

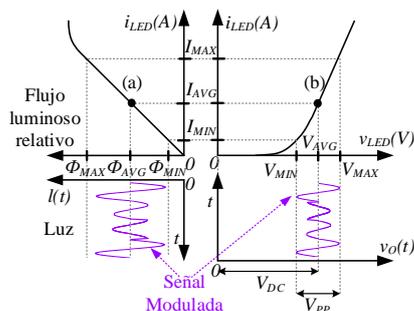
# Transmisores VLC basados en la suma de intensidades lumínicas

Daniel G. Aller, Pablo F. Miaja, Diego G. Lamar, Juan Rodríguez y Javier Sebastián.  
 {garciaadaniel, fernandezmiapablo, gonzalezdiego, rodriguezjuan, sebas}@uniovi.es  
 Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas,  
 Universidad de Oviedo, Gijón 33204, España.

**Resumen**—In this work two high efficiency LED drivers for Visible Light Communication are presented. The proposal takes advantage of the light by adding the signals in their light form instead of electrically, which leads to a reduction on the complexity of the design. The first design is based on the Outphasing technique in which an amplitude and phase modulated signal is generated by the sum of two phase modulated constant envelope signals. The transmitter is made up of two Class E RFPAs. The second design is based on the linear-assisted technique when a Class E amplifier is combined with a linear stage. The errors introduced by the phase modulation of the class E are corrected by means of this linear stage.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de las comunicaciones inalámbricas se realizan mediante el uso del espectro radioeléctrico (*Radio Frequency*, RF), lo cual está llevando a una alta congestión del espectro y, por tanto, a una regulación cada vez más estricta [1]. Debido a esta situación se han propuesto las comunicaciones por luz visible (*Visible Light Communication*, VLC) [2]. La tecnología VLC se basa en el uso del espectro de luz visible y de la infraestructura de iluminación basadas en LEDs, donde la capacidad de los LEDs de modular su luz rápidamente los hace capaces de emitir las señales necesarias para la comunicación. En cierto sentido actúan como la antena de un sistema de RF. No obstante es importante destacar una diferencia. En un sistema tradicional de RF la onda electromagnética que se propaga es de la frecuencia de la portadora. En las comunicaciones VLC la onda electromagnética que se propaga es luz con una frecuencia muy alta. Sobre la intensidad del flujo luminoso generalmente se introduce una portadora que es la que se modula con la información. Es un enfoque similar a los sistemas de radio sobre fibra. Este es el esquema que se sigue en este artículo. El uso de la infraestructura de iluminación LED en VLC se basa en la realización de dos funciones al mismo tiempo: la función de iluminación y la de comunicación. En la figura 1 se ilustran ambas funciones



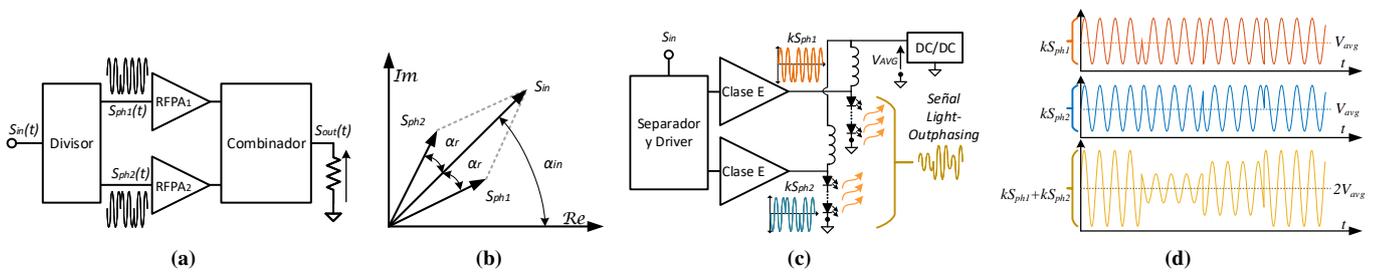
**Figura 1:** Curvas tensión/corriente y corriente/luz en un LED funcionando como transmisor VLC.

en las curvas tensión/corriente y corriente/luz típicas de un LED. Para realizar la función de iluminación, el LED se polariza usando una tensión media  $V_{AVG}$  elegida dentro de la zona lineal de funcionamiento del LED, que hace que una corriente  $I_{AVG}$  media circule por el LED produciendo una luz media  $\Phi_{AVG}$ . Para realizar la función de comunicación, se aplica la señal de comunicación en torno a  $V_{AVG}$ . En el caso ilustrado se utiliza una señal que varía su amplitud (entre  $V_{MIN}$  y  $V_{MAX}$ ) y su fase. Esto hace que la corriente por el LED varíe proporcionalmente entre  $I_{MIN}$  y  $I_{MAX}$  y la luz emitida entre  $\Phi_{MIN}$  y  $\Phi_{MAX}$  respectivamente. Es importante enfatizar que las funciones de iluminación y generación de señal pueden ser realizadas por circuitería diferente, y por lo tanto se pueden considerar eficiencias diferentes para cada una de las funciones, ya sea la eficiencia generando la señal de comunicación, la de iluminar o la del sistema completo. La mayor parte de las propuestas de transmisores VLC están basadas en la utilización de amplificadores lineales de potencia para realizar la función de comunicación (p. ej. Clase A o B) [3], los cuales consiguen una eficiencia muy baja en la generación de señal, empeorando la eficiencia del sistema.

Como alternativa al uso de amplificadores lineales, se ha propuesto el uso de convertidores CC/CC para mejorar el rendimiento del transmisor VLC [4, 5]. El convertidor CC/CC generaría tanto la polarización de los LEDs como la señal de comunicación, alcanzando una eficiencia del 90% en el sistema completo (funciones de iluminación y comunicación), pero con la desventaja de tener un ancho de banda limitado, y con un diseño y control más complejo.

En esta última solución, el ancho de banda limitado y bajo *slew rate* de los convertidores CC/CC hacen que en los instantes donde la señal de comunicación necesite cambios rápidos, la señal de salida del convertidor tenga distorsión. Para conseguir mantener la alta eficiencia dada por los convertidores y además conseguir una respuesta rápida, el uso de una etapa lineal en paralelo (ayuda lineal) con el convertidor ha sido ampliamente usado, especialmente en técnicas de seguimiento de envolvente (*Envelope Tracking*, *ET*) y eliminación y restauración de envolvente (*Envelope Elimination and Restoration*, *EER*) [6, 7].

En este artículo se presentan dos técnicas que hacen uso del hecho que la señal deseada en un sistema VLC es luz y por lo tanto permite la suma de señales de forma eléctricamente aislada. La primera de las propuestas de este artículo es una adaptación de la técnica de *Outphasing* para VLC. La técnica de *Outphasing* fue presentada en los años 30 [8] como un método de aumentar la eficiencia de los amplificadores de RF cuando la señal de comunicación tenía amplitud variable (caso de peor rendimiento de dichos amplificadores). La



**Figura 2:** (a) Diagrama de bloques de técnica de *Outphasing* (b) Diagrama fasorial ilustrando la técnica de *Outphasing*. (c) Diagrama de bloques del amplificador usando la técnica de *Light-Outphasing*. (d) Señales de ejemplo de la técnica de *Light-Outphasing*

técnica se basa en reproducir una señal senoidal modulada en amplitud y fase mediante la suma de dos señales senoidales moduladas en fase y con amplitud constante. Al realizar la función de amplificación sobre señales de amplitud constante, los amplificadores podrán trabajar en el punto de mayor rendimiento, aumentando considerablemente el rendimiento. La propuesta se basa en el mismo principio que la técnica tradicional pero la suma de las dos señales de amplitud constante se realiza en el dominio óptico. Al realizar la suma en luz en lugar de eléctricamente se consigue evitar la conexión eléctrica entre la salida de ambos amplificadores consiguiendo aislamiento eléctrico entre las mismas, lo cual simplifica enormemente el diseño de los amplificadores. El diseño basado en dos amplificadores Clase E se prepara para transmitir una modulación digital 16-QAM con una frecuencia de portadora de 5 MHz, alcanzando una tasa binaria de hasta 4 Mbps y una distancia de transmisión de hasta 1 m. El prototipo alcanza una eficiencia del 78 % en la generación de señal (mayor que la máxima eficiencia que alcanzarían las alternativas lineales reproduciendo esa modulación) y un 92 % en la eficiencia del sistema global (próxima a la eficiencia de la alternativa usando convertidores CC/CC). Utilizando el principio de la asistencia lineal y de la suma en el dominio óptico se presenta una adaptación de la técnica de ayuda lineal para VLC. El transmisor construido está basado en un amplificador clase E con asistencia lineal. El amplificador clase E genera la señal de comunicaciones y manejando la mayor parte de la potencia de comunicación (92 % de la potencia de señal) a una alta eficiencia (81 %). Por otro lado, la etapa lineal formada por un amplificador lineal de potencia genera la señal solamente en los momentos en los que es necesario (p. ej. en los saltos de fase). Al evitar la conexión de ambos amplificadores se consiguen las mismas ventajas que en la propuesta anterior. Como resultados experimentales se reproduce una modulación digital de fase 16-PSK con una frecuencia de portadora de 1 MHz, alcanzando una tasa binaria de 1 Mbps a una distancia de 1 m. La eficiencia en la generación de señal alcanza el 75 % y la eficiencia total, considerando generación de señal y polarización de los LEDs es del 85 %.

## II. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA TÉCNICA DE OUTPHASING

La figura 2a muestra la implementación tradicional de la técnica de *Outphasing* [8]. El circuito está compuesto por un separador, dos amplificadores de potencia de RF (*Radio Frequency Power Amplifier*, RFPA) y un combinador.

Como es bien sabido es posible descomponer una señal senoidal que varía su amplitud  $A_{in}$  y su fase  $\alpha_{in}$  en dos

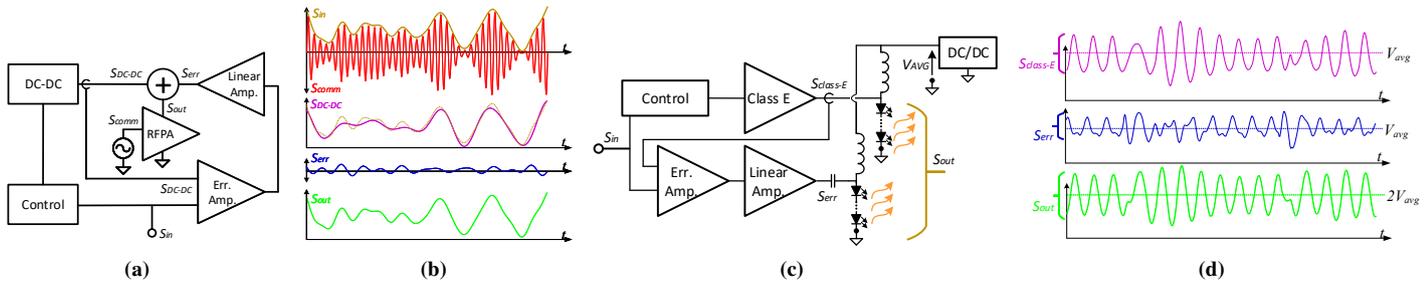
señales senoidales de la misma frecuencia  $f_s$ , moduladas en fase y de amplitud constante  $S_{ph1}$  and  $S_{ph2}$  cuya suma es  $S_{in}$ .  $S_{ph1}$  y  $S_{ph2}$  tiene la misma amplitud  $A_{ph}$  y fases  $\alpha_{ph1}$  y  $\alpha_{ph2}$  respectivamente, como se muestra en la figura 2b. Sobre estas dos señales  $S_{ph1}$  y  $S_{ph2}$  se realiza la función de amplificación, consiguiendo hacer trabajar a los amplificadores en su zona de mayor rendimiento, dado que las señales son de amplitud constante.

A la hora de implementar un transmisor basado en *Outphasing*, la mayor dificultad radica en el diseño del combinador de salida que suma las dos señales y conecta las salidas de los RFPAs. La conexión entre las salidas de dos amplificadores no puede hacerse directamente debido a que la impedancia que verá uno de los amplificadores dependerá del punto de funcionamiento del otro amplificador y viceversa [9]. Este efecto es especialmente crítico en amplificadores con circuitos resonantes a la salida o filtros (p. ej. Clase E), donde su correcto funcionamiento depende del ajuste del filtro.

La idea que se propone en este artículo y a la cual nos referiremos como *Light-Outphasing* es la de separar la carga de LEDs en dos *strings* y conectar cada una a uno de los RFPAs y que las señales se sumen en luz como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2c y con las formas de onda de ejemplo de la figura 2d. Ambos *strings* de LEDs están polarizados con un convertidor CC/CC externo que aplica la tensión media  $V_{AVG}$  necesaria. Debido a que las señales se suman en luz en lugar de eléctricamente, se evita la necesidad de usar el combinador necesario en la configuración tradicional, lo cual implica una gran simplificación en el diseño y la eliminación de la influencia indeseada entre amplificadores, mejorando así la eficiencia del sistema. El transmisor VLC está hecho con dos amplificadores clase E que generan las señales  $S_{ph1}$  y  $S_{ph2}$  necesarias para conformar el *Outphasing*.

## III. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN TRANSMISOR CON AYUDA LINEAL

En la imagen 3a se muestra el diagrama de bloques y en la imagen 3b un ejemplo de formas de onda de un convertidor CC/CC con ayuda lineal utilizado típicamente en ET y EER. La idea principal de las técnicas de ET y EER es variar la tensión de alimentación de un amplificador lineal siguiendo la señal de comunicación  $S_{comm}$  que han de amplificar. Cuanto más próxima esté la señal de alimentación del amplificador a la amplitud de la señal dada por el mismo, mayor será el rendimiento del amplificador. La función de variar la alimentación del amplificador es realizada por un convertidor CC/CC que reproduce la señal  $S_{in}$ , que es la envolvente de la señal de comunicaciones  $S_{comm}$ . La técnica aprovecha la alta eficiencia del convertidor pero debido a



**Figura 3:** (a) Diagrama de bloques de un amplificador con ayuda lineal para ET (b) Señales más representativas en un amplificador con ayuda lineal. (c) Diagrama de bloques de la propuesta de ayuda lineal mediante la suma de intensidades lumínicas. (d) Señales más representativas de la propuesta de ayuda lineal mediante la suma de intensidades lumínicas.

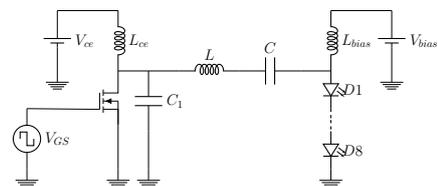
su ancho de banda limitado y bajo *slew rate* la señal que genera el convertidor  $S_{DC-DC}$  es próxima a la envolvente  $S_{in}$  pero con distorsión perceptible. Para corregir la distorsión de la señal se añade una etapa lineal con un ancho de banda mayor y mayor *slew rate* que el convertidor, pero con peor eficiencia. La etapa lineal entrega la señal de error  $S_{err}$ , que es la diferencia entre  $S_{in}$  y  $S_{DC-DC}$ . De esta manera la etapa lineal solo entrega potencia cuando es necesario. Las señales  $S_{DC-DC}$  y  $S_{err}$  se suman para finalmente alimentar al amplificador de potencia (RFPA). Cuanto menor sea la diferencia entre  $S_{comm}$  and  $S_{out}$ , mayor será la eficiencia final de todo el sistema. La principal dificultad de la técnica de ayuda lineal es el diseño del combinador de salida que suma ambas señales y junta las salidas del convertidor y de la ayuda lineal. El diseño se basa en encontrar una relación de compromiso entre eficiencia y rapidez. Aumentar la rapidez implica aumentar la potencia entregada por la etapa lineal, lo cual reduce el rendimiento del sistema. Por lo tanto, el convertidor CC/CC ha de entregar la mayor parte de la potencia y la ayuda lineal ha de entregar potencia solamente cuando el convertidor no alcance la rapidez requerida por la señal de comunicación. Basado en el diagrama de bloques de la figura 3a, la adaptación propuesta de la técnica de asistencia lineal para VLC se muestra en la figura 3c y las formas de onda en un ejemplo de funcionamiento en la figura 3d. La adaptación sigue el mismo principio de funcionamiento que la técnica tradicional, pero en este caso el convertidor CC/CC es sustituido por un amplificador clase E, el cual es asistido linealmente por un amplificador lineal. La adaptación de la técnica de asistencia lineal para VLC se basa en la idea de aprovechar que la señal de salida de un sistema VLC es luz, y en lugar de sumar las contribuciones del clase E y de la asistencia lineal eléctricamente, estas se suman en luz. Esta modificación elimina la necesidad de un combinador que conecte las salidas de ambos circuitos, simplificando el diseño. En la figura 3c se muestra el desacople de ambos circuitos dividiendo la carga de LEDs en dos *strings* y conectando cada circuito a un *string* diferente y en la figura 3d se observan las diferentes formas de onda. Un convertidor CC/CC externo entrega la tensión  $V_{AVG}$  que polariza ambos *strings* de LEDs en su zona lineal. Cada *string* está conectado a uno de los amplificadores, el clase E aplicando la señal  $S_{class-E}$  y el amplificador lineal aplicando la señal  $S_{err}$ . Cada uno emitirá una luz proporcional a las señales aplicadas y cuya suma es  $S_{out}$ .

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

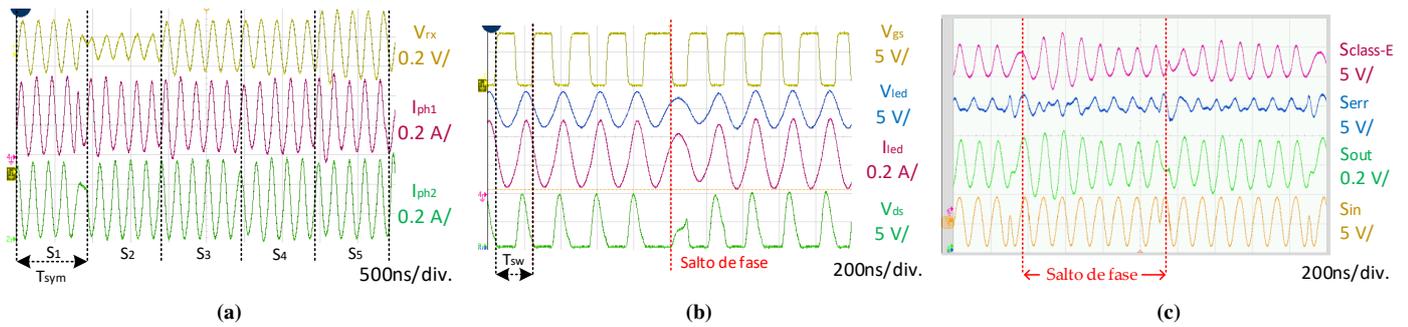
Una vez introducidas las aplicaciones, *Light-outphasing* y asistencia lineal, se describen los resultados experimentales. En ambas aplicaciones se utilizando diferentes amplificadores, dos clases E en la de *Light-outphasing* y un clase E y un amplificador lineal en la asistencia lineal. En todos los casos la carga es la misma un *string* de 8 LEDs, los cuales son polarizados con un convertidor CC/CC externo con una tensión  $V_{AVG} = 27$  V y una corriente  $I_{AVG} = 0.23$  A.

Los amplificadores clase E se diseñan atendiendo a la señal de comunicaciones que se desea procesar. El amplificador, mostrado en la figura 4, está compuesto por, un transistor, un circuito resonante ( $C_1$ ,  $C$  y  $L$ ), una bobina de polarización del amplificador  $L_{ce}$ , y una bobina de polarización de los LEDs  $L_{bias}$ . El circuito resonante se diseña acorde al ancho de banda necesario por modulación utilizada. En el caso del *Light-outphasing* se diseña con el objetivo de transmitir una modulación 16-QAM con una frecuencia de portadora de 5 MHz, que coincide con la frecuencia de conmutación. No obstante la señal que reproduce cada amplificador es una modulación de fase con 16 posibles fases, y es sobre la que hay que hacer la estimación de ancho de banda. Aplicando el mismo proceso de diseño el amplificador clase E para la asistencia lineal se diseña con una frecuencia de conmutación  $f_{sw} = 1$  MHz, reproduciendo a su salida una señal senoidal de la misma frecuencia. El proceso de diseño del circuito resonante de salida es igual que en el caso anterior adaptado a la modulación 16-PSK.

Al igual que en el caso del amplificador clase E, el amplificador lineal está conectado a un *string* de 8 LEDs polarizados externamente como se muestra en la figura 3c. El objetivo del amplificador lineal es entregar la señal de error  $S_{err}$ , que se calcula obteniendo la diferencia entre la señal que entrega el amplificador clase E  $S_{class-E}$  y una señal de referencia  $S_{in}$ . En la figura 5a se muestran las formas de onda más significativas del clase E durante un salto de fase. La señal  $V_{gs}$  es la señal que controla la puerta del MOSFET en la que se observa un cambio de fase. Antes y después del cambio de fase se observa el correcto



**Figura 4:** Esquema circuital del amplificador Clase E.



**Figura 5:** (a) Formas de onda en un RFPA en clase E durante un cambio de fase. (b) Señales de comunicación del transmisor usando light-outphasing.  $I_{ph1}$  y  $I_{ph2}$  corrientes por los strings de LEDs,  $V_{rx}$  es la señal recibida por el receptor óptico, resultado de la suma de luces. (c) Señales más representativas del sistema de asistencia lineal durante un salto de fase.

funcionamiento del amplificador, donde  $V_{led}$  y  $I_{led}$  son la tensión y corriente por los LEDs respectivamente y  $V_{ds}$  la tensión drenador-fuente del MOSFET. Se observa que la señal de salida es senoidal y que se alcanza conmutación a tensión cero (ZVS). En cambio, durante el cambio de fase hay un ciclo de transición hasta que se alcanza la fase deseada y durante el cual no se alcanza ZVS. Este último efecto reduce la eficiencia del amplificador, generando una relación entre tiempo de símbolo  $T_{sym}$  y eficiencia. A menos tiempo de símbolo, mayor tasa binaria pero más saltos de fase y por lo tanto menor eficiencia. El error producido por este salto de fase es el que corregirá la etapa lineal. Los resultados de la técnica de light-outphasing pueden verse en la figura 5b. Se aprecia como ambos amplificadores procesan señales de envolvente constante mientras que el receptor recibe una señal con envolvente variable. En la figura 5c se muestran las señales más representativas de la comunicación durante un salto de fase.  $S_{in}$  es la señal de comunicación generada como referencia y la señal  $S_{class-E}$  es la señal de salida del amplificador clase E. Debido a la distorsión durante los saltos de fase en la señal  $S_{class-E}$  dada por el amplificador clase E, la señal de error  $S_{err}$  presenta mayor amplitud en esos puntos. La señal de error  $S_{err}$  es amplificada por un amplificador lineal y conectada a un string de LEDs. Para validar el concepto, la señal  $S_{out}$  se obtiene con un receptor óptico colocado delante de ambos strings, el cual es el resultado de la suma de las señales  $S_{class-E}$  y  $S_{err}$  como intensidades lumínicas. Se puede observar que la suma de ambas señales consigue corregir la distorsión en los saltos de fase, obteniéndose una señal más parecida a la señal  $S_{in}$ .

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan dos diseños de transmisores VLC aprovechando la suma de señales en el dominio óptico con el objeto de simplificar los diseños debido al aislamiento eléctrico entre señales. Gracias a este efecto se ha aplicado la técnica de *Outphasing* a las comunicaciones VLC (*Light-Outphasing*). En esta adaptación, las dos señales de amplitud constante se suman en luz en lugar de eléctricamente, mejorando la eficiencia y eliminando la necesidad del combinador, lo cual es la parte más compleja de la técnica de *outphasing*. El transmisor propuesto reproduce una modulación digital 16-QAM, alcanzando una tasa binaria de 4 Mbps a una distancia de 1 m. El prototipo alcanza una eficiencia del 78% en la generación de señal (superior a la máxima eficiencia en amplificador Clase A o B) y de un 92% en la eficiencia del

sistema global (próxima a la eficiencia de la alternativa usando convertidores CC/CC).

El segundo diseño hace uso de este aislamiento para realizar un transmisor VLC basado en un amplificador clase E con ayuda lineal. Este aislamiento hace innecesario el combinador que balancea la potencia entre ambos amplificadores, simplificando el diseño. Para demostrar la capacidad de comunicación el prototipo reproduce una modulación de fase digital 16-PSK con una frecuencia de portadora de 1 MHz, alcanzando 1 Mbps de tasa binaria. Debido a que el clase E entrega la mayor parte de la potencia, y la etapa lineal solamente la señal de error, el prototipo alcanza una eficiencia eléctrica en la generación de la señal del 75% y de un 85% en la eficiencia del sistema total, teniendo en cuenta generación de señal y polarización de los LEDs por el convertidor CC/CC.

## AGREDECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía a través de del proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R, el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto IDI/2018/000179, la beca BP17-91 y los fondos FEDER.

## REFERENCIAS

- [1] Cisco Systems. (2017) Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021.
- [2] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, September 2011.
- [3] 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, July 2016.
- [4] 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*, 2018.
- [5] J. Sebastian, D. G. Lamar, D. G. Aller, J. Rodríguez, and P. F. Miaja, "On the role of power electronics in visible light communication," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018.
- [6] P. F. Miaja, M. Rodríguez, A. Rodríguez, and J. Sebastian, "A linear assisted DC/DC converter for envelope tracking and envelope elimination and restoration applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 7, July 2012.
- [7] D. Li, Y. Zhang, M. Rodríguez, and D. Maksimovic, "Band separation in linear-assisted switching power amplifiers for accurate wide-bandwidth envelope tracking," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2014.
- [8] H. Chireix, "High power outphasing modulation," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 23, no. 11, Nov 1935.
- [9] F. Raab, "Efficiency of outphasing RF Power-Amplifier systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 33, no. 10, Oct 1985.