

# Mejora de la Linealidad de un Amplificador de Potencia para un Sistema EER mediante Predistorsión Digital

Moisés Patiño-Gómez, David Tena-Ramos, Francisco Javier Ortega-González,  
José Manuel Pardo-Martín y Cesar Benavente-Peces.

Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Ingeniería de Radio, EUIT de Telecomunicación,  
Carretera de Valencia Km. 7, 28031, Madrid, España

**Abstract**— En este trabajo se presenta un amplificador de potencia de RF linealizado mediante la combinación de técnicas de Eliminación y Recuperación de Envoltente (EER) y Predistorsión. Se utiliza para ello procesado digital de la señal en banda base y la identificación de modelos en el dominio del tiempo para describir el funcionamiento del amplificador de potencia. Empleando métodos basados en la técnica de error de salida, se calcula e implementa la función complementaria no lineal del amplificador de potencia de RF del sistema EER en Matlab, para su posterior linealización. Se han conseguido mejoras de hasta 20 dB usando esta técnica con respecto a un sistema EER sin linealizar.

**Index Terms**—RF power amplifiers, amplitude and phase distortion, AM-PM conversion, nonlinear distortion, digital predistortion, DC-DC power conversion, Envelope Elimination and Restoration.

## I. INTRODUCTION

LOS amplificadores de potencia son elementos esenciales en los sistemas de comunicaciones. A fin de maximizar su rendimiento y reducir su consumo, es deseable utilizar estos amplificadores en la región de saturación. Sin embargo, el trabajo en esta zona provoca el comportamiento no lineal del amplificador de potencia.

Por otro lado, el empleo creciente de formas de onda complejas como las utilizadas en modulaciones espectralmente eficientes como QAM o CDMA en los sistemas de comunicación está provocando una demanda creciente en dos aspectos contrapuestos como son la linealidad y la alta eficiencia de los amplificadores de potencia.

Una técnica empleada para la linealización de amplificadores de potencia es la de Eliminación y Restauración de Envoltente (EER). En ella las componentes de amplitud y de fase de la señal a amplificar son amplificadas por separado en amplificadores de alto rendimiento. De esta forma se consigue que la salida del sistema presente una alta linealidad y un alto rendimiento de forma simultánea. No obstante, para tener un buen resultado, hay que tener en

cuenta los efectos de distorsión que se producen en esta técnica y procurar corregirlos.

La predistorsión de la señal a amplificar es una técnica de linealización efectiva que ha sido empleada satisfactoriamente en amplificadores de potencia de estado sólido de radiofrecuencia [1]. Básicamente consiste en introducir en cascada un sistema “predistorsionador” de señal delante del amplificador de potencia. La característica de transferencia no lineal del predistorsionador es complementaria de la característica de distorsión del amplificador de potencia, obteniendo como resultado una pequeña o nula distorsión en el sistema total. Por ello, un paso esencial para diseñar un predistorsionador es modelar, lo más precisamente posible, la característica de no linealidad del amplificador de potencia.

El objetivo buscado en este documento es mejorar la linealidad de un sistema EER aplicando técnicas de predistorsión. El modelo no lineal del amplificador de RF considerado en este trabajo se ha implementado en el dominio del tiempo.

## II. ELIMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ENVOLVENTE

La técnica de Eliminación y Restauración de Envoltente (EER) fue diseñada por Kahn en 1952 [2] para conseguir amplificación de alto rendimiento y lineal. Su funcionamiento es básicamente el siguiente: en un sistema EER, como el que se muestra en al Fig. 1, la señal de entrada al amplificador de radiofrecuencia es descompuesta en una componente de fase y una componente de envoltente [3, 4, 5, 6] que son amplificadas por separado. Ambas componentes se combinan una vez amplificadas obteniéndose de esta forma una señal de potencia con envoltente y fase no constantes. El rendimiento de todo el proceso es muy alto ya que es posible utilizar amplificadores de alto rendimiento para la amplificación de las dos componentes mencionadas, fase y envoltente.

En el sistema sobre el que se ha trabajado, el encargado de amplificar la componente de envoltente de la señal de entrada es un convertidor DC-DC. Su salida es utilizada para alimentar a través de un filtro paso bajo, a otro amplificador de potencia de alto rendimiento en clase E que es el encargado

de amplificar la componente de fase. En los siguientes subapartados se describe brevemente los elementos que

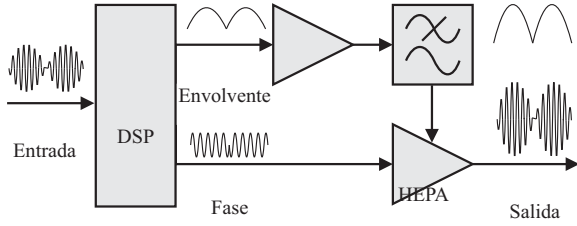


Fig. 1. Diagrama de bloques de un sistema de Eliminación y Restauración de Envolvente.

### A. Convertidor DC-DC

Este convertidor, desarrollado por el CEI-UPM<sup>1</sup> [7], está formado por una fuente de alimentación conmutada multinivel seguida de un regulador lineal. Este dispositivo ofrece un rendimiento medio del 90% y un ancho de banda que llega hasta los 2MHz. En cuanto a su linealidad cabe destacar que consigue una atenuación de 50 dB en las componentes espectrales de intermodulación en la prueba de los dos tonos.

### B. Filtro paso bajo

El filtro debe estar diseñado para cubrir el mayor ancho de banda posible, al menos tres o cinco veces el ancho de banda de la señal a amplificar y, al mismo tiempo, debe mantener un retardo de grupo constante dentro de todo su margen de operación. En este trabajo se ha usado un filtro paso bajo de cuarto orden con un ancho de banda de 7,5 MHz que permiten que pasen un suficiente número de las componentes espectrales de la envolvente con el mismo retardo de grupo, aumentando la fidelidad en la reproducción de la señal de envolvente. Además proporciona una atenuación suficiente a la frecuencia de portadora de RF que impide que la señal de RF amplificada en el amplificador de potencia de RF pase al convertidor.

### C. Amplificador de potencia de RF (HEPA) Clase E

La etapa de amplificación de fase ha sido diseñada mediante un amplificador en Clase E de banda ancha que trabaja en la banda de VHF. Presenta un rendimiento en torno al 90%, entrega una potencia a su salida de hasta 150 W y tiene un rechazo a los armónicos de más de 20 dB. Este amplificador no lineal, presenta un muy alto rendimiento, pero también una alta distorsión que debe ser corregida para el buen funcionamiento del sistema completo.

## III. CARACTERIZACIÓN DEL HEPA

En los sistemas EER, el amplificador de potencia de alto rendimiento empleado en la rama de fase suele ser el mayor causante de las distorsiones provocadas en la señal de salida. Entre estos efectos de distorsión se pueden destacar: efectos de conversión AM-AM, de conversión AM-PM del

amplificador y efectos memoria del sistema. Realmente, dado que la envolvente se inyecta al sistema por la entrada de alimentación del amplificador ( $V_{DD}$ ) podría ser más conveniente y preciso hablar de distorsión  $V_{DD}$ -AM y  $V_{DD}$ -PM, respectivamente. No obstante, por simplicidad, en los siguientes párrafos se utilizará la nomenclatura habitual.

Matemáticamente, se puede representar la señal amplificada por un amplificador EER según se muestra en (1):

$$s_e(t) = x_e(t) \cos[\omega \cdot t + \phi(t)] \quad (1)$$

Donde:  $x_e(t)$  es la envolvente de la señal a amplificar y  $\cos[\omega \cdot t + \phi(t)]$  la fase de la señal a amplificar.

La señal de envolvente amplificada y filtrada es  $x_s(t)$  en (2), donde  $\alpha$  es la ganancia, considerada lineal, del convertidor DC-DC.

$$x_s(t) = \alpha \cdot x_e(t) \quad (2)$$

El módulo de tensión a la salida del amplificador de potencia (HEPA) se corresponde con la información de envolvente distorsionada debido a la conversión AM-AM y es representada por  $x_o(t)$  en (3), donde  $k$  es una constante que representa la ganancia lineal de tensión de la envolvente, entre el drenador y la salida del HEPA.

$a(x_s(t))$  es un polinomio que caracteriza la distorsión introducida por el amplificador de potencia en función de los niveles de envolvente de entrada.

$$\begin{aligned} x_o(t) &= k \cdot x_s(t) + a(x_s(t)) \\ a(x_s(t)) &= a_n \cdot x_s^n(t) + a_{n-1} \cdot x_s^{n-1}(t) + \dots + a_1 \cdot x_s^1(t) + a_0 \end{aligned} \quad (3)$$

La componente de fase a la salida del HEPA es la suma de la fase original de la señal de entrada junto un término de distorsión de fase dependiente del nivel de la envolvente de entrada:  $\varphi(x_s(t))$ , provocado por la conversión AM-PM del HEPA.

El resultado final es una señal modulada en amplitud y en fase, como se puede ver en (4).

$$s_o(t) = x_o(t) \cos[\omega \cdot t + \phi(t) + \varphi(x_s(t))] \quad (4)$$

En este trabajo se ha empleado un modelo en el dominio del tiempo para caracterizar el comportamiento del amplificador. Este modelo no tiene en cuenta los efectos memoria pero es suficiente. Se trata de un modelo polinómico que describe las variaciones no lineales de la amplitud y de la fase de salida del sistema en función del nivel de envolvente. Para realizar este modelado se ha desarrollado el montaje que se muestra en la

<sup>1</sup> Centro de Electrónica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid

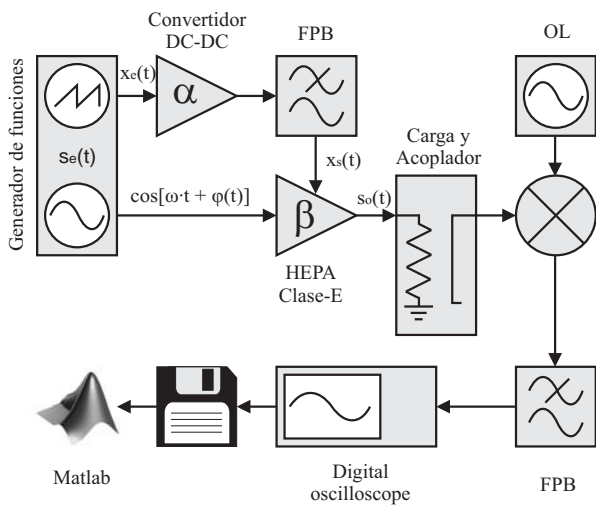


Fig. 2. Diagrama de bloques del montaje empleado para obtener la distorsión AM-AM y AM-PM del HEPA.

Mediante el generador de funciones arbitrarias Agilent 81150A se han generado dos señales sincronizadas: una rampa para la calibración de envolvente y una portadora para la rama de fase. Como instrumento para la visualización y adquisición de señales se ha usado un osciloscopio Infiniium de la serie 8000 de Agilent. Para que la traza de la señal de salida pueda ser obtenida con precisión se ha trasladado en frecuencia la señal amplificada hasta una frecuencia intermedia. Para ello se ha usado un mezclador y un filtro paso bajo. Una vez obtenidos los ficheros de las trazas del osciloscopio, se ha empleado Matlab para demodular esta señal en fase y en amplitud y obtener así la distorsión de amplitud (Fig. 3) y de fase (Fig. 4) producida por el amplificador clase E.

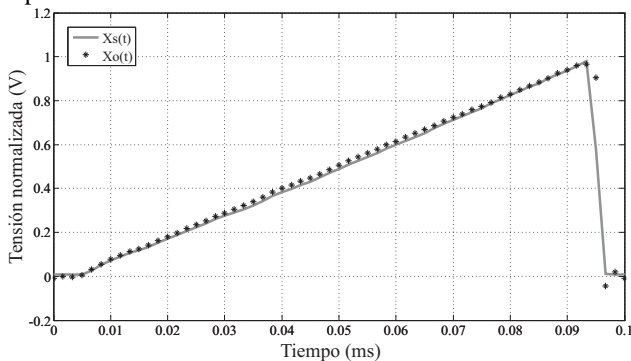


Fig. 3. Conversión AM-AM provocada por el amplificador clase E comparada con la rampa de calibración a la entrada.

#### IV. PREDISTORSIÓN DIGITAL

Una vez caracterizados los efectos introducidos por el amplificador de potencia de alto rendimiento en clase E se observa que, para este caso concreto, la conversión AM-PM es bastante importante y deberá ser corregida aplicando predistorsión, mientras que la distorsión de amplitud es casi nula y se puede despreciar en primera aproximación (5).

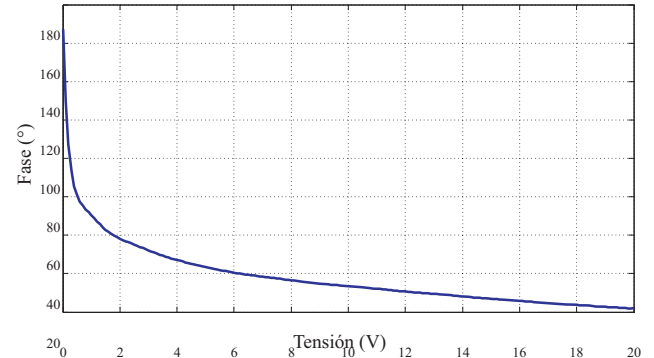


Fig. 4. Conversión AM-PM introducida por el amplificador clase E.

$$a(x_s(t)) \approx 0 \Rightarrow x_o(t) = k \cdot x_s(t) \quad (5)$$

La curva de distorsión de fase se ha modelado de forma aproximada mediante un polinomio de grado 20, dado que es un sistema en pruebas, empleando la función "polyfit" de Matlab (6). En un sistema real habría que buscar el equilibrio entre la carga computacional y el error permitido a la hora elegir el grado del polinomio. En este caso, para un polinomio de grado 20 el error RMS cometido es del 0.1% mientras que para un polinomio de grado 10 sería del 1%.

$$\varphi(x_s(t)) = b_n \cdot x_s^n(t) + b_{n-1} \cdot x_s^{n-1}(t) + \dots + b_1 \cdot x_s^1(t) + b_0 \quad (6)$$

Usando este polinomio se ha aplicado la corrección de fase en la señal (de fase) de entrada al HEPA, produciendo, idealmente, la eliminación de la distorsión de fase, como se puede ver en (7).

$$\begin{aligned} s_{ep}(t) &= x_e(t) \cos[\omega \cdot t + \phi(t) - \varphi(x_s(t))] \\ s_{op}(t) &= x_o(t) \cos[\omega \cdot t + \phi(t) - \varphi(x_s(t)) + \varphi(x_s(t))] \end{aligned} \quad (7)$$

El modelo presentado anteriormente se ha probado previamente mediante simulación en Matlab. Para ello se ha generado una modulación en doble banda lateral (DBL) con un tono de 100 kHz en banda base. Mediante la función Fast Fourier Transform (FFT) de Matlab y una ventana de Blackman-Harris se han obtenido los resultados que se observan en la Fig. 5. Se comparan en esta figura el espectro de la señal real obtenida a la salida del amplificador (sin predistorsión) y los resultados en Matlab (simulados) tras aplicar la curva de predistorsión.

En los resultados de la simulación presentados en la Fig. 5, se puede observar claramente la mejora obtenida gracias a las predistorsión de fase aplicada a la señal de entrada, pudiendo observarse una mejora de unos 65 dB con respecto al caso sin predistorsión.

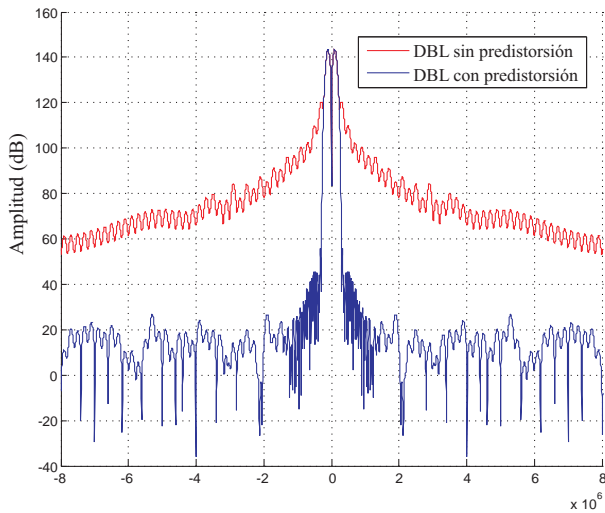


Fig. 5. Simulación en Matlab del sistema HEPA mediante una DBL con predistorsión y sin predistorsión.

### V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar experimentalmente los resultados de la predistorsión polinómica se ha realizado el banco de pruebas que se observa en la Fig. 6 con un amplificador real.

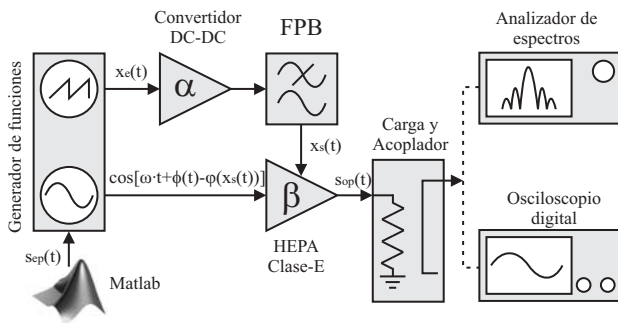


Fig. 6. Banco de pruebas empleado para obtener resultados experimentales aplicando predistorsión.

Las señales de envolvente y fase han sido generadas con Matlab a través de un PC, y descargadas a un generador de funciones arbitrario. Estas señales de entrada ya han sido pre-corregidas utilizando las técnicas de procesamiento digital de la señal descritas mediante Matlab. Con el fin de obtener todo el potencial de los equipos en la predistorsión, todo el proceso de datos ha sido realizado con el mayor número de muestras posible.

Desde el generador de funciones, las señales de envolvente y fase, esta última predistorsionada, han sido enviadas a sus respectivos amplificadores de potencia y convertidor. Posteriormente fue necesario ajustar el retardo entre las ramas de fase y envolvente, de forma manual, analizando las señales en el osciloscopio con el fin de compensar los retardos existentes entre ambas ramas y que por estar en un lazo abierto no se pueden corregir automáticamente. Una vez sincronizadas las dos ramas, se ha mostrado la señal de salida del amplificador clase-E en el analizador de espectros.

En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran los resultados obtenidos al usar el sistema para amplificar una señal DBL, que se ha modulado con un tono de 100 kHz sobre una portadora de 88, 100 y 114 MHz, ancho de banda de trabajo del HEPA. Se puede apreciar una reducción de unos 20dB en las componentes de intermodulación al aplicar predistorsión a la señal de entrada.

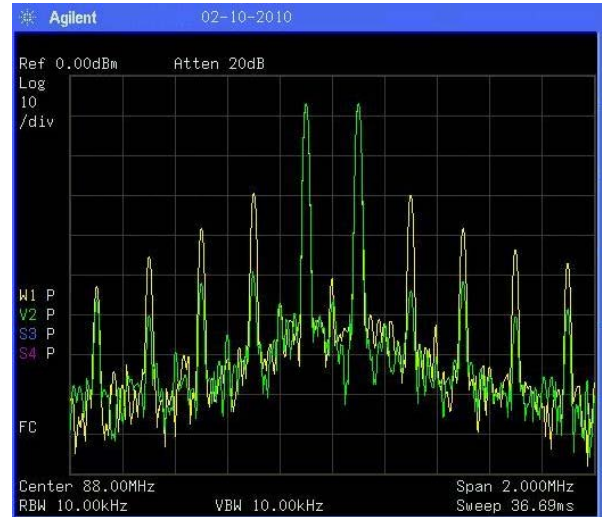


Fig. 7. Comparación del espectro de salida empleando una modulación en doble banda lateral (DBL) con predistorsión (verde) y sin ella (amarillo) con una portadora de 88 MHz.

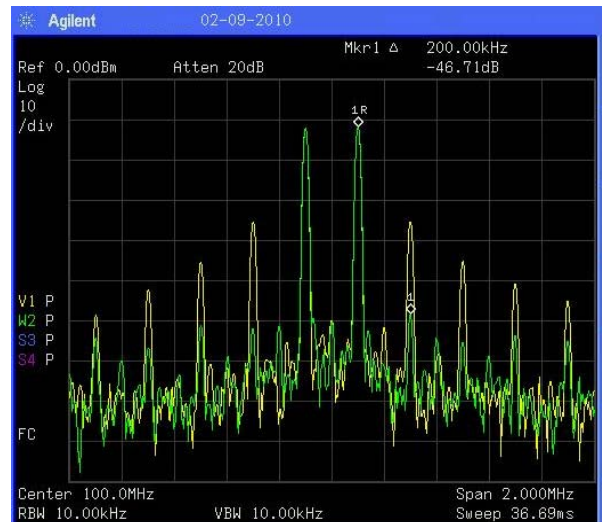


Fig. 8. Comparación del espectro de salida empleando una modulación en doble banda lateral (DBL) con predistorsión (verde) y sin ella (amarillo) con una portadora de 100 MHz.

Las capturas del analizador muestran claramente el correcto funcionamiento de la predistorsión para todo el ancho de banda del amplificador de potencia de alto rendimiento clase E. Obteniéndose la misma linealidad para todas las frecuencias de trabajo.

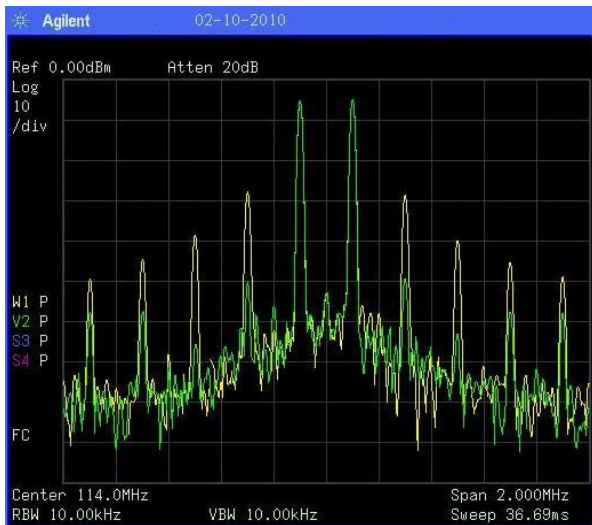


Fig. 9. Comparación del espectro de salida empleando una modulación en doble banda lateral (DBL) con predistorsión (verde) y sin ella (amarillo) con una portadora de 114 MHz.

## VI. CONCLUSION

En este trabajo se ha mostrado como se ha mejorado la linealidad de un sistema de amplificación por Eliminación y Recuperación de Envoltura (EER) mediante la aplicación de técnicas de predistorsión digital en banda base.

A la luz de los resultados obtenidos se puede comprobar que la predistorsión efectuada ha sido realmente efectiva: se ha conseguido mejorar en al menos 20 dB la atenuación a los productos de intermodulación en una prueba de linealidad de dos tonos, consiguiendo unos niveles de atenuación en las componentes de intermodulación de 45 dB con respecto a la portadora en un ancho de banda de 500kHz sobre una portadora de VHF en un margen de frecuencias desde los 88 MHz hasta los 114 MHz.

Estos niveles de linealidad son equiparables a los que se pueden obtener con amplificadores lineales y se sospecha que puedan ser incluso mejorados tras optimizar los modelos del sistema completo y mejorando otros efectos indeseados no tenidos en cuenta en esta primera aproximación, como es el caso de los efectos memoria. En el momento actual se trabaja precisamente en esa dirección.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo constituye parte de los resultados del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia con referencia TEC2009-14307-C02-02.

## REFERENCIAS

- [1] M.Djamai, S.Bachir, C. Duvanaud, "Behavioral Modeling and Digital Predistortion of RF Power Amplifiers", IEEE International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits 2006, 30-31 Jan. 2006, pp. 160 – 163.
- [2] L.R.Kahn, "Single-sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration", IEEE Proc. of the IRE, Vol. 40, No. 7, July 1952.
- [3] A.Gimeno, "Linearization of High Efficiency Amplifiers by Means of Envelope Elimination and Restoration (EER)", Ph. D. Thesis, Radio Engineering Group (GIRA), UPM, Madrid, Spain, 2009.
- [4] P.B.Kenington, "High-Linearity RF Amplifier Design", Artech House, London 2000.
- [5] S. C. Cripps, "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design", Artech House, 2002.
- [6] S. C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House, 1999.
- [7] M.Vasić, O. Garcia, J. A. Oliver, P. Alou, D. Diaz, J. A. Cobos, "Multilevel Power Supply for High Efficiency RF Amplifier", Proc. of the 24<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC '09, February 2009.