

Transmisor Outphasing Clase-E de Alta Eficiencia en Tecnología GaN HEMT

David Vegas, Miguel A. González, José R. Perez-Cisneros, M. Nieves Ruiz, José A. García

david.vegas@unican.es, mgr27@alumnos.unican.es, joseramon.perez@unican.es,

mariadelasnieves.ruiz@unican.es, joseangel.garcia@unican.es

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander.

Abstract- This paper presents a Chireix (outphasing) transmitter at UHF band, based on load-independent class-E RF power amplifiers. Drain efficiency peak of 82.2% has been measured, with values above 70% at 10 dB of output power back-off (BO). A wide dynamic range has been obtained at 700 MHz, allowing the reproduction of envelope values 39.4 dB below the peak in a pure outphasing operation. As a validation, a 1.4 MHz LTE signal of 9.6 dB PAPR has been recovered with an averaged power efficiency of 52.5%, satisfying the linearity requirements.

I. INTRODUCCIÓN

A medida que los sistemas de comunicación inalámbrica avanzan hacia la quinta generación (5G), el diseño de arquitecturas de transmisión eficientes es más desafiante, al tener que manejar señales espectralmente eficientes con valores de potencia pico a potencia promedio (PAPR) sin precedentes. Hasta la parte baja de la banda de microondas, los resultados más prometedores se alcanzan principalmente utilizando técnicas basadas en la modulación dinámica de la carga (Doherty, Outphasing, etc.) y/o en conceptos de polarización dinámica (“Seguimiento de la Envolvente” (ET), “Eliminación y Restauración de la Envolvente” (EER), etc.) [1, 2].

Entre los esquemas de modulación de la carga, la técnica Outphasing, originalmente propuesta por Chireix [3], ha sido puesta recientemente en relieve gracias a la introducción de amplificadores de potencia (AP) de alta eficiencia clase-E [4]. El amplificador clase-E, persigue eliminar las pérdidas por conmutación forzando el encendido del transistor con tensión y derivada de la tensión iguales a cero (“Zero Voltage Switching”, ZVS, y “Zero Voltage Derivative Switching”, ZVDS). Sin embargo, la topología tradicional descrita en [4] es altamente sensible a las variaciones en la resistencia de carga, por lo que se viene investigando en topologías que mantengan la operación ZVS para un amplio rango de cargas resistivas. En este sentido, distintos autores han presentado modificaciones en la red de salida de los APs clase-E consiguiendo buenos resultados de eficiencia bajo variaciones en la carga [5-7].

En este trabajo, se ha implementado un transmisor outphasing en la banda de 700 MHz para el manejo de señales de comunicaciones con un valor elevado de PAPR, utilizando un combinador reactivo (tipo Chireix), un transformador de impedancia y dos amplificadores clase-E con un comportamiento insensible a las variaciones de la carga, que siguen la topología descrita en [7].

II. DISEÑO DEL TRANSMISOR OUTPHASING

Como alternativa a la inclusión de líneas de transmisión [5], una operación independiente de la carga del tradicional amplificador clase-E puede ser aproximada si se incorpora de manera adecuada un inversor de impedancia inductivo, como en [8]. Aunque fue propuesta originalmente para un dispositivo con un diodo en antiparalelo, esta técnica ha sido recientemente adaptada a un transistor GaN HEMT en [7]. Existen también otras soluciones para emplear de manera eficiente este modo de amplificación dentro de arquitecturas outphasing, como las basadas en la continuidad de modos clase-E [6].

A. Simulaciones load-pull y red de salida

Siguiendo la propuesta desarrollada en [7], inicialmente se simuló en AWR Microwave Office un amplificador clase-E, de modo a conseguir un perfil eficiente con la variación de la carga, que permita a su vez un control de la potencia de salida apto para ser usado dentro de un esquema outphasing. Para ello, se realizó una simulación de load-pull del transistor CGH35030F de Wolfspeed (CREE Inc.) a las condiciones de trabajo seleccionadas ($V_{GS}=-3.5$ V, $V_{DD}=28$ V), cuyos contornos de eficiencia y potencia de salida se muestran en la Fig. 1. El diseño fundamentado en load-pull sigue trabajos como [9].

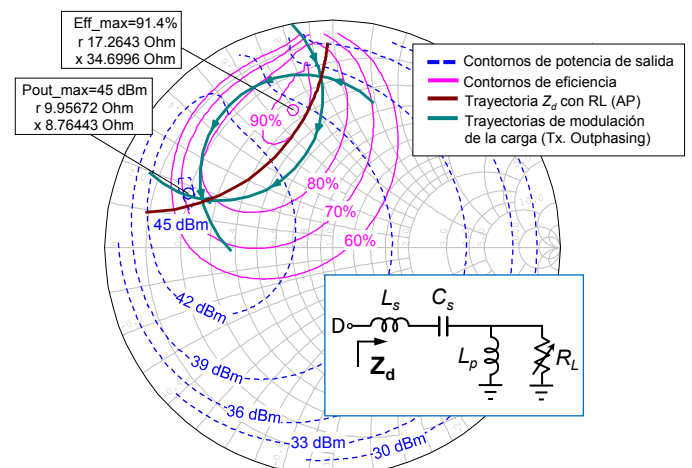


Fig. 1. Contornos de load-pull de eficiencia (—) y potencia de salida (---) para el amplificador. Se han incluido además, las trayectorias de modulación de la carga del amplificador (—), cuya red de salida se muestra, y de cada una de las ramas del transmisor outphasing (—).

Una vez ajustada la red de salida del amplificador, se obtuvo una trayectoria de la impedancia vista en drenador, Z_d , con RL (véase esquemático en Fig. 1), representada sobre la carta de Smith (traza marrón), que se sitúa en la zona de alta eficiencia al mismo tiempo que corta un gran número de contornos de potencia de salida. Por tanto, dicha red es adecuada para ser usada dentro del transmisor Chireix.

La red de salida del transmisor completo se simuló añadiendo, a las redes de salida de ambos amplificadores, el combinador no-aislado (combinador Chireix) y el transformador de impedancia de salida. Estas dos últimas redes permiten situar las trayectorias de modulación mutua de la carga (también mostradas en la Fig.1) de forma que abarquen de manera eficiente un amplio rango de potencia de salida.

La Fig. 2, muestra un esquema simplificado del transmisor completo y los resultados de simulación obtenidos frente al ángulo de desfase entre las ramas. Como puede verse, con esta topología, sería posible alcanzar una eficiencia cercana al 75% a 10 dB de back-off de potencia.

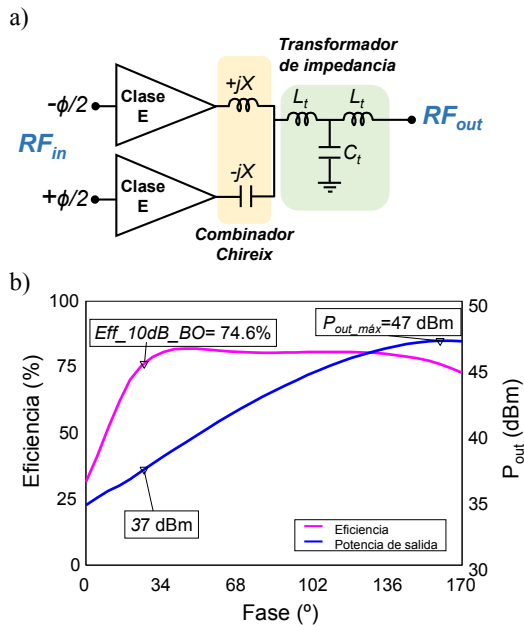


Fig. 2. a) Esquema simplificado del transmisor outphasing implementado. b) Perfiles de eficiencia y potencia de salida simulados frente a la variación del ángulo de outphasing.

B. Implementación del transmisor outphasing

Una vez realizadas las simulaciones, se montaron la red de salida, las redes de adaptación de entrada y las de polarización para formar el transmisor completo (Fig. 3).

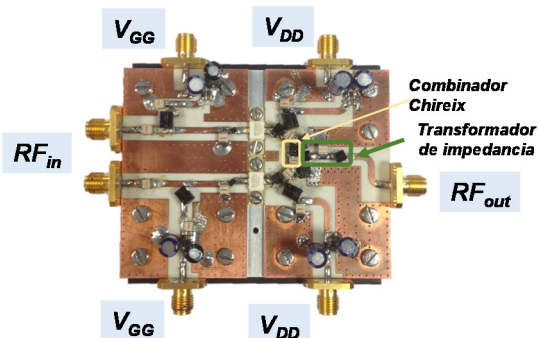


Fig. 3. Fotografía del transmisor outphasing implementado.

En la implementación del circuito, se han utilizado elementos concentrados de alto factor de calidad (Air Core Inductor de Coilcraft y condensadores cerámicos 100B de ATC, respectivamente), así como el sustrato RO4003C para la fabricación de las placas.

III. CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA DEL TRANSMISOR

El transmisor Chireix fue caracterizado en función del ángulo de desfase entre las excitaciones de onda continua aplicadas a la entrada de ambas ramas. En la Fig. 4, se han representado los perfiles de eficiencia medidos a distintas frecuencias frente al back-off de potencia. Para el caso de la frecuencia central, 700 MHz, que alcanza un máximo de eficiencia de 82.2%, destaca su amplio rango dinámico que permitiría reproducir valores de la envolvente 39.4 dB por debajo del pico, operando en modo outphasing puro. Por su parte, el perfil más eficiente para valores de back-off de potencia elevados es el de 710 MHz, pudiendo alcanzar una eficiencia de 80% a 8 dB.

Aunque, como puede observarse, su comportamiento se degrada con la frecuencia, se ha medido una eficiencia superior a 79%, 72% y 58% a 6-, 8-, y 10-dB de back-off, respectivamente, entre 690 y 740 MHz.

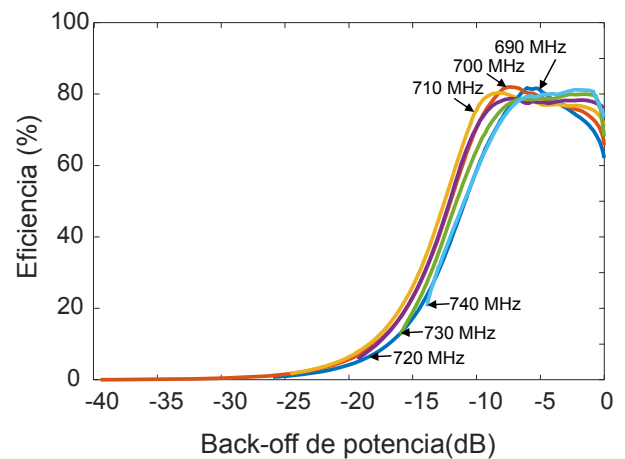


Fig. 4. Evolución de la eficiencia frente al back-off de potencia medido a diferentes valores de frecuencia (690-740 MHz).

IV. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL TRANSMISOR

La capacidad de este transmisor outphasing cuando reproduce señales reales de comunicaciones se evaluó utilizando una señal LTE de 1.4 MHz con 9.6 dB de PAPR. Se escogió esta señal por tener variaciones pronunciadas de la envolvente siendo a la vez banda estrecha. Con ello se pretendía evaluar el potencial del esquema usando un modo outphasing puro. Es posible reproducir señales de mayor ancho de banda, pero implementando un modo mixto de operación, lo cual requeriría un procedimiento de linealización más elaborado.

La señal, cuyo espectro a la salida se muestra en la Fig. 5, fue recuperada con una eficiencia promedio de 52.5% ($\eta_{avg_tot} = 49.8\%$) y $P_{out_avg} = 4.4$ W, cumpliendo los requisitos de linealidad para los canales adyacentes y alternos (ACPR), utilizando una predistorsión sin memoria basada en LUT (lookup table). Si se utilizase como frecuencia central la del perfil más eficiente (710 MHz), se podría alcanzar una

eficiencia promedio superior, pero exigiría una técnica de predistorsión digital (DPD) más compleja.

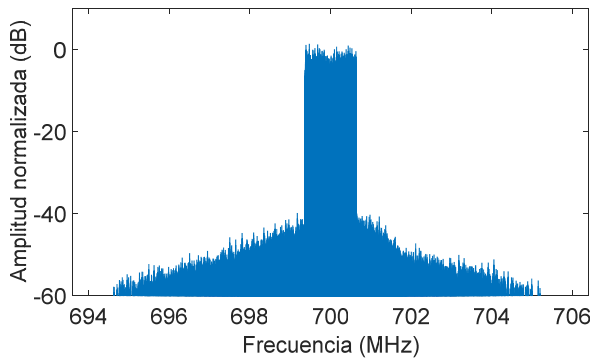


Fig. 5. Espectro normalizado de la señal LTE 1.4 MHz de 9.6 dB de PAPR, recuperado a la salida del transmisor outphasing implementado.

TABLA I
COMPARACIÓN CON TRANSMISORES OUTPHASING EN EL ESTADO DE LA TÉCNICA

Ref.	f_0 (GHz)	η_{ro} @ 6 dB /10 dB OPBO (%)	$P_{out,max}$ (W)	BW _{6dB, 60%} (%)	Señal/PAPR (dB)	η_{avg} (%)
Este trabajo	0.7	80 / 70	55	10	1.4 MHz LTE / 9.6 dB	52.5
[10]	0.9	80 / 70	24	>33	3.84 MHz WCDMA / 6.7 dB	>70*
[11]	2.14	60 / 50	110	2.4	3.84 MHz WCDMA / 9.15 dB	55.6
[6]	2.3	60 / 55	70.6	6.5	3.84 MHz WCDMA / 9.6 dB	53.5

*simulación

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño de un transmisor outphasing a GaN HEMT para operar de manera eficiente con señales de comunicaciones con un valor de PAPR elevado. Basado en un amplificador clase-E diseñado para ser operado bajo condición de carga variable, se ha conseguido medir una eficiencia de 80% y 70% a 8 dB y 10 dB de back-off de potencia a 700 MHz, con un rango dinámico de más de 39 dB que permitiría la operación en modo outphasing puro.

Además, se ha podido recuperar una señal LTE de 1.4 MHz y 9.6 dB de PAPR con una eficiencia promedio de 52.5%, cumpliendo los requisitos de linealidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través de los proyectos TEC2017-83343-C4-1-R y TEC2014-58341-C4-1-R, cofinanciados con fondos FEDER. Los autores agradecen a Sandra Pana su asistencia en la fabricación de las placas. David Vegas agradece también el apoyo recibido a través del contrato predoctoral BES-2015-072203.

REFERENCIAS

- [1] F. H. Raab *et al.*, "Power Amplifiers and Transmitters for RF and Microwave," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 814-826, Mar 2002.
- [2] P. M. Lavrador, T. R. Cunha, P. M. Cabral and J. C. Pedro, "The Linearity-Efficiency Compromise," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 5, pp. 44-58, Aug. 2010.
- [3] H. Chireix, "High Power Outphasing Modulation," *Proc. IRE*, vol. 23, no. 11, pp. 1370-1392, Nov. 1935.
- [4] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E, A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circ.*, vol. SC-10, pp. 168-176, June 1975. R.
- [5] Beltran, F. H. Raab and A. Velazquez, "HF Outphasing Transmitter using Class-E Power Amplifiers," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, June 2009, pp. 757-769, Boston, MA.
- [6] D. A. Calvillo-Cortes, M. P. van der Heijden, M. Acar, M. de Langen, R. Wesson, F. van Rijs, and L. C. N. de Vreede, "A Package-Integrated Chireix Outphasing RF Switch-Mode High-Power Amplifier," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 61, no. 10, pp. 3721-3732, Oct. 2013.
- [7] D. Vegas, F. Moreno, M. Nieves Ruiz and J. A. Garcia, "Efficient class-E power amplifier for variable load operation," in *Int. Integr. Nonlinear Microw. Millimetre-Wave Circuits Workshop*, Graz, Austria, Apr. 2017, pp. 1-3.
- [8] M. K. Kazimierczuk and X. T. Bui, "Class-E Amplifier with an Inductive Impedance Inverter," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 37, no. 2, pp. 160-166, April 1990.
- [9] F.J. Ortega-González, J. L. Jiménez-Martin, A. Asensio-López, G. Torregrosa-Peñalva, "High-Efficiency Load-Pull Harmonic Controlled Class-E Power Amplifier," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 10, Oct. 1998.
- [10] M. Özen, M. van der Heijden, M. Acar, R. Jos, and C. Fager, "A Generalized Combiner Synthesis Technique for Class-E Outphasing Transmitters," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 64, no. 5, pp. 1126-1139, May 2017.
- [11] T. W. Barton and D. J. Perreault, "Four-way Microstrip-based Power Combining for Microwave Outphasing Power Amplifiers," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 61, no. 10, pp. 2987-2998, Oct. 2014.