

# Diseño de un transmisor VLC con asistencia lineal basado en la suma de intensidades lumínicas.

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

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas,

Universidad de Oviedo, Gijón 33204, España.

Email: garciaadaniel@uniovi.es

## Abstract:

En este artículo se presenta un *driver* de alta eficiencia para comunicaciones por luz visible (*visible Light Communication, VLC*) basado en la técnica de ayuda lineal. La técnica de ayuda lineal está basada en la utilización de una circuitería de alta eficiencia pero ancho de banda limitado que maneje la mayor parte de la potencia de comunicaciones y una circuitería rápida pero de baja eficiencia (etapa lineal) que corrija la distorsión de la señal. La propuesta aquí presentada aprovecha que la señal de salida de un sistema VLC es luz, permitiendo que la suma de las contribuciones de la etapa principal y la ayuda lineal se puedan hacer en luz en lugar de eléctricamente, lo cual permite el aislamiento entre ambas etapas y reduce la complejidad del diseño comparado con la técnica tradicional usada en seguimiento de envolvente (*Envelope Tracking*) y en eliminación y restauración de envolvente (*Envelope Elimination and Restoration*). Como resultados experimentales, se presenta el diseño de un transmisor con ayuda lineal basado en un amplificador clase E generando una modulación digital de fase 16-PSK con una frecuencia de portadora de 1 MHz. Por una parte, el amplificador clase E proporciona la mayor parte de la potencia de señal, (92 % de la potencia de señal) a alta eficiencia (81 % de eficiencia), mientras que la etapa lineal proporciona la señal de error. La eficiencia en la generación de señal es del 75 % y la eficiencia del sistema completo, teniendo en cuenta la polarización de los LEDs alcanza el 85 %.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el tráfico inalámbrico ha crecido dramáticamente, el cual se basa casi enteramente en el espectro de radio frecuencia (*Radio Frequency, RF*). La situación actual y las previsiones de crecimiento futuro llevarán a una congestión y a una regulación más estricta del espectro de RF [1].

Una de las alternativas más prometedoras para evitar la congestión del espectro de RF son las comunicaciones por luz visible (*Visible Light Communication, VLC*) [2–4]. Por una parte, VLC utiliza el no regulado y amplio espectro de luz visible (desde 280 nm a 750 nm) y, por otra parte, aprovecha la infraestructura de iluminación basada en LEDs (*Solid State Lighting, SSL*). La capacidad que tienen los LEDs de variar su luz rápidamente los hace capaces de emitir las señales de comunicación utilizadas actualmente para comunicaciones inalámbricas, haciendo posible las comunicaciones VLC.

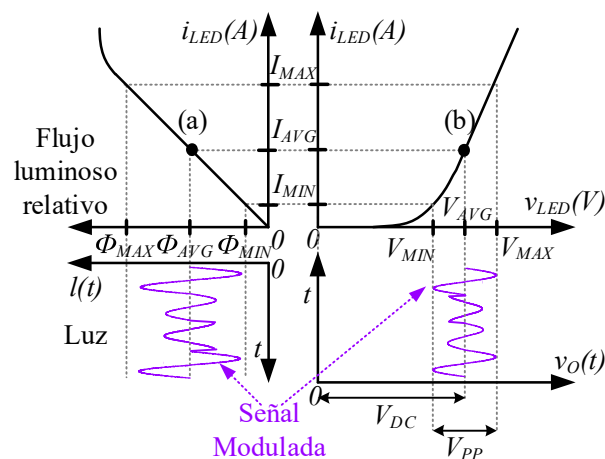


Figura 1: Curvas tensión/corriente y corriente/luz en un LED funcionando como transmisor VLC

El uso de la infraestructura SSL para VLC implica la realización de dos funciones al mismo tiempo: iluminación y comunicaciones. En la figura 1 se ilustran ambas funciones en las curvas típicas de tensión/corriente y corriente/flujo luminoso relativo de un LED. Para ilustrar el uso de un LED en un sistema VLC se aplica una señal de comunicaciones en tensión al LED. El nivel medio de la señal  $V_{AVG}$  polariza el LED, haciendo circular una corriente media  $I_{AVG}$  por el LED, el cual emite un flujo luminoso medio  $\Phi_{AVG}$ . Asumiendo que la señal de comunicaciones aplicada en torno al valor medio  $V_{AVG}$  es suficientemente rápida para no ser percibida por el ojo humano, será el valor medio de la señal el que controle el nivel de iluminación. Sobre el valor medio se aplica una señal de comunicaciones, que en el caso de la imagen es una señal modulada en fase y amplitud. Siempre que el LED trabaje en su zona lineal, la corriente por el LED y la luz emitida por el mismo serán proporcionales a la señal en tensión aplicada, posibilitando así la comunicación.

Debido a las dos funciones diferentes realizadas por un transmisor VLC, y que las mismas pueden ser realizadas por diferente circuitería, se consideran eficiencias diferentes, la eficiencia de la generación de señal y la eficiencia de la polarización de los LEDs.

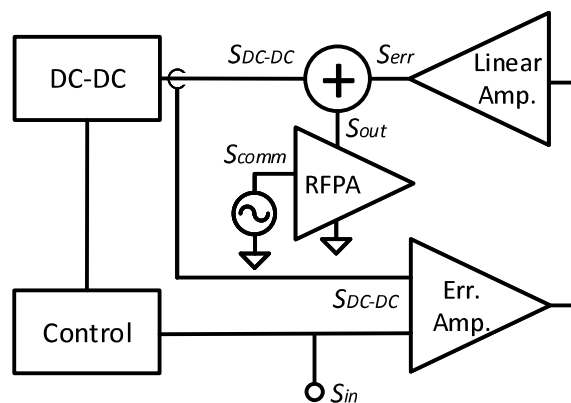
Como una de las grandes ventajas del uso de SSL es su alta eficiencia, uno de los retos en el diseño del transmisor VLC es proporcionar una alta tasa binaria de comunicaciones

sin deteriorar excesivamente la eficiencia del sistema total por incluir la función de comunicación. Una de las soluciones más utilizadas en el diseño de transmisores VLC es el uso de amplificadores lineales en la generación de la señal de comunicación (p. ej. clase A, B o AB) [5–8]. Esta solución alcanza altas tasas binarias pero con una eficiencia baja, empeorando la eficiencia del sistema total.

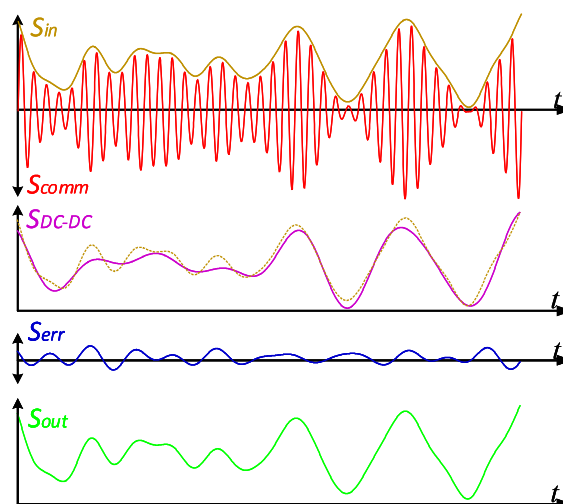
Como alternativa al uso de amplificadores lineales, se ha propuesto el uso de convertidores CC/CC para mejorar el rendimiento del transmisor VLC [9–12]. El convertidor CC/CC generaría tanto la polarización de los LEDs como la señal de comunicación, alcanzando una eficiencia del 90% en el sistema completo (funciones de iluminación y comunicación), pero con la desventaja de tener un ancho de banda limitado, menor que el de los amplificadores lineales y con un diseño y control más complejo.

En la 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*) [13–15]. En estos sistemas se ha de buscar una relación de compromiso entre *slew rate* y eficiencia, debido a la baja eficiencia de la etapa lineal. Mejorar el *slew rate* implica que la etapa lineal maneja más potencia y por lo tanto empeora la eficiencia del sistema global.

En este artículo 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). La técnica es adaptada a un transmisor VLC aprovechando que la señal de salida en este tipo de sistemas es luz, y por lo tanto la suma de ambas contribuciones se hará sumando las intensidades de luz producidas por ambos sistemas en lugar de sumarlas eléctricamente. Evitar la conexión de las salidas de ambos amplificadores simplifica enormemente el diseño y evita la influencia entre ellos, lo cual aumenta el rendimiento total. 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%.



**Figura 2:** Block diagram of a linear-assisted DC-DC converter used in Envelope Tracking and Envelope Elimination and Restoration.



**Figura 3:** Working example of the main waveforms in a linear-assisted transmitter.

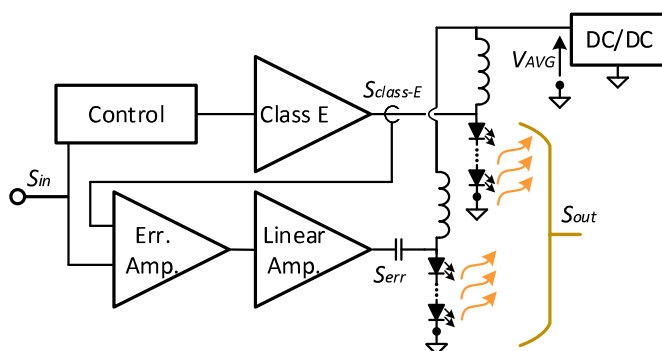
## II. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN TRANSMISOR CON AYUDA LINEAL

En la imagen 2 se muestra el diagrama de bloques y en la imagen 3 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 [16] y EER [17] 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  $S_{in}(t)$ , que es la envolvente de la señal de comunicaciones  $S_{comm}(t)$ . La técnica aprovecha la alta eficiencia del convertidor pero debido a su ancho de banda limitado y bajo *slew rate* la señal que genera el convertidor  $S_{DC-DC}(t)$  es próxima a la envolvente  $S_{in}(t)$  pero con distorsión perceptible. Para corregir la distor-

ción de la señal se añade una etapa lineal con un ancho de banda mayor y mayor *slew rate* que el convertidor, pero peor eficiencia. La etapa lineal entrega la señal de error  $S_{err}(t)$ , que es la diferencia entre la envolvente de la señal  $S_{in}(t)$  y la entregada por el convertidor  $S_{DC-DC}(t)$ . De esta manera la etapa lineal solo entrega potencia cuando es necesario. Las señales  $S_{DC-DC}(t)$  y  $S_{err}(t)$  se suman para finalmente alimentar al amplificador de potencia (RFPA). Cuanto menor sea la diferencia entre  $S_{comm}(t)$  and  $S_{out}(t)$ , 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. Este combinador controla el flujo de potencia para mantener una alta eficiencia. 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 en los momentos donde el convertidor no alcance la rapidez requerida por la señal de comunicación.

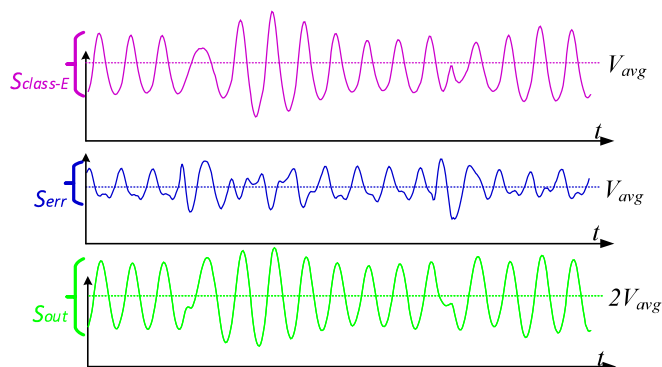
### III. ADAPTACIÓN DE LA TÉCNICA DE AYUDA LINEAL PARA VLC

Basado en el diagrama de bloques de la figura 2, la adaptación propuesta de la técnica de asistencia lineal para VLC se muestra en la figura 4 y las formas de onda en un ejemplo de funcionamiento en la figura 5. 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.



**Figura 4:** Diagrama de bloques de la propuesta de ayuda lineal mediante la suma de intensidades lumínicas.

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, y además añade aislamiento eléctrico, eliminando la influencia entre ambos circuitos. Esta influencia



**Figura 5:** Señales más representativas de la propuesta de ayuda lineal mediante la suma de intensidades lumínicas.

es especialmente crítica en amplificadores con circuitos resonantes o filtros a la salida, donde su correcto funcionamiento depende del correcto ajuste del circuito resonante, y el cual se puede ver modificado por el punto de funcionamiento del circuito conectado en paralelo a la salida. En la figura 4 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 5 se observan las diferentes formas de onda. Un convertidor CC/CC externo entrega la tensión  $V_{AVG}$  a ambos *strings* de LEDs, polarizándolos en su zona lineal de trabajo. El valor de tensión  $V_{AVG}$  controla la iluminación media que emite el sistema. 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 de intensidades lumínicas es  $S_{out}$ . Se puede observar que la señal  $S_{class-E}$  tiene mayor distorsión en los puntos donde se cambia de fase, que son aquellos donde la señal de error  $S_{err}$  tiene mayor amplitud. Dicha distorsión es corregida en  $S_{out}$ , al sumar ambas señales.

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como resultados experimentales, se construye un prototipo de transmisor VLC con un amplificador clase E con ayuda lineal, mostrado en las figuras 9, 7a y 7b. El diseño aprovecha que la señal de salida de un sistema VLC es luz, y en lugar de sumar las diferentes contribuciones del amplificador clase E y de la ayuda lineal eléctricamente, las señales son sumadas como intensidades lumínicas. Cada amplificador es conectado a un *string* de 8 LEDs diferente, 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.

#### IV-A. Ejemplo de funcionamiento

En la figura 8 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

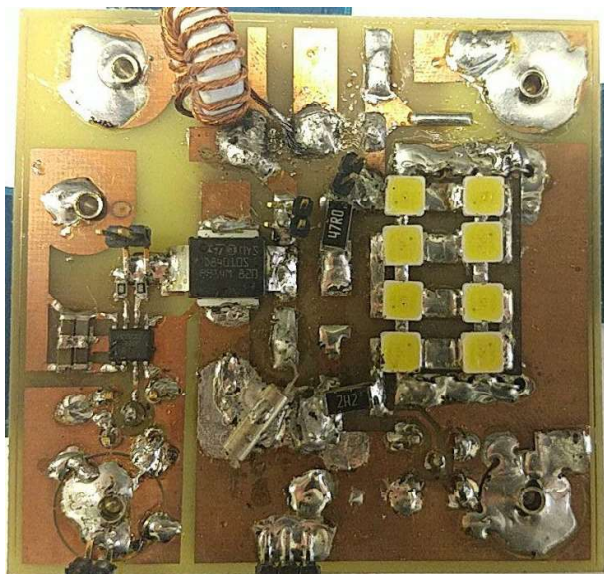
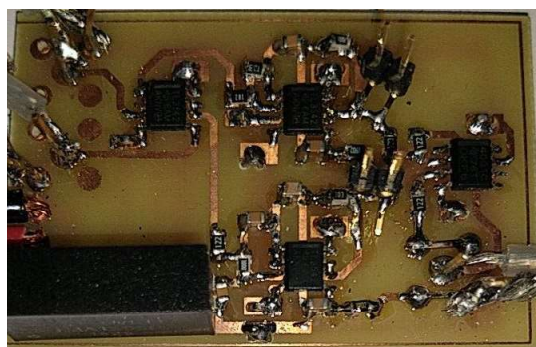
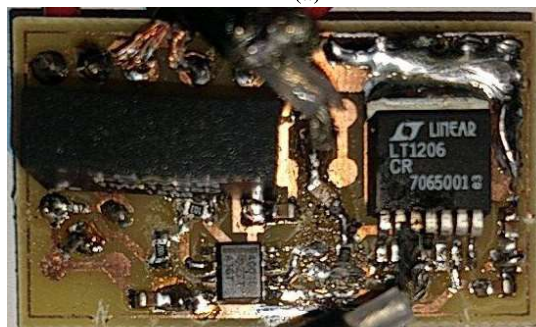


Figura 6: Circuito del amplificador clase E



(a)



(b)

Figura 7: En 7a se muestra el circuito de cálculo de la señal de error  $S_{err}$  y en 7b se muestra el circuito del amplificador lineal.

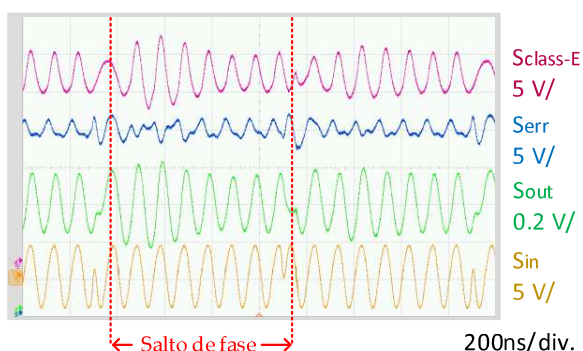


Figura 8: Señales más representativas del sistema durante un salto de fase.  $S_{class-E}$ ,  $S_{err}$  and  $S_{in}$  son medidas en el transmisor mientras que  $S_{out}$  es medida mediante un receptor óptico.

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  $S_{in}$  deseada.

#### IV-B. Esquema de modulación

Para validar la comunicación el prototipo reproduce una modulación digital de fase 16-PSK con una frecuencia de portadora de 1 MHz. La modulación tiene 16 señales diferentes (16 fases diferentes) donde cada señal está codificada con 4 bits, alcanzando una tasa binaria de 1 Mbps.

#### IV-C. Diseño del amplificador Clase E

En la figura 9 se muestra el circuito del amplificador clase E utilizado y en la figura 6 el prototipo construido.

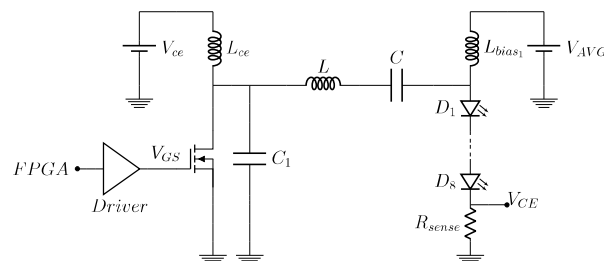
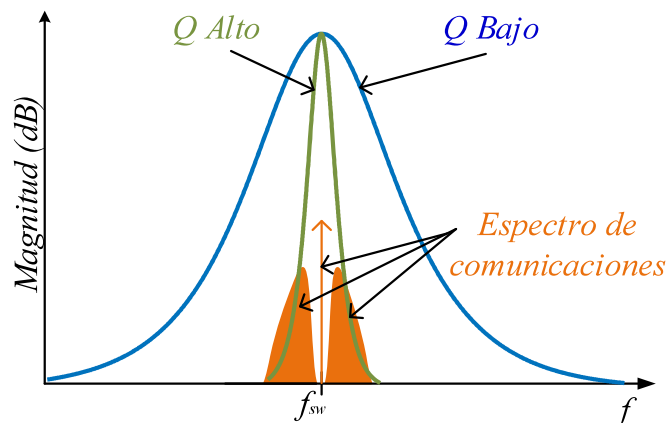


Figura 9: Esquema circuital del amplificador Clase E.

El amplificador se diseña con una frecuencia de conmutación  $f_{sw} = 1$  MHz, reproduciendo a su salida una señal senoidal de la misma frecuencia. El amplificador está conectado a uno de los *strings* de 8 *XLamp MX-3* LEDs como se muestra en el circuito, polarizados mediante un convertidor CC/CC externo que entrega la tensión  $V_{AVG}$ . El diseño del

circuito resonante de salida ( $C_1$ ,  $C$  y  $L$ ) determinará el ancho de banda del amplificador, el cual depende de la modulación utilizada. Basándose en [18], la estimación de ancho de banda de la modulación es de 250 kHz.



**Figura 10:** Efecto del Q del filtro resonante del Clase E en la señal de comunicación.

En la figura 1 se puede observar el efecto del ancho de banda del filtro resonante de salida sobre la señal. Si el factor de calidad Q del filtro es muy alto, el ancho de banda del filtro se estrecha y no deja pasar el ancho de banda completo de la señal de comunicaciones. Debido a este efecto, utilizando la ecuación 1 se diseña el filtro resonante en función del ancho de banda dado por la modulación utilizada.

$$Q = \frac{f_{sw}}{\Delta f_{sw}} = \frac{1MHz}{250kHz} = 4 \quad (1)$$

Usando las reglas de diseño [19, 20] cuando el Q del filtro del clase E es bajo, se obtienen los valores para el filtro resonante de salida  $C_1$ ,  $C$  y  $L$  mostrados en la tabla I. Finalmente se añade una resistencia de sentido  $R_{sense}$  para poder medir la corriente que pasa por el *string* de LEDs del amplificador  $V_{CE}$ . Esto servirá para poder calcular la señal de error que reproduce la ayuda lineal.

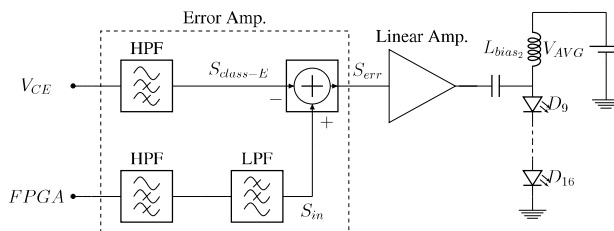
**Tabla I:** VALORES DE DISEÑO DEL CIRCUITO RESONANTE DEL CLASE E.

$C_1$	$C$	$L$
1,94 nF	3,768 nF	10,5 $\mu$ H

La función de las bobinas  $L_{ce}$  y  $L_{bias}$  es la de servir de filtro a la señal y permitir la polarización tanto del MOSFET como de los LEDs respectivamente.

#### IV-D. Diseño de la ayuda lineal

En la figura 11 se muestra el esquema circuital para el cálculo de la señal de error  $S_{err}$  y del amplificador lineal, y en las figuras 7a y 7b se muestran los prototipos construidos para el cálculo del error y del amplificador lineal respectivamente.



**Figura 11:** Esquema circuital para el cálculo de la señal de error y amplificador lineal.

Al igual que en el caso del amplificador clase E, el amplificador lineal está conectado a un *string* de 8 LEDs polarizados mediante un convertidor CC/CC externo que entrega la tensión  $V_{AVG}$  conectado a través de la bobina  $L_{bias}$ . El objetivo del amplificador lineal es entregar la señal de error  $S_{err}$ , que se calcula obteniendo el error entre la señal que entrega el amplificador clase E y una señal de referencia. La señal que emite el clase E es medida con una resistencia  $R_{sense}$  como se muestra en la figura 9 obteniendo  $V_{CE}$ . Mediante el filtro paso altos (*High-Pass Filter, HPF*) se elimina la continua de la señal, dado que de lo que se quiere calcular el error es de la señal de comunicación y no del nivel de polarización. La señal obtenida es la señal  $S_{class-E}$  mostrada en la figura 8. La señal de referencia se obtiene mediante el filtrado de una señal PWM generada por una FPGA, donde dicha señal PWM está modulada usando la señal de comunicaciones que se quiere emitir. De esta manera, mediante filtrado paso alto se elimina nuevamente la componente de continua y mediante filtrado paso bajo (*Low-Pass Filter, LPF*) se eliminan las componentes de la modulación PWM, quedando con la señal modulada  $S_{in}$  mostrada en la figura 8. Un sumador calculará el error entre ambas señales produciendo la señal  $S_{err}$  y entregándola al amplificador lineal. En la tabla II se muestra la frecuencia de la señal PWM entregada por la FPGA  $f_{sw}$ , y las frecuencias de corte  $f_c$  de los filtros HPF y LPF.

**Tabla II:** VALORES DE DISEÑO DEL CIRCUITO DE CÁLCULO DE ERROR.

$f_{sw}$ de la PWM	$f_c$ del HPF	$f_c$ del LPF
30 MHz	3 MHz	10 kHz

#### V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se presenta el diseño un transmisor VLC basado en un amplificador clase E con ayuda lineal. La propuesta es una modificación de la técnica de ayuda lineal usada en ET y EER adaptada a sistemas VLC que aprovecha que la salida de un sistema VLC es luz, y por lo tanto las señales pueden ser sumadas como intensidades lúminicas en lugar de eléctricamente. Esta modificación elimina la conexión eléctrica de las salidas de ambos amplificadores, evitando así la influencia entre ellos. Además, el aislamiento eléctrico entre amplificadores facilita el diseño, no necesitando un sumador o combinador que junte las señales y balancee la potencia

entre ambos amplificadores. 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] "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] F.-M. Wu, C.-T. Lin, C.-C. Wei, C.-W. Chen, Z.-Y. Chen, and H.-T. Huang, "3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation," in *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, March 2013, pp. 1–3.
- [8] 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.
- [9] J. Rodriguez, 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.
- [10] J. Rodriguez, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] P. F. Miaja, M. Rodriguez, A. Rodriguez, 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, pp. 3302–3309, July 2012.
- [14] D. Li, Y. Zhang, M. Rodriguez, 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, pp. 1113–1118.
- [15] P. F. Miaja, J. Sebastian, R. Marante, and J. A. Garcia, "A linear assisted switching envelope amplifier for a UHF polar transmitter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 1850–1861, April 2014.
- [16] F. H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popovic, N. Potheary, J. F. Sevic, and N. O. Sokal, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 814–826, March 2002.
- [17] L. R. Kahn, "Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration," *Proceedings of the IRE*, vol. 40, no. 7, pp. 803–806, July 1952.
- [18] J. Proakis, *Digital Communications*, ser. Electrical engineering series. McGraw-Hill, 2008.
- [19] M. Kazimierczuk and K. Puczek, "Exact analysis of Class E tuned power amplifier at any Q and switch duty cycle," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 149–159, February 1987.
- [20] M. K. Kazimierczuk, "Class E tuned power amplifier with nonsinusoidal output voltage," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 21, no. 4, pp. 575–581, Aug 1986.