

# Aplicación de Técnicas Avanzadas de Linealización a Sistemas de RF/Microondas de Alta Eficiencia, incluyendo su Integración con las Antenas

J. A. García<sup>1</sup>, E. Bertran<sup>2</sup>, J. C. Brégains<sup>3</sup>, G. Montoro<sup>2</sup>, F. Ares<sup>3</sup>, L. Cabria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería de Comunicaciones  
Universidad de Cantabria. 39005, Santander

e-mail: joseangel.garcia@unican.es

<sup>2</sup>Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Universidad Politécnica de Cataluña, 08034, Barcelona

e-mail: bertran@tsc.upc.edu

Departamento de Física Aplicada

Universidad de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela

e-mail: faares@usc.es

**Abstract-** In this paper, an overview of the results obtained when advanced linearization techniques are applied to highly efficient RF/Microwave systems is presented, including their integration with antennas. Different solutions, employing device-, system- and antenna-based techniques, have been explored. It has been shown that their appropriate integration could lead to significant improvements in the linearity and efficiency figures at low cost.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los sistemas de radiocomunicaciones han experimentado un desarrollo espectacular, destacándose las altas tasas en bits por segundo y la movilidad de las aplicaciones. Ello ha conllevado una mayor utilización de formatos complejos de modulación digital con miras a lograr mayor eficiencia espectral, mayor inmunidad frente a ruido, frente a fenómenos de propagación multitrayecto, etc. Los servicios a ofrecer al usuario han crecido notablemente, siendo la movilidad uno de los rasgos más recientes.

Este escenario ha ejercido una enorme influencia sobre los últimos avances en las cabeceras de radio de los transceptores y transpondedores. Las señales moduladas resultantes presentan variaciones significativas de la envolvente, imponiendo especificaciones de linealidad muy estrictas a las etapas de radio. La necesidad de cumplirlas, especialmente en terminales alimentados por baterías (el caso de los móviles), ha determinado un creciente interés en la búsqueda de soluciones para satisfacer el compromiso linealidad-eficiencia en los amplificadores de potencia. Pero todo no queda aquí, estos nuevos sistemas no sólo han de garantizar una baja distorsión no lineal, sino que requieren técnicas de conformado de haz en las estructuras radiantes, el caso de las estaciones bases o los satélites, incluso reconfigurabilidad de las mismas, siendo necesario combinar esfuerzos en diversos campos para ofrecer soluciones de bajo coste adecuadas a las aplicaciones comerciales.

Para intentar dar respuesta a estos nuevos retos, en Noviembre de 2002 se inició un Proyecto Coordinado, el TIC-2002-04084-C03, titulado “Aplicación de las Técnicas Avanzadas de Linealización a los Sistemas de RF/Microondas de Alta Eficiencia, incluyendo su Integración con Antenas”. Este proyecto está compuesto por tres subproyectos enfocados en las soluciones a nivel de dispositivo, a nivel de sistema, y en su integración con los sistemas radiantes, en los que participan la Universidad de Cantabria, la Universidad Politécnica de Cataluña, y la Universidad de Santiago de Compostela junto al CSIC.

En esta comunicación, se presentan algunos resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este proyecto, tanto aquellos que se basan en técnicas de desarrollo más autónomo, como los que han requerido la integración de actuaciones a todos los niveles descritos.

## II. ESPECIFICACIONES DE LINEALIDAD

Uno de los objetivos planteados al inicio del proyecto era desarrollar técnicas, al final de mismo, que pudiesen ofrecer soluciones a problemas reales de las empresas del sector que mostraron interés en el proyecto.

Desde esa perspectiva, era imprescindible recopilar las especificaciones de linealidad impuestas por los diversos formatos en una tarea muy temprana. Se realizó una importante recopilación de especificaciones, una de las cuales se muestra en la Fig. 1.

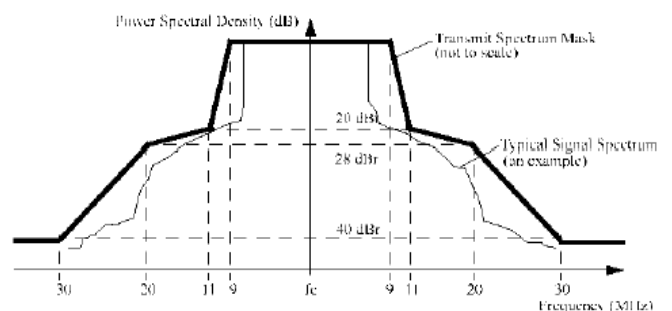


Fig. 1 Ejemplo de máscara espectral (Standard 802.11a).

Es posible apreciar que en un estándar como éste, donde la envolvente tiene una elevada relación potencia pico – potencia media (transmodulación desde BPSK hasta QAM, con posterior modulación OFDM), se imponen requisitos de linealidad bastante fuertes en las etapas transmisoras, los cuales no deben actuar contra la eficiencia energética de las mismas (operación con baterías).

### III. CONTROL DE LA DISTORSIÓN A NIVEL DE DISPOSITIVO

A nivel de dispositivo, se han seguido dos grandes líneas de investigación: la mejora de la linealidad en amplificadores mediante la selección de las condiciones óptimas de polarización y carga, así como la implementación de técnicas de linealización mediante la utilización de dispositivos y subsistemas auxiliares.

#### A. Optimización de las condiciones de operación

En los últimos tiempos, se han logrado avances significativos en la descripción del comportamiento gran señal de dispositivos de diversas tecnologías. En particular, resulta de interés la posibilidad de utilizar los *sweet-spots* de gran señal, puntos de mínima distorsión en la región de máxima eficiencia de potencia añadida. Sin embargo, diversas dificultades relacionadas con la sensibilidad de los mismos a las condiciones de operación han frenado su uso práctico.

En este sentido, se han realizado trabajos de caracterización y modelado exhaustivos sobre dispositivos MESFETs y PHEMTs, para evaluar la influencia de las condiciones de polarización y de carga, de manera de poderlas aprovechar de un modo apropiado. En la Fig. 2, se presentan estos resultados para el caso de un dispositivo EpHEMT, el ATF54143 de Agilent.

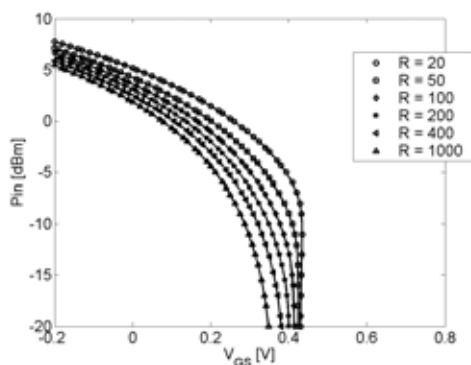


Fig. 2. Evolución en potencia de la posición del *sweet-spot*.

Con ayuda de un control apropiado de una o ambas variables, es posible adaptar la posición del *sweet-spot* en función de la potencia de entrada, obteniéndose una solución sencilla de elevadas prestaciones para amplificadores que han de ser utilizados en sistemas con lazos de control de potencia. En la Fig. 3a, se muestran los resultados medidos para un amplificador donde se ha implementado un control de la impedancia de carga, mediante el uso de una red de adaptación a la salida controlada por tensión [1].

En la Fig. 3b, por otro lado, se presenta la modificación de los perfiles de potencia para una solución basada en el control de la polarización de puerta mediante la introducción

de una resistencia en la rama de polarización de dicho terminal [2].

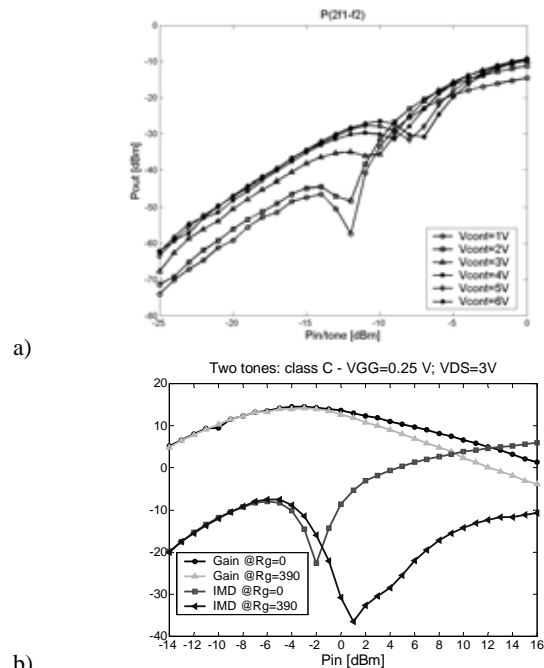


Fig. 3. Adaptación del *sweet-spot*: a) mediante un circuito para el control de la  $R_L$ , y b) mediante el control de  $V_{GS}$  usando  $R_g$ .

#### B. Técnicas de Linealización a Nivel de Dispositivo

El comportamiento en distorsión en régimen gran señal puede ser usado también para el diseño de nuevas estructuras de linealización a nivel de dispositivo. Tal es el caso de la “superposición de derivadas”, una de cuyas alternativas ha sido propuesta en [3].

Esta técnica, originalmente concebida para realizar una implementación puramente circuital, ha sido extendida a una implementación de tipo espacial, aprovechando las propiedades de combinación que ofrece una antena de excitación dual o una agrupación de elementos.

En la Fig. 4, se presentan detalles de una implementación del primer tipo. Dos dispositivos convenientemente polarizados para proporcionar la misma ganancia y componentes de distorsión iguales en amplitud pero de fase opuesta, excitan un parche acoplado por ranura. Como resultado, el patrón de radiación a las frecuencias del canal adyacente presenta un mínimo en todo el rango cubierto por este tipo de radiador, obteniéndose una elevada linealidad con una buena figura de eficiencia.

En el caso de agrupaciones, es posible incluso [4], conformar un mínimo en el patrón de las componentes de distorsión justo en la dirección en que apunte dicho array. Con ello se podría garantizar el requisito de linealidad sólo en la dirección de interés, evitándose la recepción indeseada desde otras posiciones angulares, de utilidad para aplicaciones donde se requieran sistemas de comunicación seguros.

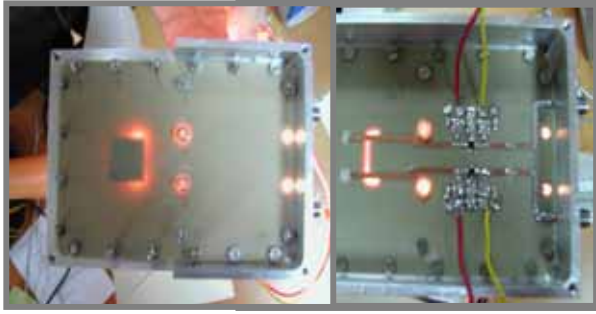


Fig. 4. Implementación de la técnica de superposición de derivadas con ayuda de una antena con excitación dual en fase.

#### IV. TOPOLOGÍAS DE LINEALIZACIÓN A NIVEL DE SISTEMA

Aunque algunas estructuras de este tipo existen desde hace años, el interés por las mismas ha sido retomado con fuerza, dado que en aplicaciones con requisitos extremadamente elevados (por ejemplo, en reducciones de la ACPR del orden de varias decenas de dBs) ellas ofrecerían la mejor alternativa posible. En esta línea particular de actuación, los avances obtenidos han venido asociados a la aplicación de elementos avanzados de teoría de control, en particular de la teoría de hiperestabilidad, a técnicas de linealización convencionales.

A modo de ilustración, se ha propuesto recientemente una solución basada en la mencionada teoría para el diseño óptimo de predistorsionadores adaptativos [5]. En la Fig. 5 se muestra un esquema simplificado de la misma.

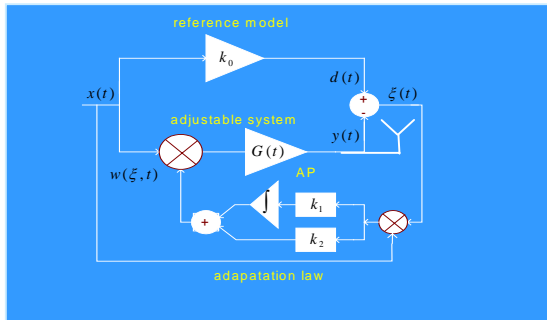


Fig. 5. Esquema simplificado de un linealizador hiperestable.

Su implementación sería factible tanto con soluciones de tipo analógico como mediante el uso de DSPs

##### A. Linealizadores Analógicos

En el caso de los linealizadores analógicos para amplificadores en muy alta frecuencia, se ha trabajado en la implementación óptima de los mencionados predistorsionadores, sustituyendo los multiplicadores de cuatro cuadrantes por mezcladores en una técnica de realimentación de la envolvente [6]. En la Fig. 6, se pueden apreciar algunos detalles de dicha implementación junto a resultados de medidas para una excitación con dos tonos.

Teniendo en cuenta las limitaciones de los mezcladores doblemente balanceados empleados, se ha trabajado en un diseño alternativo con celdas de Gilbert, con superiores prestaciones a las presentadas.

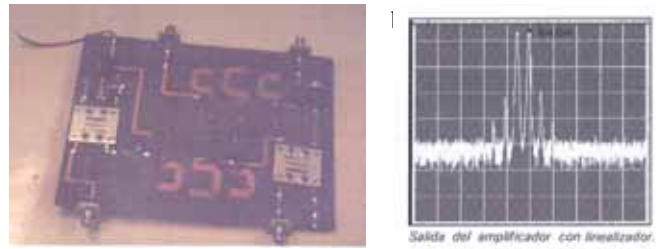


Fig. 6. Linealizador analógico: a) detalle de la implementación, y resultados de medida.

Para el predistorsionador, se ha utilizado una estructura derivada de los resultados presentados anteriormente sobre el control a nivel de dispositivo.

En la siguiente figura se muestran los efectos sobre un test de dos tonos (más portadora) de esta estructura en la reducción de la IMD sobre un amplificador de telefonía móvil GSM (900 MHz).

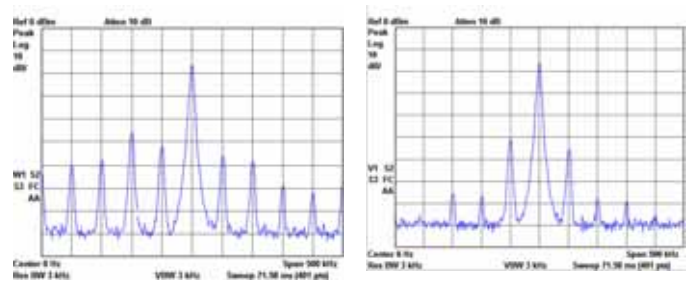


Fig. 7. Salida del amplificador, sin linealizar y una vez linealizado.

##### B. Linealizadores empleando DSPs

Se ha desarrollado por otro lado, un banco de montaje de que permite operar con la DSP TMS320C6711 a fin de poder experimentar en tiempo real estrategias linealizadoras más complejas [7]. Se ha desarrollado una realización simple del linealizador hiperestable con el Simulink, sin embargo, trabajar desde el entorno Matlab/Simulink con el Code Composer no genera un código muy eficiente, por lo que se ha optado por programar directamente los algoritmos en lenguaje C. Y más recientes experiencias de linealización en bandas milimétricas (banda Ka, estándar 802.16-SC) están aconsejando ir migrando hacia las nuevas FPGAs como alternativa a las DSPs. Tanto en este tipo de linealizador como en el anterior, resulta vital garantizar unas prestaciones elevadas del acoplador que precede a la antena. Actualmente, se ha considerado la posibilidad de implementarle mediante una antena de excitación dual (del tipo de la Fig. 4), pero con división asimétrica de la potencia.

#### V. MODELADO, SÍNTESIS Y DETECCIÓN DE FALLOS EN AGRUPACIONES DE ANTENAS

Tal y como se ha comentado previamente, las antenas y sus agrupaciones han de ejercer un papel relevante según las prestaciones a garantizar en los sistemas modernos. Además, ellas podrían contribuir en el mejor desempeño tanto de las técnicas a nivel de dispositivo como a nivel de sistema.

En este sentido, se han realizado actuaciones en las áreas de modelado, para permitir una correcta integración de los radiadores con las soluciones a nivel circuital, así como para la síntesis de patrones de radiación. Además, se ha trabajado sobre la reconfigurabilidad de haces (incluyendo posicionamiento de nullos) y la detección de fallos en agrupaciones, dada la dificultad de estas tareas en agrupaciones grandes con patrones complejos [8].

#### A. Aplicación de las redes neuronales

Se ha trabajado de un modo exhaustivo en la utilización de esta herramienta, dado que permitiría obtener en tiempo real la distribución de excitación de una agrupación a partir de medidas de campo cercano o lejano. En la Fig. 8 se presenta una agrupación plana de elementos, cuya expresión de campo presenta analogía con la arquitectura de una red neuronal de valores complejos y de una sola capa intermedia.

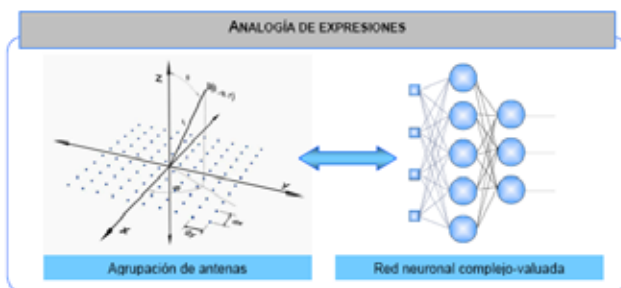


Fig. 8. Se ha aprovechado la analogía existente entre una agrupación plana de antenas y una red neuronal.

#### B. Caracterización de diversos tipos de agrupaciones

En esta línea se ha trabajado con diversas clases de elementos, incluyendo dipolos [9, 10]. Se han caracterizado los circuitos equivalentes, los cuales han sido, además, adaptados para operar con las redes neuronales antes mencionadas. En la Fig. 9, se presentan detalles de una agrupación lineal de dipolos, estudiada tanto con pantalla reflectora como sin ella [9].

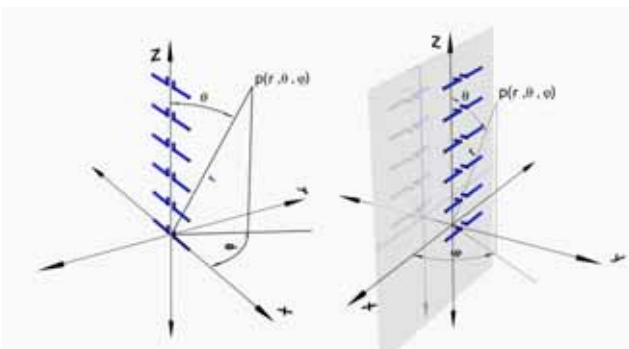


Fig. 9. Agrupación lineal de dipolos paralelos, incluyendo (derecha) pantalla reflectora.

## VI. SISTEMAS DE CARACTERIZACIÓN DESARROLLADOS

Un elemento adicional en este proyecto, ha sido el desarrollo de sistemas de medidas que han permitido ampliar la capacidad de caracterización de los grupos que lo integran. En este sentido se puede mencionar la implementación de un banco de medidas de derivadas de las no linealidades de los dispositivos en condiciones dinámicas, un banco de caracterización de los fenómenos de dispersión de muy baja frecuencia en su influencia sobre la distorsión de intermodulación, el desarrollo de un sistema completo de utillajes para la puesta a punto de los linealizadores, así como elementos de un sistema de medidas puntuales de campo.

## VII. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han presentado algunos resultados ilustrativos obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto coordinado TIC2002-04084-C03, titulado "Aplicación de las Técnicas Avanzadas de Linealización a los Sistemas de RF/Microondas de Alta Eficiencia, incluyendo su Integración con Antenas". Se han cubierto casos individuales así como técnicas que han requerido la integración de actuaciones a nivel de dispositivo, a nivel de sistema, y al nivel de los estructuras radiantes.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha estado subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCyT) a través del proyecto TIC2002-04084-C03.

## REFERENCIAS

- [1] N. B. Carvalho, J. A. García, E. Azpitarte, J. C. Pedro, "Load Impedance Selection for Maximized Large Signal IMD Sweet Spot Effects," to appear in *Int. J. RF and Microw. CAE*, vol. 15, 2005.
- [2] C. Gómez, J. A. García and J. C. Pedro, "IMD Sweet-spot Control on Junction FET Devices using a Gate Bias Resistor", *34<sup>th</sup> European Microwave Conf. Proceedings*, Amsterdam, 2004.
- [3] J. A. García, E. Malaver, L. Cabria, C. Gómez, A. Mediavilla, and A. Tazón, "Device-level Intermodulation Distortion Control on III-V FET's", *11th European GaAs and other Semiconductor Application Symp. Digest*, Munich, 2003.
- [4] L. Cabria, J. A. García, A. Tazón, A. Mediavilla, "Active Radiating Structures based on FET Devices," *Book chapter to appear in Antennas, Reflectors and Beam Control*, 2005.
- [5] A.J. Zozaya, E. Bertran, "Passivity Theory Applied to the Design of Power Amplifier Linearizers" *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 54, n.4, July 2003. pp. 1126-1137.
- [6] E. Bertran, J. Berenguer, A. Zozaya, "Analogue Adaptive Feedback Linearizer", *33rd European Microwave Conf.*, Oct. 2003, Munich, Germany.
- [7] G. Montoro, P.L. Gilabert, E. Bertran, "Linealización por Realimentación Casrtesiana con Modelo de Referencia", *XIX Simposium Nacional de la URSI*. Barcelona, Septiembre 2004.
- [8] J. C. Brégains, A. Pazos Sierra, J. Dorado, M. Gestal, J. A. Rodríguez, F. Ares, "Avoiding interferences in planar arrays through the use of artificial neural networks", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 44, N° 4, pp. 61-65, Aug. 2002.
- [9] J. C. Brégains, F. Ares Pena, "Variation in bandwidths among solutions to shaped beam synthesis problems concerning linear arrays of parallel dipoles.", *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 53, pp.563-566, Jan. 2005.
- [10] J. C. Brégains, F. Ares, E. Moreno, "Matrix pseudo-inversion technique for diagnosis of planar arrays", *Electronics Letters*, vol. 41, n°1, January 2005.