

Utilizando técnicas de mejora de rendimiento de amplificadores de potencia de RF en Comunicaciones por Luz Visible

Javier Sebastián, Daniel G. Aller, Juan Rodríguez, Pablo F. Miaja y Diego G. Lamar
 sebas@uniovi.es, garciaadaniel@uniovi.es, rodriguezjuan@uniovi.es, fernandezmiapablo@uniovi.es y gonzalezdiego@uniovi.es.

Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas. Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (SEA). Universidad de Oviedo. Edificio Departamental Oeste nº 3, Campus Universitario de Viesques. 33204 Gijón. España.

Abstract- As very well known, modern communications need linear and efficient RF Power Amplifiers (RFPAs). Classical Class A and Class B RFPAs exhibit extremely low efficiency when amplifying signals with high Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). In order either to increase the efficiency of linear RFPAs or to achieve linear behaviour in the case of efficient (but not linear) Switching-Mode RFPAs, several techniques can be applied. These techniques can be divided in two categories: a) those based on the use of Switching-Mode DC-to-DC converters and, b) those based on combining the operation of several RFPAs. Although the expanding of these techniques is mainly due to the mobile (cellular) telephony, they can be used in other progressing telecom scenario: the Visible Light Communication (VLC). Thus, this paper tries to show how the aforementioned techniques can help us to develop more efficient VLC transmitters.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es describir cómo se puede mejorar el rendimiento energético de los transmisores de Comunicaciones en Luz Visible (VLC) [1], mediante la adaptación, a este caso, de diversa circuitería electrónica desarrollada inicialmente para, o bien mejorar el rendimiento de Amplificadores de Potencia de RF (RFPAs) lineales, o bien para dotar de linealidad a eficientes RFPAs conmutados, que no se comportan linealmente. La Tabla 1 muestra un compendio de las principales soluciones propuestas para finalmente obtener amplificadores lineales y eficientes. Como muestra esta tabla, hay soluciones que parten de amplificadores que son lineales e ineficientes cuando operan con señales en las que existe una gran diferencia entre su potencia media y su potencia de pico (alto valor de PAPR) y hay soluciones que parten de amplificadores que son eficientes (porque sus transistores trabajan en conmutación), pero que son

inherentemente no lineales (no existe linealidad entre los pulsos de gobierno de los transistores y la señal de salida del amplificador). En ambos casos, se han propuesto soluciones en las que las mejoras perseguidas se logran con la ayuda de convertidores CC/CC conmutados de respuesta muy rápida o con la agrupación de varios RFPAs. A la primera clase de soluciones pertenecen las técnicas de Seguimiento de Envolvente (“Envelope Tracking”, ET), que se aplican sobre amplificadores lineales (típicamente Clase A, B o AB), y las técnicas de Eliminación y Restauración de Envolvente, (“Envelope Elimination and Restoration”, EER), que se aplican sobre amplificadores conmutados y, por tanto, no lineales (típicamente Clase D, E o F). Por otra parte, la agrupación de RFPAs lineales usando las técnicas de *Doherty*, o de 2 RFPAs conmutados e idénticos usando la técnica denominada “*Outphasing*”, puede propiciar la obtención de las mejoras perseguidas, en este caso sin tener que acudir a los mencionados convertidores CC/CC.

Aparentemente sin relación con todo esto, desde la generalización del uso de los LEDs blancos para iluminación, se ha planteado la posibilidad de utilizar estos dispositivos para la doble función de iluminación y de transmisión de información, tratando de habilitar un canal de comunicación que no consuma parte del espectro de RF habitualmente usado para las comunicaciones. Se trata de las llamadas VLCs. El esquema típico de un transmisor de VLC implica el uso de un convertidor CC/CC o CA/CC convencional para polarizar el conjunto de LEDs y el uso de un RFPa para añadir las señales

TABLA I
 SOLUCIONES PROPUESTAS PARA OBTENER RFPAs LINEALES Y EFICIENTES

	RFPa lineal (clases A y B)	RFPa no lineal (clases D, E y F)
Con convertidores CC/CC	ET	EER
Agrupación de RFPAs	<i>Doherty</i>	<i>Outphasing</i>

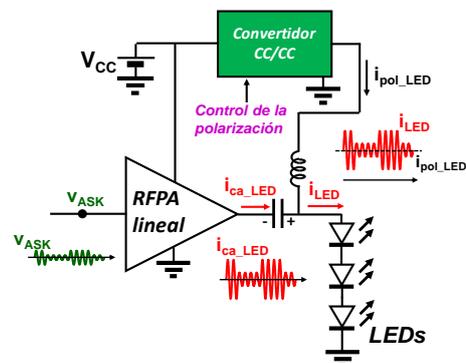


Fig. 1. Esquema típico de un transmisor de VLC. Ejemplo de modulación: ASK.

(Fig. 1). La presencia del RFPA puede evitarse si la transmisión es de pulsos (en vez de una portadora modulada, que en ejemplo mostrado en la Fig. 1 está modulada en ASK), pero la transmisión de pulsos se desaconseja por diversos motivos (uso ineficiente del espectro, problemas multirrayecto, etc.). De hecho, se aconseja el uso de esquemas de modulación en multiportadora (como es el caso de OFDM) para aminorar algunos de estos problemas.

Es de destacar que una de las razones por las que la iluminación LED se está imponiendo es por el alto rendimiento que se consigue en el proceso de transformación de energía eléctrica en luz. Si se desea que la iluminación LED además propicie la existencia de un canal alternativo de comunicación a través de la VLC, es preciso mantener alto el rendimiento energético también en esta situación [2]. Puesto que los esquemas de modulación adecuados vuelven a ser semejantes a los utilizados en otras aplicaciones de RF (como la telefonía móvil), las señales con las que se modula la amplitud de la intensidad luminosa emitida por los LEDs vuelven a tener un alto valor de PAPR, lo que hace que el RFPA presente los problemas de bajo rendimiento energético descritos anteriormente. El reto es encontrar modos de evitar este problema. En este trabajo se van a describir algunas ideas para conseguir alto rendimiento en los transmisores de VLC, todos ellos basados en la experiencia previa adquirida con las diversas soluciones propuestas para la mejora del rendimiento y linealidad de RFPAs convencionales (entendiendo por tales los distintos a los usados para VLC), siempre intentando sacar provecho de varias características propias de las VLCs.

II. SOLUCIONES BASADAS EN LA EXPORTACIÓN A VLC DE TÉCNICAS EMPLEADAS EN RFPAs CONVENCIONALES.

La idea inicial es muy simple: exportar cualquiera de las técnicas que aparecen en la Tabla 1 al RFPA de la Fig. 1. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo: Las técnicas de ET se han aplicado a dicho RFPA, lo que implica el uso de un convertidor CC/CC capaz de seguir la envolvente de la señal de comunicaciones (en este ejemplo, la señal es 8-QAM). Sin embargo, es necesario establecer algunas consideraciones, que acaban imponiendo restricciones a las posibilidades reales de aplicación de estas soluciones:

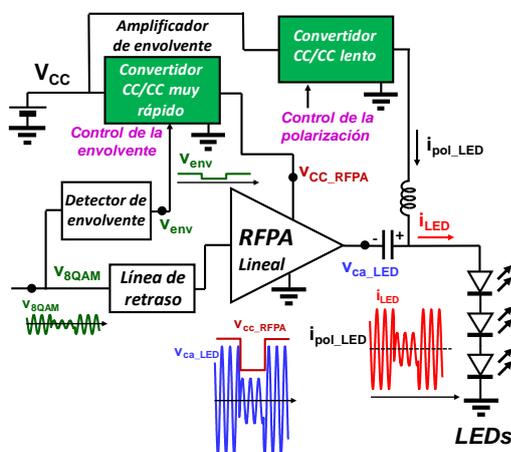


Fig. 2. Aplicando la técnica de ET al RFPA de un transmisor de VLC. Ejemplo de modulación: 8_QAM. Este esquema sería operativo con multiportadora.

a) Si se utilizan LEDs estándar de iluminación en el transmisor de VLC, su frecuencia máxima de transmisión está limitada a unos 20 MHz (en el mejor caso, detectando la parte azul del espectro luminoso en el receptor óptico). Teniendo en cuenta que la información debe ser insensible al ojo humano, la frecuencia inferior límite a utilizar debería ser mayor de 1 kHz. Estos valores fijan los límites del espectro de frecuencias con las que se puede modular la amplitud de la intensidad luminosa.

b) En muchos de los posibles escenarios de uso de las VLCs, un determinado transmisor podrá hacer uso de una parte muy importante del espectro que se acaba de definir (en algunos casos, de todo él). Esto es muy positivo desde el punto de vista de la posibilidad de utilizar esquemas de transmisión basados en multiportadora. Sin embargo, el RFPA debe ser entonces de banda ancha, a menos que se parezca este espectro de forma que se pueda cubrir con diversos amplificadores de banda estrecha, lo que a priori no resulta muy atractivo por razones de coste.

c) Si los RFPAs son de banda ancha (realmente muy ancha) y trabajan a frecuencias relativamente bajas (de HF), resulta imposible realizar físicamente algunas de las técnicas de la Tabla 1. Por ejemplo, los amplificadores conmutados o bien requieren el uso de circuitos resonantes (que operan como filtros pasa-banda) para transformar formas de onda cuadrada en senoidal (caso de los amplificadores clase D) o bien integran circuitos resonantes junto a los propios transistores (caso de los amplificadores clase E y F). Esto hace impensable poder aprovechar la mayor parte del espectro disponible (pongamos que desde, por ejemplo, 1 MHz hasta 20 MHz) con técnicas basadas en RFPAs no lineales (técnicas de EER y *Outphasing*). Además, en el caso de las técnicas de *Outphasing* es preciso utilizar redes selectivas en el combinator en el que confluyen las señales de los dos RFPAs.

d) Las técnicas de *Doherty* requieren el uso de inversores de impedancia. Estos vuelven a ser dispositivos de banda estrecha, sean realizados físicamente con redes de $\lambda/4$ o con elementos discretos (que sería lo propio a las frecuencias mencionadas).

e) Como consecuencia de todo lo anterior, si se utiliza un único RFPA y se desea amplificar con él señales de banda ancha (una multiportadora que aproveche todo el espectro disponible), sólo serán aplicables las técnicas de ET, que se deberán realizar sobre un amplificador lineal de banda ancha.

Si se renuncia al uso de todo el espectro disponible o si se parcela dicho espectro de tal forma que cada RFPA trabaje en banda estrecha, entonces sí que todas las técnicas de la Tabla

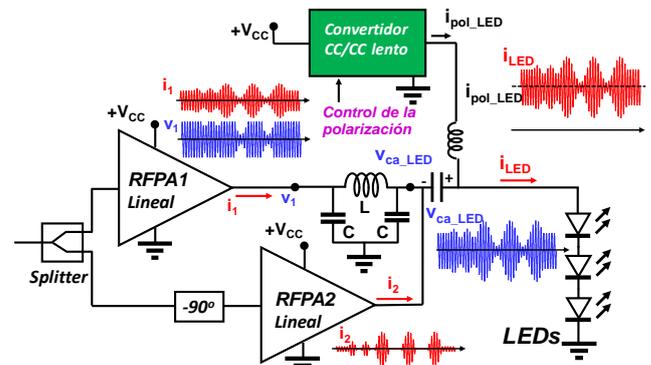


Fig. 3. Aplicando la técnica de *Doherty* a un transmisor de VLC. Este esquema sólo es válido en banda estrecha.

1 pueden ser aplicadas. En la Fig. 3 se puede ver la aplicación de la técnica de *Doherty*. El amplificador RFPA1 es el llamado “amplificador de portadora” y el RFPA2 es el llamado “amplificador de pico”. El inversor de impedancia se ha realizado físicamente con elementos discretos (2 condensadores C y una bobina L), en vez de con líneas de $\lambda/4$, debido a la frecuencia de operación.

III. ADAPTANDO LA TÉCNICA DE *OUTPHASING* A VLC

La Fig. 4a muestra el esquema básico de un RFLPA que usa la técnica de *Outphasing* y que, debido a ello, es capaz de reproducir una señal modulada con una modulación de envolvente variable, partiendo de dos RFPAs conmutados y que, por tanto, entregan señales de envolvente constante. En este esquema, las redes Red1 y Red2 (compuestas de una bobina y de un condensador) tienen como misión aminorar los problemas derivados de que la operación en desfase de RFPA1 y RFPA2 hace que cada uno de ellos no vea una carga resistiva, aunque la carga realmente lo sea. Asimismo, el combinador debe permitir que la carga no tenga que estar colocada en modo diferencial, sino que pueda tener uno de sus terminales unido a masa. Este combinador se resuelve habitualmente con dos líneas de $\lambda/4$, pero esta solución no es práctica en las frecuencias a las que nos estamos refiriendo.

Sin embargo, las redes de salida y el combinador se pueden suprimir si se adopta la solución mostrada en la Fig. 4b [3]. En este caso, las dos cadenas de LEDs van a generar el mismo nivel de iluminación (i_{pol_LED1} y i_{pol_LED2} tendrán el mismo valor) y van a transmitir señales de envolvente constante y con las necesarias diferencias de fase. La reconstrucción de la señal con envolvente variable se realizará en el receptor óptico (forma de onda de v_{rec} en la Fig. 4b). De esta forma, se evitan los problemas de interacción entre ambos RFPAs y la

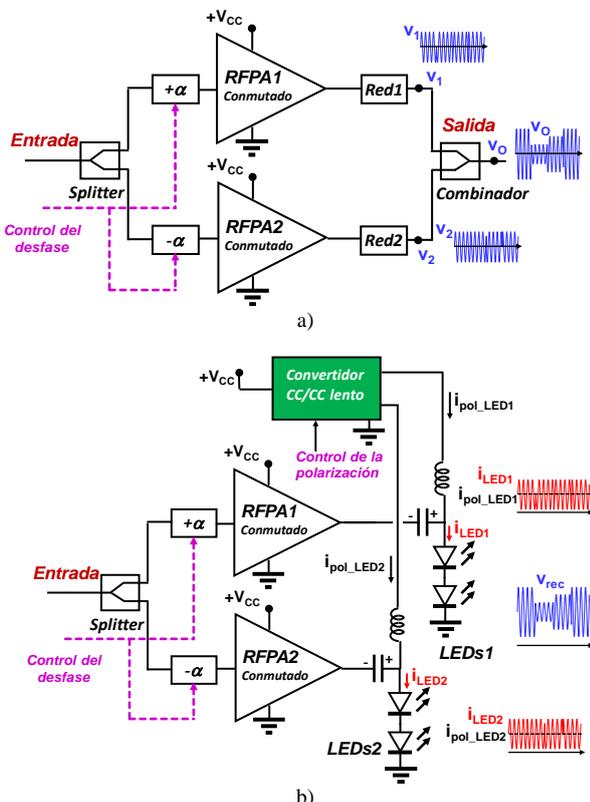


Fig. 4. a) Esquema clásico de la técnica de *Outphasing*. b) Particularización especialmente útil para VLC [3]. Ambos esquemas sólo son válidos en banda estrecha.

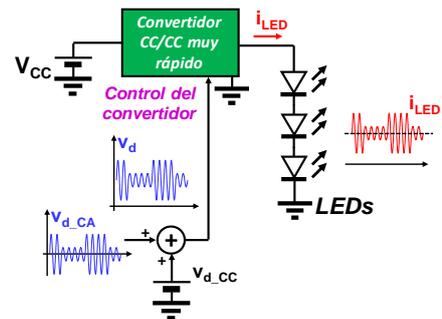


Fig. 5. Síntesis directa de la forma de onda mixta (iluminación + información) usando un convertidor CC/CC de respuesta muy rápida, como los usados en las técnicas de ET y EER. Ejemplo de modulación: ASK. Este esquema sería operativo con multiportadora.

necesidad de las redes y del combinador que aparecen en la realización física clásica de la Fig. 4a.

IV. APROVECHANDO LA TECNOLOGÍA DE LOS AMPLIFICADORES DE ENVOLVENTE

De entre las técnicas resumidas en la Tabla 1, las técnicas de ET y de EER necesitan usar un convertidor CC/CC extremadamente rápido, cuya tensión de salida debe ser capaz de variar tan rápidamente como lo hace la envolvente de la señal a amplificar por el RFLPA. Este convertidor CC/CC recibe el nombre de Amplificador de Envolvente (EA) y puede verse en el ejemplo mostrado en la Fig. 2.

La idea fundamental que vamos a exponer ahora es usar estos convertidores para sintetizar directamente la forma de onda a aplicar a los LEDs (suma de un nivel de continua y de la señal modulada con la señal a transmitir), tal y como aparece representado en la Fig. 5. De esta forma, no es necesario más que un convertidor para realizar las dos funciones perseguidas: iluminación y comunicación.

Muchas adaptaciones de convertidores CC/CC clásicos, de los utilizados en sistemas de alimentación, han sido propuestos en los últimos años para operar como EAs. En convertidor básico es el convertidor reductor (*Buck converter*), que presenta linealidad entre el ciclo de trabajo de su transistor y la tensión de salida en régimen permanente. El control de este convertidor, y de las versiones modificadas que se presentarán a continuación, se realiza por Modulación de Ancho de Pulso

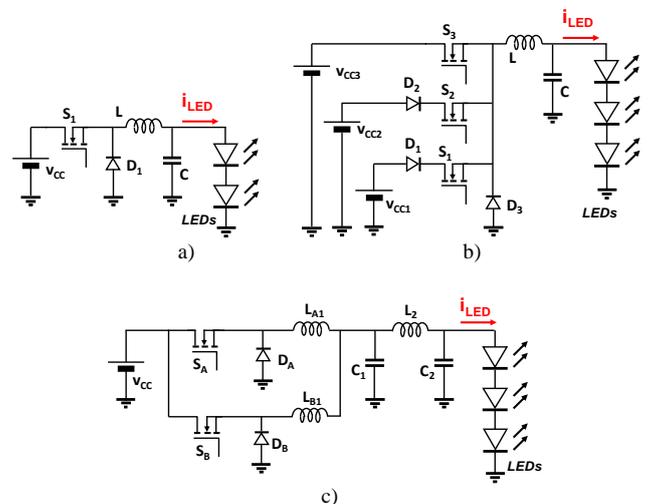


Fig. 6. Convertidores CC/CC para síntesis directa. a) El convertidor reductor. b) El convertidor reductor multientrada [4]. c) Convertidor multifase con filtro de 4º orden [5].

(PWM). En su versión clásica (Fig. 6a), este convertidor presenta un filtro de 2° orden a su salida. En estas condiciones, la frecuencia superior del espectro de señales a reproducir (con valores razonables del ruido de conmutación) es entre 10 y 20 veces menor que la frecuencia de conmutación. El reto es buscar modificaciones topológicas que permitan acercar, lo más posible, ambas frecuencias. A continuación se describen algunas de las soluciones topológicas propuestas para conseguir este objetivo:

a) Usar una topología multientrada (Fig. 6b) [4]. En este caso, la secuencia de conmutación de los transistores es tal que cada uno de ellos conmuta entre “tensiones diferencia”, en vez de entre “tensiones totales” (en el circuito de la Fig. 6b, S_3 conmuta cuando S_2 está en conducción y, por tanto, soportando la tensión $V_{CC3}-V_{CC2}$), lo que reduce las pérdidas de conmutación de los transistores y permite conmutaciones a mayor frecuencia para un determinado nivel de pérdidas admitido. Además, la tensión a la entrada del filtro de salida varía entre tensiones más bajas (cuando conmuta S_3 , esta tensión varía entre $V_{CC3}-V_{CC2}$), lo que permite elevar la frecuencia de corte del filtro LC de salida (para un nivel de ruido de conmutación dado), permitiendo elevar la frecuencia máxima del espectro a reproducir.

b) Usar una topología multifase con filtro de orden superior al 2° (Fig. 6c) [5]. La operación multifase permite cancelar completamente la componente de la frecuencia de conmutación, aunque no las bandas laterales que se generan en el proceso PWM con ciclo de trabajo no constante, si bien estas componentes se atenúan. Además, como la resistencia dinámica de los LEDs es bastante constante, se puede usar la teoría general de filtros para diseñar un filtro de 4° o 6° orden, consiguiendo que la frecuencia superior del espectro sea sólo 4 o 5 veces menor que la frecuencia de conmutación.

c) Las técnicas de multientrada y multifase se pueden usar simultáneamente [6].

Finalmente, comentar que siempre es posible aplicar alguna técnica que combine la operación del convertidor conmutado con la de un regulador lineal, sacrificando rendimiento para mejorar rapidez [7].

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se describen, someramente, algunos resultados experimentales. Los primeros corresponden a la técnica de *Outphasing* mostrada en la Fig. 4a, [3]. Los RFPAs trabajan en clase E a 5 MHz. Los valores de tensiones y corrientes de polarización sobre las 2 agrupaciones de 8 LEDs tipo *XLamp MX-3* usados son de 28 V y 0,25 A, respectivamente. La Fig. 7a muestra las formas de onda correspondientes a una transmisión 16-QAM con un periodo de símbolo de 5 periodos de la señal. El rendimiento energético de la generación de la transmisión es del 78% y el del sistema completo (incluyendo el convertidor CC/CC) es del 92%. La tasa de transmisión es de 4 Mbps.

Por otra parte, se ha adaptado el convertidor propuesto en [5] como EA para técnicas de ET, a su uso para realizar síntesis directa (Fig. 6c). El convertidor conmuta a 4,5 MHz y reproduce una 16-QAM de 500 kHz con un periodo de símbolo de 4 periodos de la señal (véase la Fig. 7b). La corriente de polarización de la agrupación de 5 LEDs tipo *W42180* es de 0,5 A y la tensión media sobre ellos es de 16,5 V. El rendimiento energético obtenido varía entre el 85% y el 90%. La tasa de transmisión es de 0,5 Mbps.

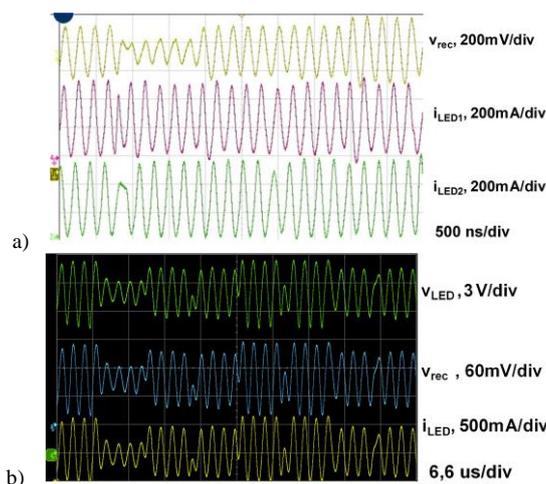


Fig. 7. Resultados experimentales obtenidos en: a) Un prototipo del circuito de la Fig. 4a. b) Un prototipo del circuito de la Fig. 6c.

V. CONCLUSIONES

Una parte importante de la circuitería desarrollada para la mejora del rendimiento de los RFPAs que operan con señales de envolvente no constante, puede ser utilizada en las VLCs. Cuando se utilizan los LEDs estándar de iluminación, su limitación en la frecuencia máxima de transmisión de señales (unas pocas decenas de MHz), hace que, si se quiere aprovechar el espectro disponible, el RFA deba ser de banda ancha. Este hecho restringe las técnicas a utilizar a la de ET (con RFA) o a la de síntesis directa, en este último caso sin usar RFA y usando sólo un convertidor CC/CC de respuesta muy rápida, del tipo de los desarrollados para actuar de EA en las técnicas de ET y EER. Si por el contrario se admite que la transmisión va a ser de banda estrecha, todas las técnicas son utilizables, y en particular la de *Outphasing* puede adaptarse a las VLCs en condiciones muy ventajosas.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo 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] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, 2003.
- [2] J. Sebastián, D. G. Lamar, D. G. Aller, J. Rodríguez and Pablo F. Miaja “On the Role of Power Electronics in Visible Light Communication,” *IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 1210-1223, Sep. 2018.
- [3] D. G. Aller, P. F. Miaja, D. G. Lamar, J. Rodríguez y J. Sebastián, “Transmisores VLC basados en la suma de intensidades lumínicas”. Versión preliminar de artículo enviado a la presente edición del URSI.
- [4] M. Rodríguez, P. F. Miaja, A. Rodríguez, and J. Sebastián, “A multiple input digitally controlled buck converter for envelope tracking applications in radiofrequency power amplifiers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 369-381, Feb. 2010.
- [5] J. Sebastián, P. F. 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 Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 5933-5948, Nov. 2014.
- [6] J. Rodríguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, D. G. Aller and J. Sebastián, “Power Efficient VLC Transmitter Based on Pulse-Width Modulated DC-DC Converters and the Split of the Power”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1726-1746, Feb. 2019.
- [7] P. F. Miaja, J. Sebastián, R. Marante, and J. A. García, “A linear assisted switching envelope amplifier for a UHF polar transmitter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1850-1861, Apr. 2014.