

# PREDISTORSIÓN DIGITAL APLICADA AL AMPLIFICADOR DE POTENCIA DE UN SISTEMA EER

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

dtenaramos@gmail.com, moisespatino@alumnos.upm.es, fjortega@diac.upm.es,  
jmpardo@diac.upm.es, cbpeces@ics.upm.es.

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

**Abstract-** A linealized RF power amplifier using Envelope Elimination and Restoration (EER) and predistortion techniques is shown. Measurements on a circuit prototype are presented. The EER system uses a linear regulator to amplify the envelope and a high efficiency broadband VHF class E power amplifier for the phase component. Different digital modulations have been tested in the circuit prototype. Adjacent Channel Power Ratio (ACPR) reaches over 46 dBc for monocarrier modulations and over 34 dBc for multicarrier modulations, for a 2MHz bandwidth on VHF carrier (from 88 MHz to 114 MHz). The system shown provides double efficiency level than an equivalent ideal class A amplifier.

## I. INTRODUCCIÓN

Los amplificadores de potencia son elementos esenciales en los sistemas de comunicaciones. En aplicaciones de VHF para comunicaciones se requieren elevadas potencias de RF. Cada vez más, estas aplicaciones también requieren altos rendimientos para reducir el tamaño, el peso y el coste de funcionamiento, así como mejorar la fiabilidad.

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 el rendimiento de los amplificadores de potencia.

El funcionamiento en modo de conmutación de amplificadores de potencia de RF (clase D, E y F) consiguen altos rendimientos empleando transistores de potencia de RF como conmutadores en vez de amplificadores lineales. Estas clases de amplificación no lineales necesitan de otras técnicas como la Eliminación y Restauración de Envolvente (EER) [1] para conseguir linealidad. 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.

Una posible forma de corregir estos efectos de no linealidad es mediante la predistorsión digital. 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 [2]. 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 a 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 explicar los efectos de no linealidad producidos en un sistema EER y mejorar la linealidad del sistema aplicando técnicas de predistorsión digital, a la vez que conseguir rendimientos superiores a los conseguidos con amplificadores lineales.

## II. NO LINEALIDAD EN LOS SISTEMAS EER

La topología de un amplificador de potencia clase E presenta una red de carga compuesta por un circuito sintonizado en serie y una capacidad que deriva el colector a tierra. Esta capacidad de derivación está compuesta por la capacidad propia del transistor y otra capacidad añadida que es la que hace que el amplificador trabaje en la forma deseada. La correcta selección de esta capacidad de derivación y de la reactancia de carga provocan que precisamente en el momento de conmutación la tensión de colector y la derivada de la forma de onda de la tensión de colector sean cero. Ya que no se almacena energía en la capacidad de drenador cuando está funcionando el transistor, no se disipa energía en el proceso de funcionamiento, lo que provoca un alto rendimiento (idealmente del 100%) [3 y 4].

A fin de maximizar el rendimiento, la topología clase E trabaja con los transistores en la región de saturación. El funcionamiento en esta zona provoca el comportamiento no lineal del amplificador de potencia. Sin embargo, existen técnicas como la Eliminación y Restauración de Envolvente (EER) propuesta por Kahn [1] que permite emplear amplificadores no lineales para conseguir una alta linealidad del sistema global. En ella las componentes de amplitud y de fase de la señal a amplificar son amplificadas por separado en amplificadores de alto rendimiento [5, 6 y 7]. Debido a que esta técnica no depende de la linealidad de los transistores de potencia de RF, 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.

Los sistemas EER emplean un driver con nivel de envolvente fijo para atacar al amplificador de potencia de RF. El empleo de un nivel de excitación fijo asegura que el transistor de potencia de la etapa final del amplificador de RF trabaje en saturación, maximizando de esta forma su rendimiento. Sin embargo, su desventaja es una alta potencia de excitación media y una elevada alimentación de excitación cruzada, llamada *feed-through* [8].

### III. PREDISTORSIÓN DIGITAL

La predistorsión es una técnica de linealización en la que la señal de entrada al amplificador de potencia es modificada mediante cierta ley de predistorsión. Esto se traduce en que se antepone al amplificador de potencia un dispositivo alineal cuya relación entrada-salida es la inversa de la relación entrada-salida del amplificador de potencia. La arquitectura más básica de predistorsión existente es la denominada predistorsión en lazo abierto (*open loop predistortion*).

En este proyecto se ha empleado un esquema de predistorsión que utiliza procesamiento digital de la señal a través de la herramienta software Matlab (Fig. 1). 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 técnicas de procesamiento digital. Se ha empleado un modelo de predistorsión en el dominio del tiempo, como se puede ver en [9]. Desde el generador de funciones, las señales de envolvente y fase, esta última predistorsionada, han sido enviadas a sus respectivos amplificadores de potencia de RF para la información de fase y regulador lineal para la información de envolvente.

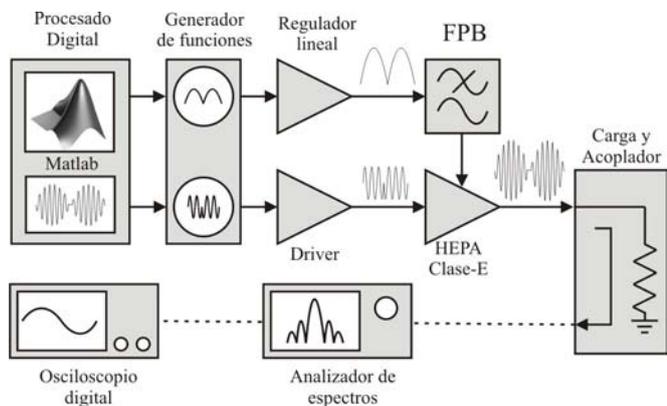


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema EER con predistorsionador.

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 dos: efectos de conversión AM-AM y de conversión AM-PM del amplificador. 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.

En la Fig. 2 se puede observar la conversión AM-AM y AM-PM para todo el ancho de banda de funcionamiento del amplificador clase E. Las variaciones en la amplitud o en la fase de salida en función de la tensión de entrada son debidas a la capacidad no lineal en derivación con el drenador del transistor de potencia del amplificador clase E de banda ancha. El error RSM cometido en la conversión AM-AM es del 1% y el cometido en la conversión AM-PM empleando un polinomio de grado 10 también es del 1%, aproximadamente.

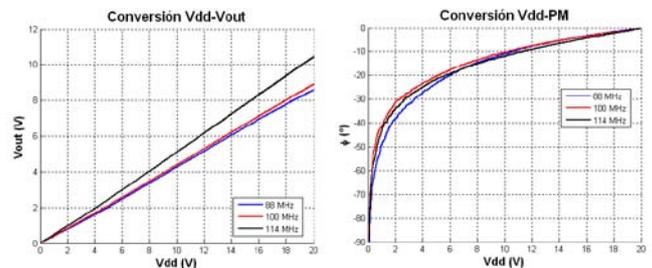


Fig. 2. Conversión AM-AM y AM-PM a varias frecuencias dentro del ancho de banda del amplificador de potencia de RF.

Los esquemas más modernos de predistorsión tienden a ser adaptativos, utilizando un DSP o una FPGA para ajustar los coeficientes del predistorsionador. Normalmente se emplea una señal de error construida a partir de la propia señal de entrada y de la señal de salida, para dirigir el procedimiento de adaptación. En la predistorsión digital adaptativa la función de predistorsión es implementada en un DSP empleando *look-up tables* (LUTs). En esta arquitectura se añade un mecanismo de adaptación que actualiza los elementos almacenados en la tabla durante un intervalo de tiempo dedicado a su fin, después del cual el sistema es capaz de linealizar la respuesta del amplificador de potencia. De esta manera, el sistema es capaz de asimilar las variaciones que puedan sufrir los parámetros del amplificador con el tiempo (envejecimiento, cambios de temperatura, variaciones de alimentación...).

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se van a mostrar diferentes medidas realizadas empleando modulaciones digitales para comprobar la mejora en la linealidad tras la aplicación de la predistorsión digital en lazo abierto. Además, otro punto importante es la comparación del rendimiento obtenido en el sistema global en relación a un sistema lineal.

En el caso de emplear modulaciones con envolvente constante (QPSK,  $\pi/4$  QPSK...) se consiguen niveles de ACPR (*Adjacent Channel Power Ratio*) superiores a 46 dBc tras aplicar predistorsión. En las Fig. 3 y 4 se puede comprobar esta mejora obtenida con respecto al caso sin predistorsión para una modulación  $\pi/4$  QPSK.

También se han realizado pruebas con modulaciones cuya tensión de envolvente sea variable. En las Fig. 5 y 6 se puede comprobar la mejora obtenida al emplear una modulación digital 64QAM con distribución Rayleigh. Se emplea este tipo de distribución debido a que en las transmisiones de datos reales la relación de potencia pico-medio (*peak-to-average power ratio*, PAPR) de la envolvente de la señal es muy alta y además posee pocos picos de tensión. La mejora en la linealidad provoca una mejora en la relación señal a ruido (SNR) y reduce la interferencia intersimbólica (ISI).

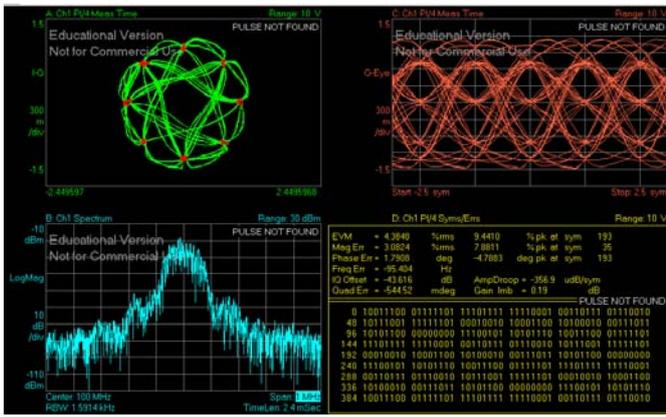


Fig. 3. Medida de una modulación  $\pi/4$  QPSK sin aplicar predistorsión.

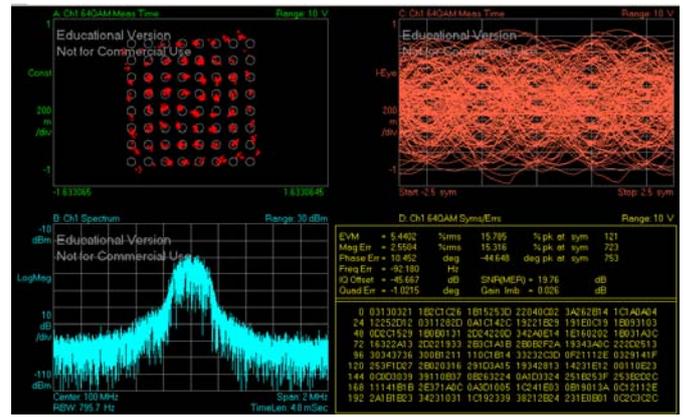


Fig. 5. Medida de una modulación 64QAM con distribución Rayleigh sin aplicar predistorsión.

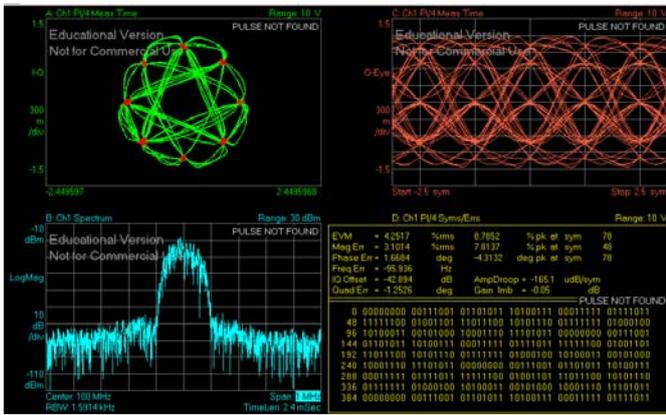


Fig. 4. Medida de una modulación  $\pi/4$  QPSK aplicando predistorsión a la información de fase.

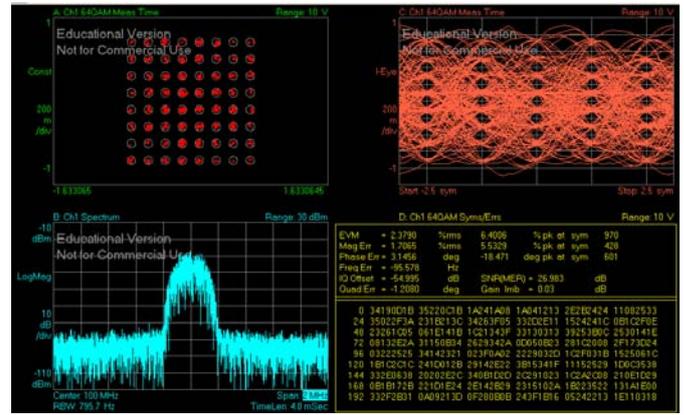


Fig. 6. Medida de una modulación 64QAM con distribución Rayleigh aplicando predistorsión a la información de fase.

Esta mejora también se puede verificar gracias a la reducción del error en la constelación recibida (RCE), también conocida como *error vector magnitude* (EVM).

En la Tabla 1 se pueden ver un resumen de los niveles de ACPR obtenidos para diferentes tipos de modulaciones al aplicar predistorsión y sin ella y la mejora obtenida.

En muchos de estos casos, estos niveles de linealidad con respecto a la portadora no pueden ser mejorados debido al efecto producido por el *feed-through* del driver del sistema EER. En las Fig. 7 y 8 se puede observar claramente este efecto.

| Tipo de modulación   | Sin predistorsión | Con predistorsión | Mejora obtenida |
|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| $\pi/4$ QPSK         | 34 dBc            | 46 dBc            | 12 dB           |
| QPSK                 | 38 dBc            | 52 dBc            | 14 dB           |
| 16QAM                | 35 dBc            | 48 dBc            | 13 dB           |
| 64QAM                | 30 dBc            | 47 dBc            | 17 dB           |
| 256QAM               | 33 dBc            | 48 dBc            | 15 dB           |
| 512OFDM $\pi/4$ QPSK | 21 dBc            | 38 dBc            | 17 dB           |
| 512OFDM 64 QAM       | 24 dBc            | 42 dBc            | 16 dB           |
| 2048OFDM 4QAM        | 18 dBc            | 34 dBc            | 16 dB           |

Tabla 1. Mejora en la linealidad del sistema EER para diferentes tipos de modulaciones.

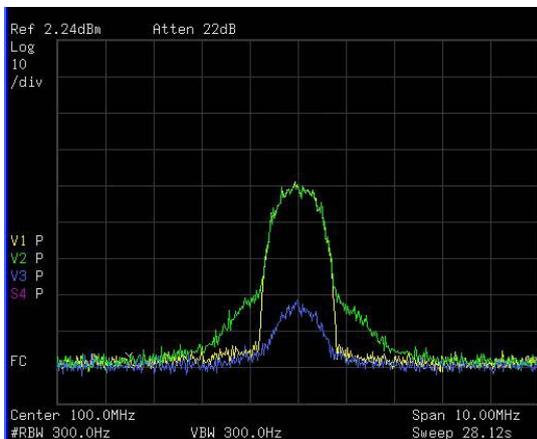


Fig. 7. Comparación del espectro de salida empleando una modulación 256QAM a 100 MHz con un régimen simbólico de 1024 kbd: sin predistorsión (verde) y con ella (amarillo) y efecto del feed-through (azul).

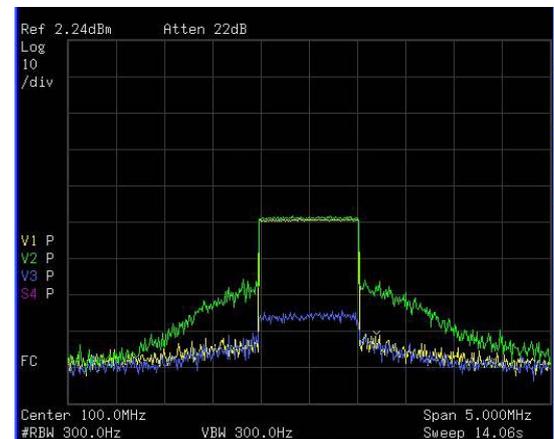


Fig. 8. Comparación del espectro de salida empleando una modulación OFDM a 100 MHz con 2048 portadoras en un ancho de banda de 1024 kHz: sin predistorsión (verde) y con ella (amarillo) y efecto del feed-through (azul).

Normalmente, linealidad y rendimiento siguen caminos diferentes. Sin embargo, aplicando esta técnica EER se puede conseguir una linealidad comparable a la de amplificadores lineales de clase A, B o AB y, además, rendimientos notablemente superiores a los de este tipo de amplificadores lineales. En la Fig. 9 se pueden comparar los rendimientos obtenidos por el sistema EER en relación con un amplificador clase A ideal para las diferentes modulaciones de prueba.

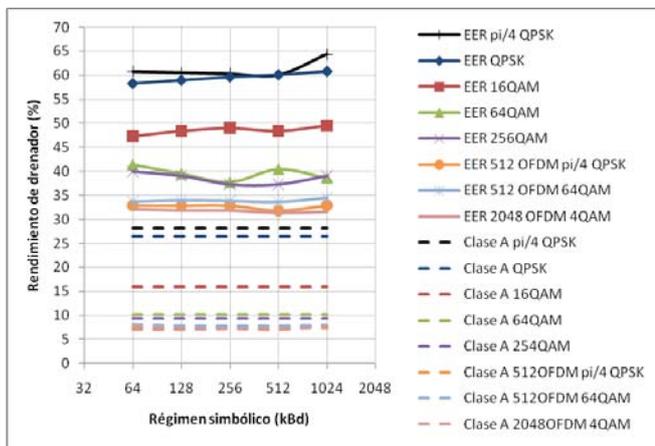


Fig. 9. Comparación del rendimiento entre el sistema EER y un amplificador clase A ideal para diferentes modulaciones.

Las medidas de rendimiento obtenidas con el sistema EER doblan en rendimiento a las del amplificador clase A ideal, lo que conlleva a lograr uno de los objetivos principales en comunicaciones: la reducción del tamaño y peso de los equipos y la reducción del coste de funcionamiento, entendido éste como consumo de potencia. Estas medidas también se han comparado con un amplificador clase B ideal obteniendo rendimientos similares a los obtenidos con el sistema EER e incluso, para modulaciones con envolvente constante como QPSK y  $\pi/4$  QPSK, superiores (58.5% de rendimiento del amplificador clase B ideal para una modulación QPSK y 60.2% para una modulación  $\pi/4$  QPSK). Hay que tener en cuenta que el amplificador lineal clase B no conseguirá esos niveles de rendimiento ideales en la práctica.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado como se ha mejorado la linealidad de un sistema de amplificación por Eliminación y Recuperación de Envolvente 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 12 dB la atenuación por intermodulación para diferentes modulaciones digitales, consiguiendo unos niveles de linealidad de potencia con respecto al canal adyacente de 46 dBc para modulaciones monoportadora y de 34 dBc para modulaciones multiportadora, en un ancho de banda de 2MHz 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 paliar efectos producidos por *feed-through* y otros efectos indeseados no tenidos en cuenta en esta aproximación que podría resolverse aplicando predistorsión adaptativa. En el momento actual se trabaja precisamente en esa dirección.

Como era de esperar, los resultados en cuando a rendimiento se refiere obtenidos con el sistema EER demuestran la efectividad de esta técnica. Se ha conseguido superar el doble de rendimiento que el ofrecido por un amplificador clase A ideal e incluso tener rendimientos similares a un amplificador clase B ideal.

## AGRADECIMIENTOS

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

## REFERENCIAS

- [1] L.R.Kahn, "Single-sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration", *IEEE Proc. of the IRE*, vol. 40, no. 7, July 1952.
- [2] M.Djamai, S.Bachir, C. Duvaud, "Behavioral Modeling and Digital Predistortion of RF Power Amplifiers", *IEEE International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits 2006*, 30-31, pp. 160 – 163, Jan. 2006.
- [3] H. L. Krauss, C. W. Bostian, F. H. Raab, "Solid State Radio Engineering", John Wiley & Sons, 1980.
- [4] F. H. Raab, "Broadband Class-E Power Amplifier for HF and VHF", *Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 902 - 905, San Francisco, CA, June 2006.
- [5] P.B.Kenington, "High-Linearity RF Amplifier Design", Artech House, London 2000.
- [6] S. C. Cripps, "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design", Artech House, 2002.
- [7] S. C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House, 1999.
- [8] F. H. Raab, "Drive modulation in Kahn-technique transmitters," *Int. Microwave Symp. Digest*, vol. 2, pp. 811 - 814, Anaheim, CA, June 1999.
- [9] M. Patiño, D. Tena, F. J. Ortega, J. M. Pardo, "Mejora de la Linealidad de un Amplificador de Potencia para un Sistema EER mediante Predistorsión Digital", *SAAEI 2010* (aceptado para publicación).