

AMPLIFICADORES DE POTENCIA PARA APLICACIONES DE MICROONDAS BASADOS EN DISPOSITIVOS GaN

(GaN-based Power amplifiers for microwave applications)

Jorge Julián Moreno Rubio¹, Edison Ferney Angarita Malver¹, Norma Restrepo Burgos¹, Julián Leonardo Rodríguez¹, Juan Mauricio Salamanca², William Alexander Cuevas Carrero²

¹Escuela de Ingeniería Electrónica, UPTC. Grupo inv. Gintel, jorgejulian.moreno@uptc.edu.co, edison.angarita@uptc.edu.co, norma.restrepo@uptc.edu.co, julian.rodriguez@uptc.edu.co

²Escuela de Ingeniería Electrónica, UPTC. Grupo inv. DSP, juan.salamanca@uptc.edu.co, williamalexandercuevas@uptc.edu.co

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

(Recibido el 14 de septiembre de 2015 y aceptado el 12 de noviembre de 2015)

Resumen

Este artículo presenta una discusión sobre las estrategias de diseño de diferentes tipos de amplificadores de potencia para aplicaciones RF/Microondas, tales como el amplificador de carga sintonizada, Clase F, F inverso y Doherty. Además, se muestra la caracterización en onda continua de los amplificadores arriba mencionados, y una comparación de los resultados obtenidos, en términos de ganancia, eficiencia y potencia de salida.

Palabras clave: amplificadores de potencia, dispositivos GaN, amplificadores de microondas.

Abstract

This paper presents a discussion about the design strategies of different kind of power amplifiers for RF/Microwave applications, such as the tuned load power amplifier, class F, class F⁻¹ and Doherty. Furthermore, it is shown the continuous wave characterization of the amplifiers above mentioned. A comparison between the obtained results, in terms of gain, efficiency and output power is presented.

Keywords: power amplifiers (PA), harmonic control, efficiency, gain, wireless communication.

1. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones representan uno de los sectores que demandan mayor nivel de inversión, debido al desarrollo tecnológico e infraestructura que requieren; además son una industria clave con altos potenciales de crecimiento a nivel global y con un importante papel en el desempeño económico de cada país (Isaza & Cadavid, 2009).

El amplificador de potencia (AP) es uno de los tres tipos principales de amplificadores usados en los sistemas

inalámbricos, se encuentra ubicado en la etapa de salida de un transmisor y su función es aumentar el nivel de potencia radiada (Pozar, 2000). Un AP es un componente esencial en los sistemas de comunicación modernos, ya que es el responsable de la mayor parte del consumo de energía, y de esta manera está directamente relacionado con el costo de la transmisión (Camarchia et al., 2013).

Tres figuras de mérito que caracterizan a los AP son la ganancia, la potencia de salida y la eficiencia. Una alta eficiencia disminuye la disipación de calor, promovien-

do la presencia de efectos deseables tales como la prolongación de la vida de los dispositivos, la disminución del costo de transmisión y la reducción del tamaño de prototipo. Diferentes métodos de diseño y arquitecturas para AP han sido propuestos con el fin de superar el problema de la pérdida de energía. Entre ellos se destacan los amplificadores con armónicos sintonizados, en los cuales se sintetizan las formas de onda de voltaje y corriente de drenaje para evitar el traslape entre las mismas, de modo que se disipe la menor cantidad de energía posible en el dispositivo (Cripps, 1999; Colantonio et al., 2009).

En el presente artículo se muestran los resultados del diseño de los AP de alta eficiencia *Tuned Load* (TL), Clase F, Clase F^{-1} y Doherty, usando el dispositivo GaN-HEMT CGH40010 fabricado por Cree Corporation.

En la sección 2 se describen de forma general los AP con armónicos sintonizados y con la arquitectura Doherty, con el fin de entender sus principios de operación. En la sección 3 se muestran los circuitos amplificadores diseñados haciendo énfasis en sus elementos de fabricación. Los resultados de los AP desarrollados en este artículo se pueden observar en la sección 4. Finalmente, en la sección 5 se expone una conclusión general del trabajo realizado.

2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El amplificador de potencia de carga sintonizada o *Tuned Load* pertenece al grupo de amplificadores con armónicos sintonizados. Esta estrategia comúnmente utilizada para comparar y evaluar el rendimiento de esquemas más eficientes (Colantonio et al., 2004), se basa en la idea de reducir sus impedancias a cero, es decir, poner en corto circuito las terminales a las frecuencias armónicas en el dispositivo activo, maximizando y evitando la superposición de las formas de onda de corriente y voltaje a la frecuencia fundamental en la cual la carga es totalmente resistiva (Colantonio et al., 2009; Rubio et al., 2013), siendo 30Ω la carga óptima a la fundamental, como se expresa en Rubio et al. (2011).

Debido a que la corriente de drenaje es controlada por el voltaje de entrada, considerando una polarización en clase AB y una excitación de compuerta sinusoidal, se espera que la forma de onda de la corriente de drenaje sea una sinusoidal truncada, mientras que con las terminales en cortocircuito a las frecuencias armónicas se

obtiene una sinusoidal pura, como forma de onda de voltaje de drenaje (Colantonio et al., 2004, 2009; Rubio et al., 2013).

El AP Clase F es un modelo representativo de un amplificador altamente eficiente con alta potencia de salida y un diseño relativamente simple. Teóricamente, este amplificador puede alcanzar una eficiencia de drenaje del 100 % como resultado de una disipación interna y armónica nula, al poner en circuito abierto la impedancia de carga de los armónicos impares y en cortocircuito la impedancia de carga de los armónicos pares, obteniendo una forma de onda cuadrada para el voltaje a la salida del dispositivo activo y una sinusoidal truncada para la corriente de salida (Cripps, 1999; Ooi et al., 2004; Moon et al., 2012).

El Clase F inverso (F^{-1}) es un doble del AP Clase F, en el cual se intercambian las formas de onda de corriente y voltaje (Moon et al., 2012), por lo tanto, la carga debe ser un corto circuito en los armónicos impares y un circuito abierto en los armónicos pares (Gao et al., 2006; Colantonio et al., 2009). Además, la carga óptima está dada por veces la carga óptima a la fundamental del TL (Moreno-Rubio et al., 2014).

El AP Doherty nace como una solución al problema de baja eficiencia media, siendo típicamente utilizado para el diseño de AP de estaciones base. Su funcionamiento está basado en la idea de modulación de carga presentada en un dispositivo activo, el cual es el amplificador principal (main), y utiliza un dispositivo activo, en segundo lugar, como amplificador auxiliar (peak). Consta básicamente de un divisor de potencia, dos amplificadores (peak y main) y líneas de transmisión para retardos (Colantonio et al., 2009).

3. DISEÑO DE LOS AMPLIFICADORES

Los AP TL, Clase F, F^{-1} y Doherty han sido diseñados a una frecuencia de operación de 2.4 GHz. Dentro de la gran variedad de dispositivos de estado sólido para aplicaciones en radio frecuencia (RF) que han sido desarrollados, el dispositivo CGH40010 fabricado por Cree con un modelo garantizado hasta los 6 GHz, ha sido seleccionado para la fabricación de los amplificadores, aprovechando la potencialidad demostrada por los dispositivos GaN-HEMT, en términos de potencia y alta frecuencia (Colantonio et al., 2009; Pengelly et al., 2012). El sustrato RF-35 de Taconic con espesor de dieléctrico de 0.76 mm

y de cobre de 35 μm ha sido usado para la construcción de las redes de acople de entrada y salida. El *layout* de los circuitos impresos se diseñó en el programa Advanced Design Systems (ADS) de Agilent y la construcción de los prototipos fue realizada de forma artesanal.

Como en la implementación de los amplificadores un número finito de armónicos puede ser eficazmente controlado (Colantonio et al., 2009), en este trabajo solo el segundo y tercer armónicos han sido considerados para permitir la simplificación del diseño del circuito.

Debido a que los componentes parásitos internos del dispositivo activo causados por el empaquetado cambian significativamente las formas de onda de corriente y voltaje de drenaje internas (Park et al., 2006), se obtiene el acceso a la carga intrínseca utilizando el modelo de extracción de parásitos de dos elementos, desarrollado en Rubio *et al.* (2014), el cual se basa en el circuito equivalente del dispositivo.

4. RESULTADOS

Los amplificadores implementados se muestran en las Figuras 1, 2, 3 y 4. Para probar la estabilidad de los circuitos ha sido utilizado un analizador de espectros con ancho de banda hasta 6 GHz, y para verificar las características a pequeña señal de los mismos, ha sido utilizado un analizador vectorial de redes (VNA) R&S ZV8 con ancho de banda hasta 8 GHz. Con un sensor de potencia R&S NRP-Z24 se ha calibrado la potencia en el VNA, y usando un *set-up* en el cual se incluyen un preamplificador y varios atenuadores, se ha realizado la caracterización a gran señal de los circuitos amplificadores. Básicamente se han obtenido las curvas de potencia disponible desde la fuente con respecto a la potencia entregada a la salida, ganancia y eficiencia.

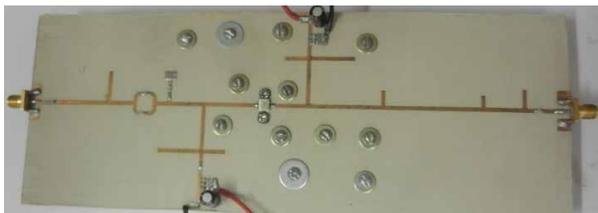


Figura 1. Amplificador TL implementado.

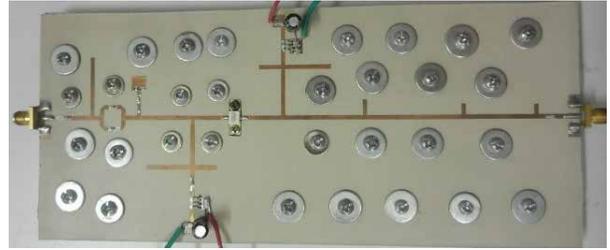


Figura 2. Amplificador Clase F implementado.



Figura 3. Amplificador Clase F inverso implementado.

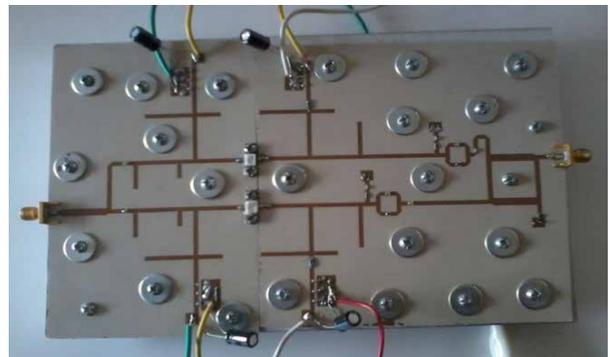


Figura 4. Amplificador Doherty implementado.

La caracterización a gran señal para los AP TL, Clase F y F^{-1} se muestra en la Figura 5. Una potencia de salida superior a los 40 dBm (10 W) ha sido obtenida para los tres amplificadores, demostrándose un alto factor de utilidad para el dispositivo CGH40010, el cual está diseñado para entregar 40 dBm nominales. También se observa la superioridad en cuanto a ganancia y eficiencia por parte del Clase F inverso. Mientras que para el TL la eficiencia en saturación llega al 55 %, para el Clase F se obtiene una eficiencia del 61 % y para el Clase F inverso se obtiene una eficiencia del 70 %. En cuanto a ganancia a pequeña señal, el Clase F inverso con 16 dB supera en 1dB al Clase F y en 3dB al TL, según se muestra en la Figura 5.

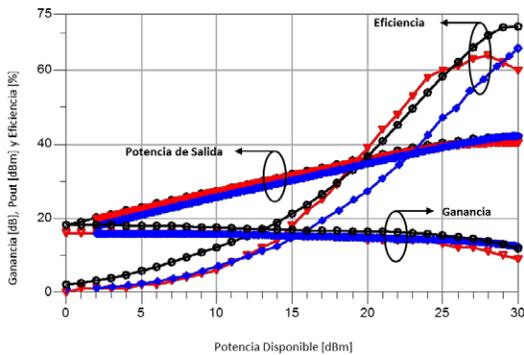


Figura 5. Eficiencia, potencia de salida y ganancia. Tuned Load: en rojo y cuadros. Clase F: en rojo y triángulos. Clase F inverso: en negro y círculos.

En la Figura 6 se observan la ganancia medida y la simulada en el aplicador Doherty en un rango de 0 a 43 dBm. Se obtiene una ganancia medida a pequeña señal de 13.6 dBm, la cual disminuye conforme aumenta la potencia de entrada. A pequeña señal se observa una muy buena concordancia entre la simulación y la medida, sin embargo, en niveles altos de potencia la ganancia medida tiene un decremento mayor que la simulada, lo que puede ser debido a la forma de construcción del AP (artesanal) o a las diferencias entre los modelos de los componentes reales y simulados.

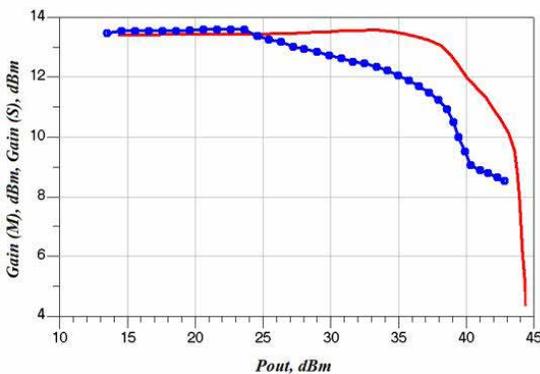


Figura 6. Ganancia amplificador Doherty. Simulada: en rojo. Medida: en azul y círculos.

La Figura 7 muestra la eficiencia medida y la simulada. Se reporta una eficiencia medida mayor al 60 %, el rango de la región Doherty se encuentra entre 39 y 44 dBm

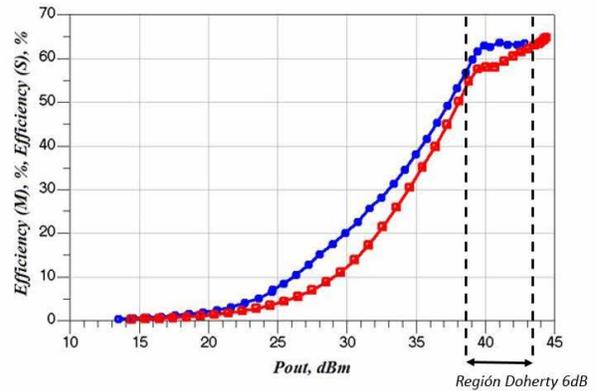


Figura 7. Eficiencia amplificador Doherty. Simulada: en rojo y cuadros. Medida: en azul y círculos.

5. CONCLUSIONES

Una discusión acerca de la estrategia de diseño y resultados del amplificador de potencia de carga sintonizada, Clase F, Clase F inverso y Doherty ha sido presentada, con el fin de comparar sus curvas características en cuanto a ganancia, potencia de salida y eficiencia. El amplificador Clase F inverso con eficiencia de 70 % en saturación, ganancia de 16 dB y potencia de salida de 40 dBm, obtuvo el mayor rendimiento entre los amplificadores de etapa única. Por otro lado, el DPA alcanzó una eficiencia mayor a 60 % en su región Doherty, un *Output Back off* (OBO) cercano a 6 dB y una potencia de salida máxima de 44 dBm. Los amplificadores fueron diseñados y caracterizados con transistores de alta movilidad electrónica a base de nitruro de galio (*10W Cree CGH40010 GaN HEMT packaged device*) a una frecuencia de 2,4 GHz.

6. REFERENCIAS

- Camarchia, V. et al. (2013). 7 GHz MMIC GaN Doherty power amplifier with 47% efficiency at 7 dB output back-off. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* 23 (1), 34-36. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/LMWC.2012.2234090>
- Colantonio, P., et al. (2004). HF class F design guidelines. In *15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2004, IEEE*. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/MIKON.2004.1356848>

- Colantonio, P., et al. (2009). *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers*. UK: John Wiley and Sons.
- Cripps, S. C. (1999). *RF power amplifiers for wireless communications*. Norwood, USA: Artech House.
- Gao, S. et al. (2006). Microwave class-F and inverse class-F power amplifiers designs using GaN technology and GaAs pHEMT. In *36th European Microwave Conference, IEEE*. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/EUMC.2006.281473>
- Isaza, A. M. & Cadavid, A. M. O. (2009). El TLC y el sector de las telecomunicaciones en Colombia: panorama actual. *Perfil de Coyuntura Económica*, (5), 72-93.
- Moon, J. et al. (2012). Behaviors of Class-F and Class F⁻¹ -Amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(6), 1937-1951. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2012.2190749>
- Moreno-Rubio, J. et al. (2014). Harmonic tuned RF/microwave high efficiency power amplifier design accessing the intrinsic drain. In *Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV) IEEE*.
- Ooi, S. F. et al. (2004). High efficiency class-F power amplifier design. In *High Frequency Postgraduate Student Colloquium, 2004, IEEE*. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/HFPSC.2004.1360365>
- Park, H.-C. et al. (2006). High-efficiency class-F amplifier design in the presence of internal parasitic components of transistors. In *36th European Microwave Conference, IEEE*. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/EUMC.2006.281249>
- Pengelly, R. S. et al. (2012). A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(6), 1764-1783. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2012.2187535>
- Pozar, D. M. (2000). *Microwave and RF design of wireless systems*. UK: John Wiley & Sons, Inc.
- Rubio, J. M. et al. (2011). A 22W 65% efficiency GaN Doherty power amplifier at 3.5 GHz for WiMAX applications. In *Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMMIC)IEEE*. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/INMMIC.2011.5773332>.
- Rubio, J. J. M. et al. (2014). Estrategia de diseño para un amplificador de potencia de alta eficiencia Clase F a 1.9 GHz. En *Memorias del X Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada*, Pamplona.
- Rubio, J. J. M. et al. (2013). El amplificador de potencia de carga sintonizada. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada RCTA*, 2(22).