

# Diseño de un Amplificador de Alta Eficiencia a GaN HEMT en 2.6 GHz

Hugo Mendiguchia, David Vegas, M. Nieves Ruiz, María Pampín, José A. García

[hmg98@alumnos.unican.es](mailto:hmg98@alumnos.unican.es), [david.vegas@unican.es](mailto:david.vegas@unican.es), [mariadelasnieves.ruiz@unican.es](mailto:mariadelasnieves.ruiz@unican.es),  
[maria.pampin@unican.es](mailto:maria.pampin@unican.es), [joseangel.garcia@unican.es](mailto:joseangel.garcia@unican.es)

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

**Abstract-** In this paper, a highly efficient GaN HEMT power amplifier (PA) for 2.6 GHz LTE band is presented. Using the nonlinear model of the selected device, the drain terminating and biasing networks are designed to provide near optima impedance values at the fundamental and higher order harmonics. The second and third harmonics terminations have been specially taken into account in order to obtain the best performance by means of a series of load-pull simulations. Good efficiency and PAE profiles have been obtained at the selected frequency band with the implemented amplifier. A peak of efficiency close to 80% has been measured at 2.6 GHz.

## I. INTRODUCCIÓN

El continuo desarrollo de las técnicas de procesado digital de señal, así como el gran interés por mejorar la eficiencia espectral para conseguir tasas de transmisión de datos elevadas, conllevan el uso de esquemas de modulación que presentan grandes variaciones en la envolvente de la señal y, por lo tanto, un valor alto de la relación potencia pico a potencia media (PAPR). Siguiendo los esquemas IQ convencionales, esta mejora de la eficiencia espectral trae necesariamente aparejada un deterioro de la eficiencia en la utilización de la potencia por parte de los transmisores hasta niveles por debajo del 5%, razón por la cual se viene prestando una especial atención en la implementación de esquemas alternativos como los de seguimiento de la envolvente (ET) [1], Doherty [2] u outphasing [3]. Con este tipo de arquitecturas, sería posible el aumento de la eficiencia de los transmisores, pudiendo alcanzar valores en torno al 50%, por lo que la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> sería notable.

A la disminución de los costes operacionales asociados a las estaciones base, se unen las exigencias desde el punto de vista del usuario, que requiere un aumento de la vida útil de las baterías en los terminales móviles manteniendo al mismo tiempo un alto uso del dispositivo, por lo que la manipulación eficiente de las señales, de modo a reducir el consumo de potencia y la disipación calor, son los pasos necesarios para lograr un ahorro energético en ambos ámbitos.

Teniendo en cuenta que una gran parte del gasto energético es debido al amplificador de radiofrecuencia, en este trabajo se propone el diseño de un amplificador de potencia a GaN HEMT en 2.6 GHz, que presenta una alta eficiencia y podría ser implementado en esquemas de transmisión eficientes como ET u outphasing.

## II. DISEÑO AMPLIFICADOR A 2.6 GHz

Realizar el diseño de un amplificador de potencia de alta eficiencia en la banda de frecuencia seleccionada implica, a priori, una selección adecuada de los elementos concentrados y, sobre todo, del dispositivo activo a utilizar. En este caso, se optó por un transistor GaN HEMT, de Wolfspeed (Cree Inc.), en concreto el CGH35030, cuya evolución en pinch-off del parámetro  $S_{22}$  con la frecuencia, se muestra en la Fig. 1. Dicha medida revela las limitaciones en cuanto a las terminaciones de impedancia que sería posible ajustar a los armónicos superiores, debido principalmente a los parásitos del encapsulado [4].

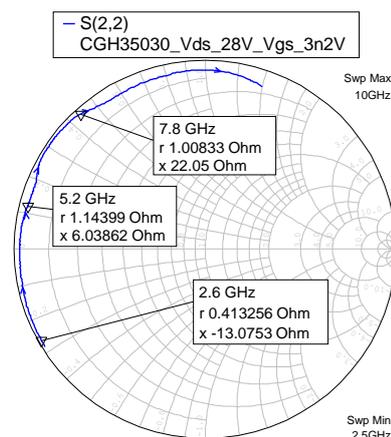


Fig. 1. Evolución del parámetro  $S_{22}$  del transistor CGH35030 con la frecuencia a  $V_{GS} = -3.2$  V.

De la caracterización previa realizada al dispositivo, se determinó el punto de trabajo del amplificador. Para una tensión de drenador de  $V_{DS} = 28$  V, se buscó la tensión de puerta más elevada para la cual el transistor aún no ha empezado a dar muestras de conducción por drenador, lo cual ocurre para una  $V_{GS} > -3.2$  V.

### A. Simulaciones de load-pull

Con el objetivo de afrontar un diseño de alta eficiencia, se realizó un estudio del comportamiento del amplificador, mediante simulaciones de load-pull al fundamental con el software AWR Microwave Office. Para ello se utilizó el modelo del transistor proporcionado por el fabricante.

De modo a observar la evolución de la eficiencia (véase Fig. 2) con respecto a distintas terminaciones de los armónicos superiores, en cada simulación de load-pull se

fijaron diferentes condiciones de impedancia al segundo y tercer armónico, mediante la variación del valor de fase de las mismas (la magnitud de la impedancia a los armónicos se fijó a 1, es decir, en el borde de la carta, evitando así pérdidas por disipación de potencia a dichas componentes). Un resumen de los resultados obtenidos para algunos valores de fase puede verse en la Tabla 1, de donde se extrae que la eficiencia máxima se puede obtener fijando las condiciones de corto circuito a  $2f_0$  y  $3f_0$  y una  $Z_{opt} = 4.58 + j \cdot 10.19 \Omega$  a  $f_0$ , siendo  $f_0$  la frecuencia de trabajo (2.6 GHz). Además, se observó que existe una mayor influencia en el valor de la eficiencia debida a la variación del segundo armónico.

La eficiencia máxima obtenida en simulación para este caso ha sido de 88.728%.

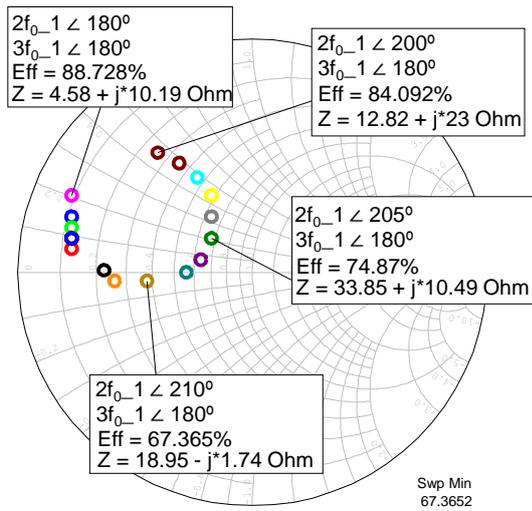


Fig. 2. Puntos de eficiencia máxima obtenidos mediante simulaciones de load-pull, para diferentes terminaciones de los armónicos.

TABLA I  
RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SIMULACIÓN DE LOAD-PULL

Segundo armónico	Tercer armónico	Eficiencia (%)
$0^\circ$	$180^\circ$	83,428
$135^\circ$	$180^\circ$	86,538
$170^\circ$	$180^\circ$	88,083
<b><math>180^\circ</math></b>	<b><math>180^\circ</math></b>	<b>88,728</b>
$185^\circ$	$180^\circ$	88,549

### B. Red de terminación en drenador

Una vez determinadas las condiciones de impedancia a presentar en drenador para un comportamiento óptimo, se realizó el diseño de la red de salida del amplificador en simulación, utilizando los modelos de bobinas de núcleo de aire de Coilcraft y de condensadores cerámicos de ATC.

Mediante sendos condensadores,  $C_{p2}$  y  $C_{p3}$ , a masa se fijaron las condiciones de corto circuito para el segundo y tercer armónico, respectivamente. A su vez, con una bobina,  $L_p$ , se consiguió resonar la capacidad  $C_{p2}$  de cara a ajustar el valor de impedancia al fundamental con ayuda de un tramo de línea y un condensador a masa,  $C_{p1}$ . La red de salida simulada puede verse en la Fig. 3.

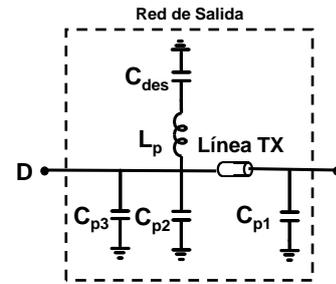


Fig. 3. Red de salida del amplificador simulada.

Con dicha red de salida, se obtiene un valor de eficiencia máxima de 82.26% a 2.6 GHz, fijando las condiciones de impedancia obtenidas en la sección anterior.

## III. IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

Como se ha comentado, para la implementación del circuito se emplearon bobinas de núcleo de aire de Coilcraft y condensadores cerámicos de ATC, ambos de alto factor de calidad. El sustrato sobre el cual se fabricaron las redes de entrada y salida es el 25N de Arlon, de constante dieléctrica 3.38, 0.762 mm de altura y 70  $\mu\text{m}$  de espesor de cobre. Fue montado sobre una base de aluminio de cara a garantizar una buena masa y una adecuada disipación de potencia.

### A. Implementación del circuito

Inicialmente, dados los buenos resultados obtenidos en simulación, se ajustó la red de salida con ayuda de un analizador de redes de modo a implementarla con elementos reales. La evolución con la frecuencia de la impedancia ofrecida por dicha red se muestra en la Fig. 4. Como es posible apreciar, se puede conseguir un valor cercano al óptimo para el fundamental, así como una condición próxima al cortocircuito al segundo armónico.

Dados los elevados parásitos asociados a los elementos concentrados en estas frecuencias, se optó por no terminar finalmente el tercer armónico a cortocircuito mediante el condensador  $C_{p3}$ . Por lo tanto, aunque puede verse en la Fig. 4 que la terminación al tercer armónico se encuentra alejada de la impedancia óptima (cortocircuito), el efecto en la eficiencia no es relevante, dado que existe una mayor influencia debida a la variación del valor de impedancia al segundo armónico, como pudo deducirse de las simulaciones de load-pull de la sección II.

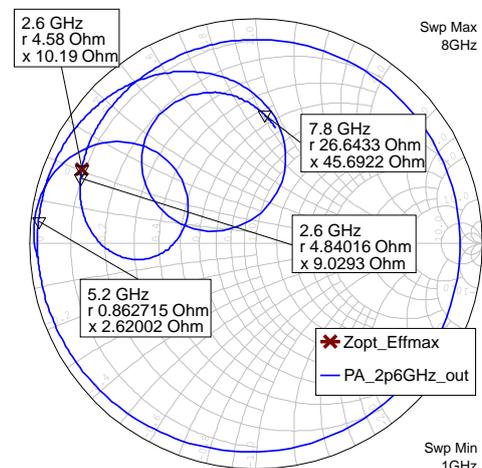


Fig. 4. Medida de la evolución de la impedancia con la frecuencia de la red de salida para el fundamental y el segundo y tercer armónico.

Una fotografía y el esquemático definitivo del amplificador, junto con los valores de los elementos concentrados utilizados, pueden verse en la Fig. 5. La red de entrada se ajustó mediante un condensador a masa, de modo a conseguir maximizar la ganancia a 2.6 GHz, y por tanto, optimizar la PAE.

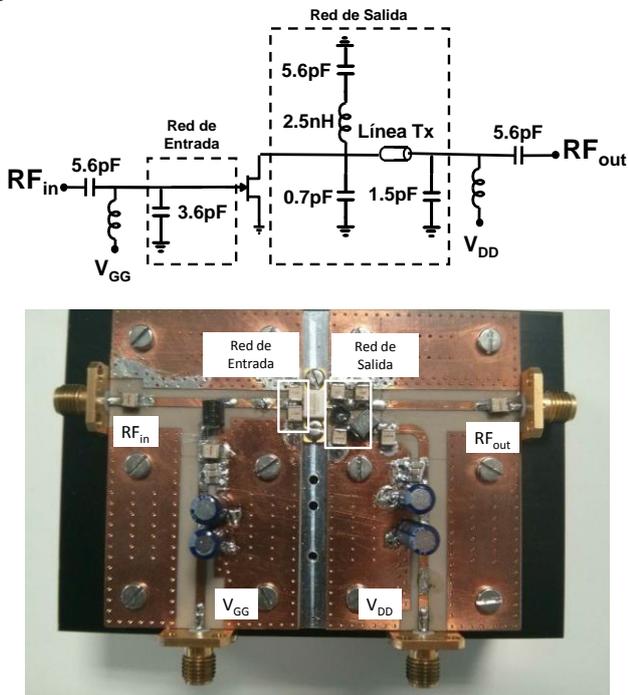


Fig. 5. a) Circuito esquemático y b) fotografía del amplificador de alta eficiencia implementado.

### B. Caracterización de amplificador

El amplificador fue finalmente caracterizado en onda continua (CW). La evolución de la eficiencia, la eficiencia de potencia añadida (PAE), así como la de la potencia de salida frente a la potencia de entrada puede verse en la Fig. 6, para una condición de  $V_{GS} = -3.2$  V y  $V_{DS} = 28$  V. El valor de eficiencia máxima se obtiene para un valor de  $P_m = 30.31$  dBm. En este punto la eficiencia y la PAE es de 79.9% y 75.2% respectivamente. La  $P_{out} = 42.6$  dBm, por lo que se obtiene una ganancia de 12.29 dB.

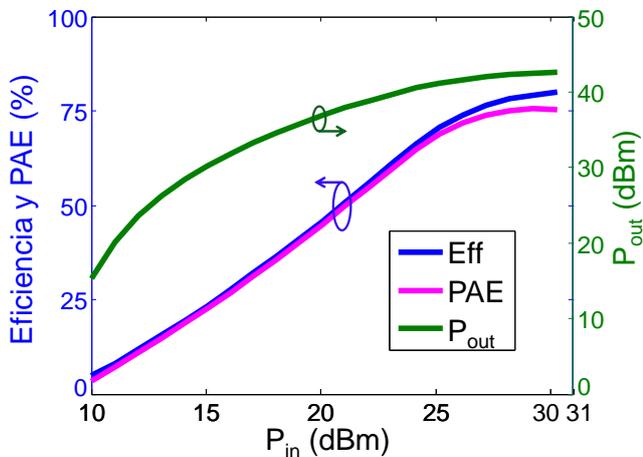


Fig. 6. Perfiles de eficiencia, PAE y potencia de salida del amplificador frente a la potencia de entrada medidos a  $V_{GS} = -3.2$  V y  $V_{DS} = 28$  V.

El comportamiento frente a la frecuencia se muestra en la Fig. 7, donde se observa que el perfil de eficiencia está centrado a 2.6 GHz, obteniéndose en ese punto la eficiencia máxima, mientras que el perfil de potencia de salida es decreciente. Asimismo, se mantiene un valor de eficiencia superior al 70% en un ancho de banda de 180 MHz (2.52 – 2.7 GHz) y de 110 MHz (2.54 – 2.65 GHz) en el caso de la PAE.

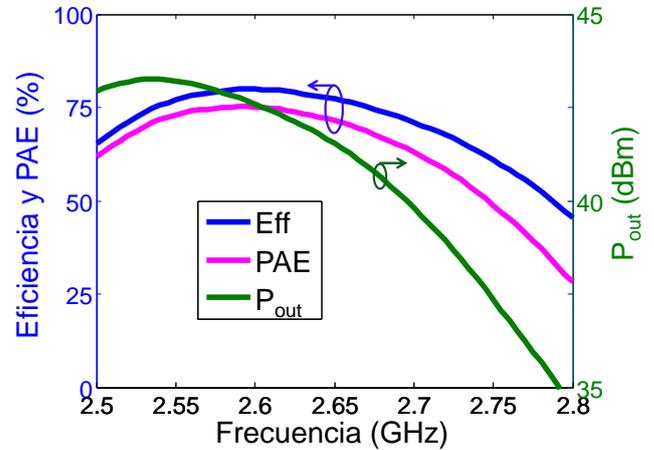


Fig. 7. Evolución de eficiencia, PAE y potencia de salida del amplificador frente a la frecuencia medidos a  $V_{GS} = -3.2$  V y  $V_{DS} = 28$  V.

A continuación, se procedió a caracterizar las prestaciones del amplificador con la tensión de polarización en drenador, de modo a valorar su posible uso como etapa de modulación en un esquema transmisor de tipo EER o ET.

La variación de la amplitud de la tensión de salida, en 2.6 GHz, que se muestra en la Fig.8, sigue linealmente a la polarización en drenador, excepto a valores muy cercanos a cero debido al efecto feedthrough asociado a la capacidad  $C_{gd}$  del transistor. Este resultado de linealidad es satisfactorio de acuerdo a los altos requerimientos de linealidad de los sistemas de comunicación inalámbricos.

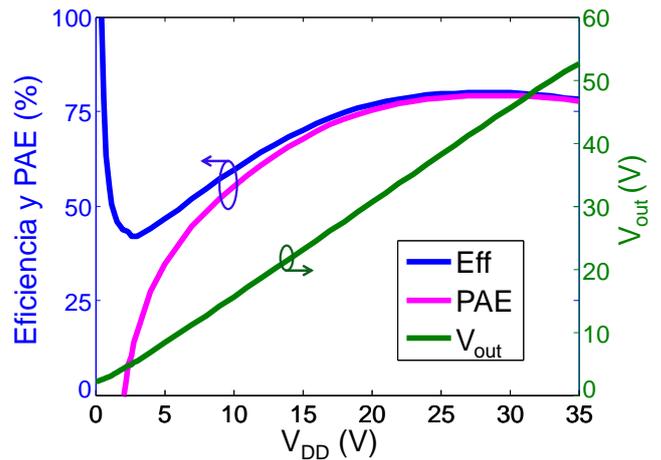


Fig. 8. Evolución de la amplitud de la tensión de salida con  $V_{DD}$ .

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño e implementación de un amplificador de potencia de alta eficiencia basado en un transistor GaN HEMT a 2.6 GHz. Los resultados obtenidos se encuentran en el estado del arte del diseño de amplificadores altamente eficientes para esta banda [5], [6] dado que se logra alcanzar una eficiencia cercana al 80% y una PAE superior al 75%. Además, tanto la eficiencia como la PAE permanecen con valores por encima del 70% para un ancho de banda de 180 MHz y 110 MHz, respectivamente.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al soporte proporcionado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través del TEC2014-58341-C4-1-R cofinanciado con fondos FEDER. David Vegas agradece también el apoyo recibido a través del contrato predoctoral BES-2015-072203.

#### REFERENCIAS

- [1] D. F. Kimball, J. Jeong, C. Hsia, P. Draxler, S. Lanfranco, W. Nagy, K. Linthicum, L. E. Larson and P. M. Asbeck, "High-efficiency Envelope Tracking W-CDMA Base-Station Amplifier using GaN HFETs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 54, no. 11, pp. 3848-3856, Nov. 2016.
- [2] M. Pelk, W. C. Edmun, J. R. Gajadharsing, R. S. Pengelly and L. C. N. de Vreede, "A High-Efficiency 100-W GaN Three-Way Doherty Amplifier for Base-Station Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 56, no. 7, pp. 1582-1591, July 2008.
- [3] M. P. van der Heijden, M. Acar, J. S. Vromans and D. A. Calvillo-Cortes, "A 19W High-Efficiency Wide-Band CMOS-GaN Class-E Chireix RF Outphasing Power Amplifier," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, pp. 1-4, June 2011.
- [4] S.C. Cripps: *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, Norwood, MA, USA, 2006.
- [5] S. Preis, Z. Zhang y M. Arnous, "Design of a GaN HEMT Power Amplifier using resistive loaded harmonic tuning", en *European Microwave Integrated Circuit Conference (EuMIC)*, 2014 9<sup>th</sup>, 2014, pp.552-555.
- [6] H. Tango, T. Hashinaga, K. Totani, H. Kuriyama, Y. Hamada, T. Asaina, "A 60% Efficient Envelope Tracking Power Amplifier for 40W, 2.6GHz LTE Base station with In/Output Harmonic Tuning", en *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IMS)*, 2013.