

# Mejora de la eficiencia con técnicas de “outphasing” en amplificadores clase D y AB

Yolanda Jato Llano<sup>(1)</sup>, Amparo Herrera Guardado<sup>(1)</sup>, Francis C. Huin<sup>(2)</sup>

jatoy@unican.es, herreraa@unican.es, francis.huin@acco-semi.com

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio de Ingeniería de Telecomunicación. Plaza de la Ciencia s/n. Santander, Cantabria.

<sup>(2)</sup> ACCO Semiconductors. 36-38 Rue de la Princesse. Louveciennes. France.

**Abstract-** This paper present the design and simulation of a Chireix combiner that will form part of an “outphasing” system. With the application of this technique we should obtain an improvement of the efficiency of the amplifier versus back-off, which will allow us to operate in a more linear region without losing efficiency. We prove that this is not always true and that the success of this technique depends on multiple factors such as the type of input signal, the type of amplifier and the design of the Chireix combiner. The comparison of the results of a class D and a class AB amplifiers is made, achieving a high improvement in efficiency in the case of the first one, which maintains a value of 90% until a back-off of -6 dB, but not so good in the second case due to the own characteristics of the amplifier.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos actuales utilizan técnicas de modulación digital complejas con el fin de conseguir mayores tasas binarias de datos. En consecuencia, los amplificadores de potencia deben soportar señales con valores elevados de PAPR (Peak-to-average power ratio), lo cual fuerza a que éstos sean muy lineales. Esto se consigue trabajando con un gran back-off entre la potencia media y la potencia máxima, degradándose la eficiencia media del amplificador.

La búsqueda de una solución de compromiso entre la eficiencia y la linealidad, ha dado lugar a un gran número de técnicas que tratan de evitar la degradación de la eficiencia del amplificador. Algunas de las más utilizadas son el seguimiento de envolvente ó Envelope tracking (ET) o también la EER (Envelope Elimination and Restoration) [1]. Estas técnicas poseen sus ventajas e inconvenientes y han sido probadas en numerosas aplicaciones prácticas. Sin embargo, una de las más novedosas y que se está utilizando con mayor frecuencia en la actualidad es el “outphasing”, técnica con la que se consigue mantener una alta eficiencia del amplificador en back-off [2], [3].

La estructura del artículo es la siguiente: en el Capítulo II se realizará una breve introducción a la técnica de “outphasing”, en el Capítulo III se muestra la aplicación de la técnica en un amplificador clase D, en el Capítulo IV en un amplificador Clase AB y por último se presentarán las conclusiones

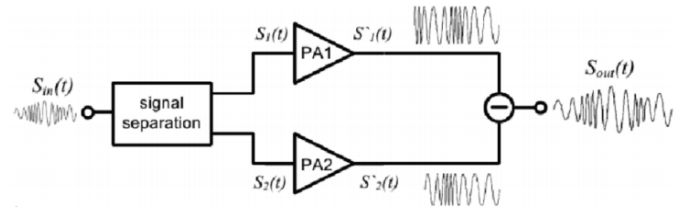


Fig. 1. Esquema de un sistema de “outphasing”.

## II. TÉCNICA DE “OUTPHASING”

En un sistema “outphasing”, la señal de entrada de envolvente compleja se convierte en dos señales de envolvente constante con modulación en fase, las cuales, una vez amplificadas y sumadas, reproducen la señal original amplificada [4]. Si la señal de entrada se define como:

$$S_{in}(t) = A(t)\cos[wt + \varphi(t)] \quad (1)$$

Las señales en cada una de las ramas serán:

$$S_1(t) = V_o\cos[wt + \varphi(t) + \theta(t)] \quad (2)$$

$$S_2(t) = V_o\cos[wt + \varphi(t) - \theta(t)] \quad (3)$$

Donde el llamado ángulo de “outphasing”:

$$\theta(t) = \arccos\left[\frac{A(t)}{V_o}\right] \quad (4)$$

De esta forma, como la señal que entra a los amplificadores tiene envolvente constante, éstos pueden operar en saturación, dando lugar a la máxima eficiencia, y en principio muy buena linealidad. En la Fig. 1 se muestra el esquema sencillo de un sistema de “outphasing”.

Sin embargo, la eficiencia del sistema completo depende del tipo de combinator utilizado para sumar las señales de cada rama [5]. Asimismo, la eficiencia del combinator depende de la dinámica de la señal, esto es, su factor de cresta y su función densidad de probabilidad (PDF) [6].

Se pueden usar dos tipos de combinadores en la etapa de salida: el combinator híbrido perfectamente adaptado y sin pérdidas o bien un combinator no adaptado y con pérdidas conocido como combinator de Chireix [7].

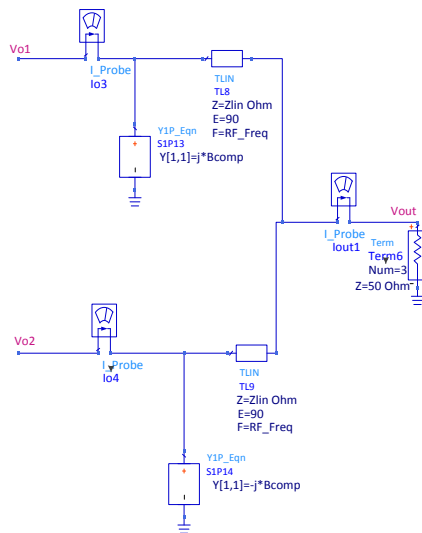


Fig. 2. Esquema del combinator Chireix.

### A. Combinador híbrido.

La utilización de un combinator híbrido como podría ser un Wilkinson, daría lugar a una linealidad perfecta de la señal a la salida debido al aislamiento entre los puertos del combinator. Sin embargo, la eficiencia tendrá un valor bajo ya que las señales desfasadas se disipan en la carga del puerto aislado del combinator.

### B. Combinador Chireix.

El combinator Chireix es un combinator cuyos puertos no están adaptados ni aislados y que presenta pérdidas. Se compone de dos líneas de transmisión  $\lambda/4$  y dos susceptancias en paralelo de valores opuestos en cada línea. En la Fig.2 se muestra el esquema de un combinator Chireix típico.

En los primeros diseños que se realizaron, el combinator que se usaba carecía de las susceptancias en paralelo, pero esto producía en las entradas del mismo impedancias imaginarias. Los amplificadores no obtienen buenos resultados de eficiencia con este tipo de cargas, por lo que se introdujeron los elementos reactivos de compensación para conseguir impedancias reales a determinados valores del ángulo de “outphasing”, consiguiendo con ello mejorar la eficiencia del amplificador. La Fig.3 muestra la variación de impedancia a la entrada del combinator bien en la salida de los amplificadores), en función del ángulo de “outphasing”.

Otro parámetro que se suele representar es la eficiencia del combinator, de la cual dependerá la eficiencia del sistema completo. En la Fig.4 se muestra este parámetro en función de la potencia de salida del combinator y de un barrido del ángulo de “outphasing”. Como se puede ver, se consiguen dos máximos de eficiencia para dos valores de ángulo, que se corresponden con los valores de impedancia real.

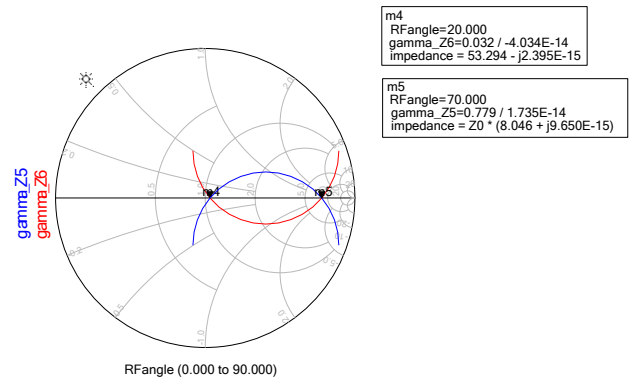


Fig. 3. Impedancias presentadas a los amplificadores por el combinator Chireix.

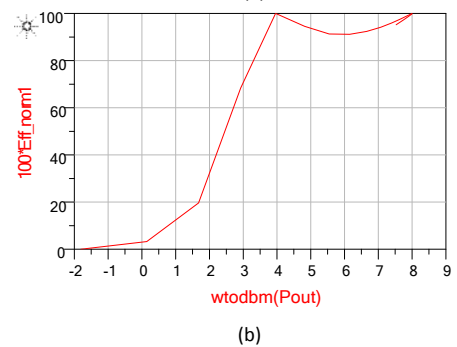
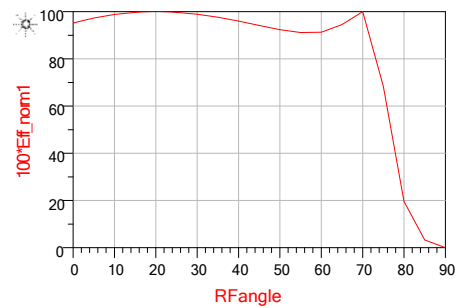


Fig. 4. Eficiencia del combinator en función del ángulo de “outphasing” (a) y de la potencia de salida (b).

## III. APLICACIÓN A UN AMPLIFICADOR CLASE D

Con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema de “outphasing” y la mejora en la eficiencia del amplificador respecto al “back-off”, se simula un sistema con un amplificador de potencia clase D.

Introducimos dos señales de onda continua realizando un barrido del desfase entre ambas (“ángulo de outphasing”) con el fin de emular el comportamiento de la señal de entrada típica de este tipo de sistemas. El combinator fue diseñado para obtener la máxima eficiencia del sistema. En la Fig. 5 se muestra la impedancia de carga de los amplificadores superpuesta a las curvas de “load-pull” de uno de ellos para una frecuencia de 880 MHz.

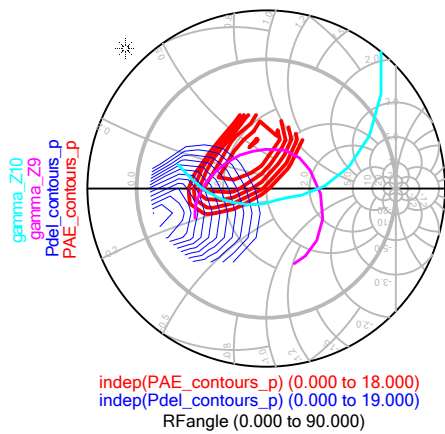


Fig. 5. Impedancia de carga de los transistores superpuesta a los círculos de “load-pull” de uno de ellos (en rojo círculos de PAE y en azul de potencia).

Con la variación del ángulo de “outphasing” se consigue una variación de la potencia de salida del amplificador. Si representamos la eficiencia del sistema respecto a la de un amplificador independiente vemos claramente la mejora que se obtiene. El valor máximo de la eficiencia es algo menor, pero éste se mantiene para un rango dinámico mucho más grande, lo cual significa que puedo operar a un “back-off” más bajo sin perder eficiencia y al mismo tiempo conservar la linealidad del sistema.

La Fig.6 presenta el resultado obtenido en la simulación, donde la eficiencia se mantiene en el 90% hasta un back-off de -6 dB. Además se consiguen 3 dBm más de potencia a la salida por el efecto del combinador.

En la elección de los valores de los componentes de compensación del combinador Chireix así como la impedancia característica de la línea  $\lambda/4$ , se ha tratado de conseguir que los dos ángulos para los que se obtiene la máxima eficiencia estén lo más separados posible para poder obtener valores elevados de eficiencia en un rango dinámico amplio. Por otro lado, también se necesita conseguir que la variación de la potencia de salida con el ángulo de “outphasing” sea lo mayor posible, lo cual se consigue haciendo que las líneas que representan la variación de impedancia del combinador con el ángulo corten de manera perpendicular a las curvas de “load-pull” de potencia del amplificador.

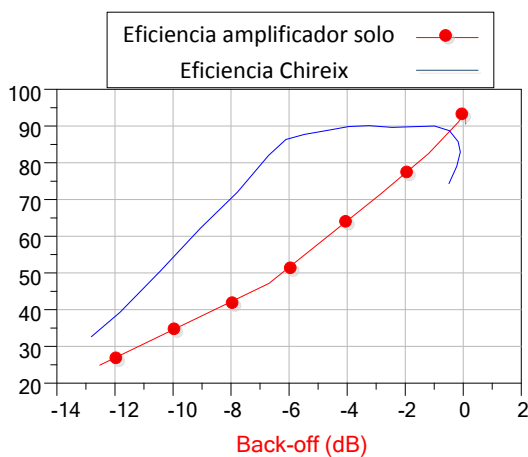


Fig. 6. Eficiencia del amplificador con combinador Chireix frente a la eficiencia del amplificador independiente.

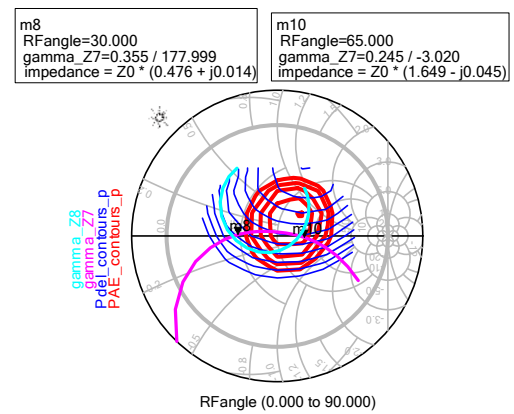


Fig. 7. Impedancia de carga de los transistores superpuesta a los círculos de “load-pull” del amplificador Clase AB (en rojo círculos de PAE y en azul de potencia).

#### IV. APLICACIÓN A UN AMPLIFICADOR CLASE AB

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema de “outphasing” en el amplificador de Clase D, decidimos aplicar esta misma técnica en un amplificador Clase AB diseñado en un proyecto anterior con el fin de tratar de mejorar la eficiencia conseguida a priori con el mismo.

En un principio se reutiliza el mismo diseño para el combinador Chireix conectándolo a la salida del sistema de “outphasing” con los dos nuevos amplificadores en paralelo. Los resultados que se obtuvieron no fueron buenos, ya que no se mejoraba la eficiencia respecto al “back-off”, sino que incluso era peor. La razón se explica visualizando las curvas de impedancia de carga de los transistores superpuestas a las curvas de “load-pull” como se muestra en la Fig.7. En ellas podemos ver cómo el corte que realizan con las curvas de “load-pull” de potencia no es perpendicular, lo que se traduce en poca variación de la potencia de salida con el ángulo, y por tanto, poco rango dinámico.

Para solucionar este problema, es necesario diseñar un combinador nuevo, de forma que las curvas de variación de impedancia corten de manera perpendicular para que la variación de potencia con el ángulo sea máxima. Para ello modificamos el combinador introduciendo una línea de transmisión adicional a la entrada del mismo. La longitud e impedancia de la línea se optimiza para conseguir la rotación deseada en las curvas de impedancia. En la Fig. 8 se muestra la nueva situación de estas curvas frente a las de “load-pull”.

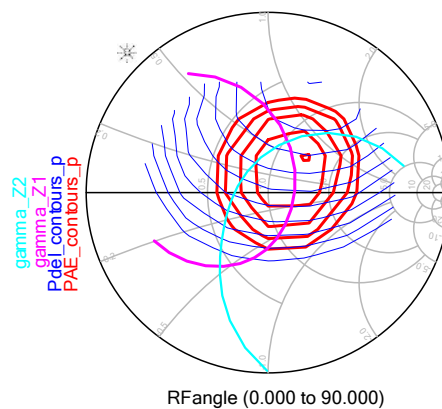


Fig. 8. Impedancia de carga de los transistores superpuesta a los círculos de “load-pull” del amplificador Clase AB con el combinador modificado (en rojo círculos de PAE y en azul de potencia).

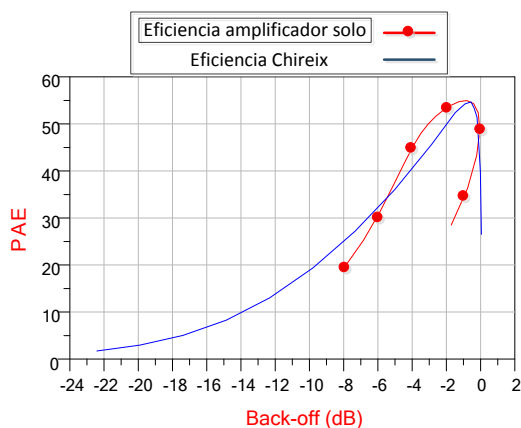


Fig. 9. Eficiencia del amplificador con combinador Chireix frente a la eficiencia del amplificador independiente.

El resultado final obtenido con este nuevo combinador se muestra en la Fig. 9. Como se puede ver, se consigue mejorar la PAE hasta un valor de “back-off” de unos -6 dB, si bien la mejora conseguida es menor que en el caso del amplificador clase D. Esto se debe principalmente a que en el amplificador clase AB, no se consigue una variación suficiente de la potencia de salida con la fase, por lo que el rango dinámico es más pequeño.

Por otro lado, los amplificadores de este tipo no son los óptimos para ser utilizados en un sistema de “outphasing”, ya que su respuesta es sensible a las variaciones de carga, la cual varía constantemente con esta técnica.

## V. CONCLUSIONES

Se ha presentado una breve introducción a la técnica de “outphasing”, la cual tiene como objetivo incrementar la eficiencia de los amplificadores en back-off para poder operar con mayor linealidad sin perder eficiencia.

Se ha demostrado la técnica con dos amplificadores de potencia, clase D y clase AB. Los mejores resultados se han obtenido en el caso del amplificador clase D, ya que su respuesta es más insensible a las variaciones de carga. Además, se ha conseguido en el diseño del combinador una variación de la potencia de salida con el ángulo de “outphasing” mayor, consiguiéndose mantener una eficiencia del 90% para un back-off de -6 dB.

Con este artículo se pretende mostrar que si bien la técnica de “outphasing” obtiene buenos resultados, no es aplicable a cualquier tipo de amplificador de potencia, ya que la mejora conseguida puede ser muy pequeña comparada con la complejidad del sistema necesario.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del proyecto HORFI: Tecnologías de RF para terminales MIMO de banda ultra-ancha, TEC2012-38402-C04-04 del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

## REFERENCIAS

- [1] S. C. Cripps. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2<sup>nd</sup> ed. Norwood, MA, USA. Artech House
- [2] Calvillo-Cortés, D.A.; van der Heijden, M.P.; Acar, M.; de Langen, M.; Wesson, R.; van Rijs, F.; de Vreede, L.C.N., "A Package-Integrated

Chireix Outphasing RF Switch-Mode High-Power Amplifier," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.61, no.10, pp.3721,3732, Oct. 2013.

- [3] Birafane, A.; Kouki, A.B., "On the linearity and efficiency of outphasing microwave amplifiers," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.52, no.7, pp.1702,1708, July 2004.
- [4] X. Zhang, L. E. Larson, P. M. Asbeck. *Design of Linear RF outphasing amplifiers*. Artech House, 2003.
- [5] El-Asmar, M.; Birafane, A.; Kouki, A.B.; El-Rafhi, A., "Optimal combiner design for outphasing RF amplification systems," *Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), 2012 2nd International Conference on* , vol., no., pp.176,181, 12-15 Dec. 2012
- [6] Qureshi, J.H.; Pelk, M.J.; Marchetti, M.; Neo, W.C.E.; Gajadharsing, J.R.; van der Heijden, M.P.; de Vreede, L.C.N., "A 90-W Peak Power GaN Outphasing Amplifier With Optimum Input Signal Conditioning," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.57, no.8, pp.1925,1935, Aug. 2009.
- [7] Chireix, H., "High Power Outphasing Modulation," *Radio Engineers, Proceedings of the Institute of* , vol.23, no.11, pp.1370,1392, Nov. 1935