014.
- [17] X. Huang, J. Shi, J. Li, Y. Wang, and N. Chi, "A gb/s vlc transmission using hardware preequalization circuit," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 18, pp. 1915–1918, Sept 2015.