

## ECUACIONES CERRADAS PARA EL DISEÑO DE AMPLIFICADORES CLASE F

### CLOSED EQUATIONS FOR THE DESIGN OF CLASS F AMPLIFIERS

Jorge Julián Moreno-Rubio<sup>1</sup>  
Javier Francisco Rodríguez-Mora<sup>2</sup>  
Nydia Esperanza Cely-Angarita<sup>3</sup>  
Edison Ferney Angarita-Malaver<sup>4</sup>

Recibido: febrero 20 de 2015  
Aceptado: mayo 18 de 2015

#### Resumen

Este artículo muestra una metodología para el diseño de amplificadores clase F, basada en ecuaciones cerradas que permiten el cálculo directo de la red de acople de salida. Como demostración, un prototipo ha sido realizado usando el dispositivo GaN HEMT CGH40010 de Cree, obteniendo una eficiencia de drenaje máxima de 65%, ganancia a pequeña señal de 14.2 dB y potencia de salida en saturación de 41 dBm, usando excitación tipo sinusoidal. Las formas de onda obtenidas para el voltaje y la corriente de drenaje son coherentes con la teoría y los resultados en onda-continua son sobresalientes.

**Palabras clave:** GaN-HEMT, amplificador de potencia, alta eficiencia, HEMTs, amplificador de microondas.

#### Abstract

This paper shows a methodology for designing class F amplifiers based on closed equations that allow the direct calculation of the output matching network. For the sake of proving, a prototype has been carried out using the Cree's device GaN HEMT CGH40010, obtaining a maximum drain efficiency of 65 %, small signal gain of 14.2 dB and saturated output power of 41 dBm, using sinusoidal excitation. The drain voltage and current waveforms are coherent with theory and the results in continuous-wave are outstanding.

**Keywords:** GaN-HEMT, power amplifier, high efficiency, HEMTs, Microwave amplifier.

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico, Doctor en Dispositivos Electrónicos, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. E-mail: jjmorenorubio@uptc.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero de Sistemas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. E-mail: javierfrancisco.rodriguez@uptc.edu.co

<sup>3</sup> Ingeniero de Sistemas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. E-mail: nydia.cely@uptc.edu.co

<sup>4</sup> Ingeniero Electrónico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. E-mail: edison,angarita@uptc.edu.co

## 1. Introducción

En un sistema de comunicación inalámbrico el costo de transmisión está directamente relacionado con su capacidad de usar eficientemente la energía. A su vez, la mayor cantidad de energía es usada en el transmisor, más específicamente en el amplificador encargado de suministrarle la suficiente energía a la antena para obtener el radio de cobertura deseado (Kim et al., 2010 p. 87). Por lo tanto, una importante tarea es desarrollar metodologías específicas para el diseño de amplificadores de potencia altamente eficientes y para aplicaciones de Radio Frecuencia y Microondas.

Una de las muchas propuestas realizadas hasta el momento es el amplificador clase F (Colantonio et al., 2009, p. 177) el cual, a partir de la síntesis de sus formas de onda de voltaje y corriente en el drenaje o colector del dispositivo, alcanza eficiencias relativamente altas. En este caso, asumiendo una forma de onda para la corriente de drenaje (o colector) del tipo sinusoidal truncado, la idea es que el voltaje de drenaje tenga una forma de onda cuadrada, de tal forma que se evite al máximo el traslape entre voltaje y corriente, evitando así la disipación de energía a través del dispositivo e incrementando a su vez la eficiencia.

Dado que en la literatura poco se mencionan los detalles de diseño de la red de salida cuando se usan dispositivos con empaquetado, en la sección II, se muestra una metodología que permite calcular inmediatamente la red de acople de salida que conlleva a la síntesis de las cargas tanto a la frecuencia fundamental como al segundo y tercer armónico, buscando las formas de onda deseadas.

Luego, en la sección III, una implementación en Advanced Design System, ADS, usando un dispositivo de alta movilidad electrónica es llevada a cabo como forma de probar la eficacia de la metodología y mostrando resultados

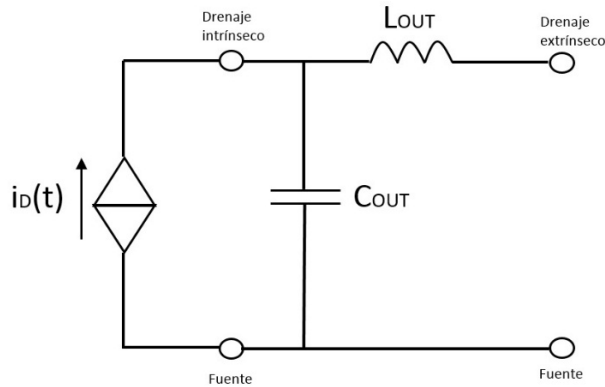
sobresalientes y coherentes con la teoría. Finalmente, se muestra como conclusión la idea de entregarle al lector una serie de ecuaciones cerradas que permiten el diseño rápido de este tipo de amplificadores.

## 2. Metodología de diseño

Los dispositivos de alta movilidad electrónica construidos sobre nitruro de galio (GaN-HEMT) (Liu et al., 2006), se caracterizan por la capacidad de manejar altas potencias, además de altas frecuencias. Por lo tanto, en este artículo se asume la utilización de este tipo de transistores, los cuales en términos generales son tipo FET, Field Effect Transistor. Trasladar los conceptos que se presentan en este artículo a otro tipo de dispositivos, no debe ser un problema mayor para alguien con relativa experiencia en electrónica.

Además, como se presentó en Moreno et al, (2014 p. 1), se asumirá una red reactiva intrínseca de salida del dispositivo, debida a la capacitancia entre drenaje y fuente, presente en dispositivos FET, y al empaquetado del transistor, como se muestra en la figura 1. Los valores de la capacitancia  $C_{OUT}$  e inductancia  $L_{OUT}$  de salida son obtenidos usando el procedimiento mostrado en Lu et al, (2008 p. 115).

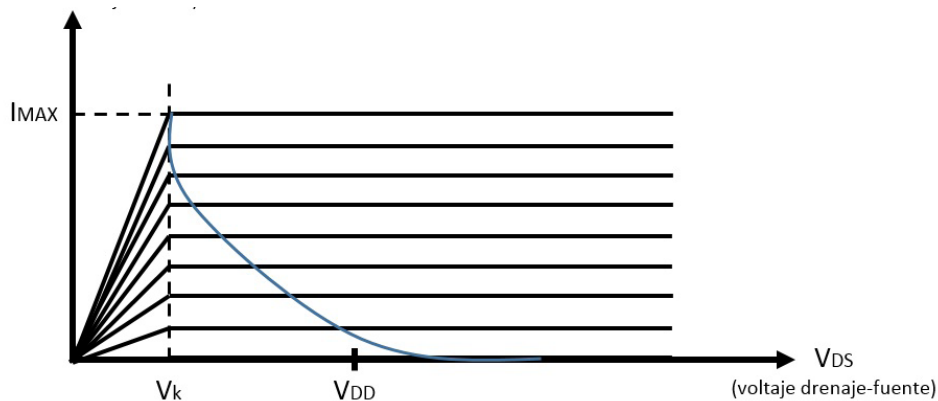
Como puede verse en Colantonio et al, (2009 p. 177), el trabajo de ingeniería necesario para obtener un amplificador *clase F* consiste en diseñar una red de acople de salida, de tal manera que un corto circuito sea presentado al drenaje intrínseco del dispositivo a la segunda frecuencia armónica, mientras que un circuito abierto debe ser generado a la tercera; en realidad teóricamente es una impedancia real de gran magnitud que depende del ángulo de conducción del drenaje, pero en muchos casos simplemente una impedancia con magnitud relativamente grande es una buena aproximación.



**Figura 1.** Red de salida equivalente de un dispositivo tipo FET empaquetado

Los armónicos de mayor orden se consideran cortocircuitados o simplemente se desprecian. La carga fundamental debe estar dada por la carga del amplificador de *carga sintonizada* como se muestra en Colantonio et al, (2009 p. 177), multiplicada por un factor de 1.15. En otras palabras, la carga  $Z_L$  del amplificador *clase F* es real y 15% mayor a la carga del circuito con *carga sintonizada*. Así

$$Z_L = \frac{1.15(V_{DD} - V_k)}{I_1} \quad (1)$$



**Figura 2.** Aproximación típica de curvas I-V para un dispositivo FET

El valor de  $Z_L$  dado en la ecuación (1), permite que el dispositivo al ser excitado con una señal sinusoidal, tenga una curva dinámica como la mostrada en la figura 2, exactamente al entrar en

Donde,  $V_{DD}$  es el voltaje de polarización drenaje-fuente,  $V_k$  es el voltaje *knee* e  $I_1$  es la componente fundamental de la corriente de drenaje. Nótese que si consideramos la corriente de drenaje con una forma de onda del tipo sinusoidal truncada, como es la tendencia en este tipo de dispositivos polarizados en clase B o AB, su componente fundamental estará dada por:

$$I_1 = \frac{I_{MAX}}{2\pi} \frac{\phi - \sin \phi}{1 - \cos \frac{\phi}{2}} \quad (2)$$

Siendo,  $I_{MAX}$  la corriente de saturación del dispositivo (ver figura 2), y  $\phi$  es el ángulo de conducción, el cual depende de la polarización (voltaje de compuerta  $V_{GG}$ ) del dispositivo. Por ejemplo, si el dispositivo es polarizado en clase B,  $\phi$  es igual a  $\pi$  radianes. Téngase en cuenta que, como mostrado en (Cripps, 2006), el ángulo de conducción debe estar teóricamente entre  $\pi$  y  $2\pi$  radianes.

saturnación. Esto indica un factor de utilización del 100% del dispositivo.

La red de acople de salida, propuesta en este trabajo, es como se muestra en la figura 3. El objetivo de la red es generar en el drenaje intrínseco del dispositivo, un cortocircuito al segundo armónico, alta impedancia al tercer armónico y finalmente también sintonizar la componente fundamental al

valor calculado, usando las ecuaciones 1 y 2. Dado que se desea generar una metodología de diseño para aplicaciones de alta frecuencia, se propone una red con elementos distribuidos, en este caso líneas de transmisión.

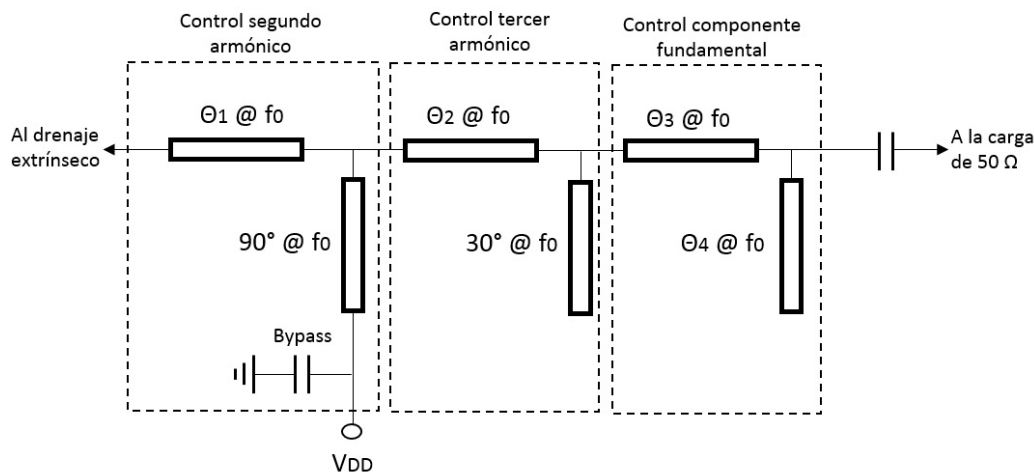


Figura 3. Red de acople de salida propuesta usando líneas de transmisión,  $f_0$  representa la frecuencia fundamental.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos para  $C_{OUT}$  y  $L_{OUT}$ , se puede diseñar la red de control del segundo armónico, lo cual consiste en calcular la longitud eléctrica  $\theta_1$  para generar un cortocircuito a dos veces la frecuencia fundamental en el drenaje intrínseco. Nótese que esta red es a su vez usada como red de polarización. Así,  $\theta_1$  puede calcularse como

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( -\frac{4\pi f_0 L_{OUT}}{Z_0} \right) + n \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Donde  $n$  es cualquier entero,  $f_0$  es la frecuencia fundamental y  $Z_0$  es la impedancia característica de todas las líneas de transmisión en la red.

Conociendo  $\theta_1$ , se puede ahora calcular  $\theta_2$ , y así diseñar la red de control del tercer armónico, que para el caso del amplificador *clase F*, sugiere la obtención de alta impedancia (circuito abierto) a tres veces la frecuencia fundamental en el drenaje intrínseco. De esta manera,  $\theta_2$  está dada por

$$\theta_2 = \frac{1}{3} \tan^{-1} \left( \frac{1 - 36\pi^2 f_0^2 L_{OUT} C_{OUT}}{6\pi f_0 C_{OUT} Z_0} \right) + \theta_1 + n \frac{2\pi}{3} \quad (4)$$

En el caso de la red para acople a la fundamental, es necesario obtener  $\theta_3$  y  $\theta_4$  de tal manera que al drenaje intrínseco del dispositivo se sintetice la carga  $Z_L$  calculada. Para este fin, desde un simple despeje algebraico (6), (7), (8) y (9), se pueden igualar las partes reales e imaginarias de la siguiente relación:

$$\frac{j\sqrt{3}Z_0Z_3}{Z_3 + j\sqrt{3}Z_0} = Z_0 \frac{Z_0 \cot \theta_4 \tan \theta_3 + j50[\tan \theta_3 - \cot \theta_4]}{50[1 + \cot \theta_4 \tan \theta_3] - jZ_0 \cot \theta_4} \quad (5)$$

con

$$Z_3 = \frac{jZ_0^2 \tan(\theta_1 + \theta_2) - Z_4 Z_0}{jZ_4 \tan(\theta_1 + \theta_2) - Z_0} \quad (6)$$

y

$$Z_4 = \frac{Z_C Z_I - Z_L Z_C - Z_L Z_I}{Z_L - Z_C} \quad (7)$$

$$Z_C = -j \frac{1}{2\pi f_0 C_{OUT}} \quad (8)$$

$$Z_L = j2\pi f_0 L_{OUT} \quad (9)$$

Algunos diseñadores pueden decidir usar la carta de Smith en vez de usar ecuaciones y hacer cálculos, pero la intención en este trabajo es entregar al lector ecuaciones de diseño cerradas, las cuales pueden ser usadas independientemente y permiten usar un simple código de programación para así obtener resultados inmediatos. De esta manera, solo conociendo los valores  $C_{OUT}$  y  $L_{OUT}$ , un código en MATLAB u otro programa podría entregar todo el diseño de la red de acople de salida.

### 3. Implementación y resultados

En este trabajo se ha tomado como frecuencia fundamental 2.4 GHz, la cual es una frecuencia

con potencial para ser usada en las tecnologías modernas de comunicaciones inalámbricas de cuarta y quinta generación [4G y 5G respectivamente] (Kim & Prasad, 2006). Pero como puede notarse desde la sección anterior, la metodología a utilizar es independiente de la frecuencia seleccionada.

Por otra parte, el dispositivo GaN-HEMT CGH40010 de Cree ha sido seleccionado por ser un dispositivo con un modelo no-lineal garantizado y disponible para su uso en ADS (Moreno-Rubio et al., 2012, p.1). Para este dispositivo se ha demostrado que  $C_{OUT}=1.275$  pF,  $L_{OUT}=0.653$  nH [1], y usando (1)  $Z_L=34.5 \Omega$ . Usando (3), (4) y (5) se obtiene  $\theta_1=79.3^\circ$ ,  $\theta_2=36.1^\circ$ ,  $\theta_3=76.3^\circ$  y  $\theta_4=53^\circ$ .

La red de acople de salida ha sido diseñada para lograr estabilidad incondicional dentro y fuera de banda, además buscando obtener acople a la conjugada y así obtener máxima transferencia de potencia (Camarchia et al., 2012 p. 1). El esquemático del amplificador diseñado se muestra en la figura 4.

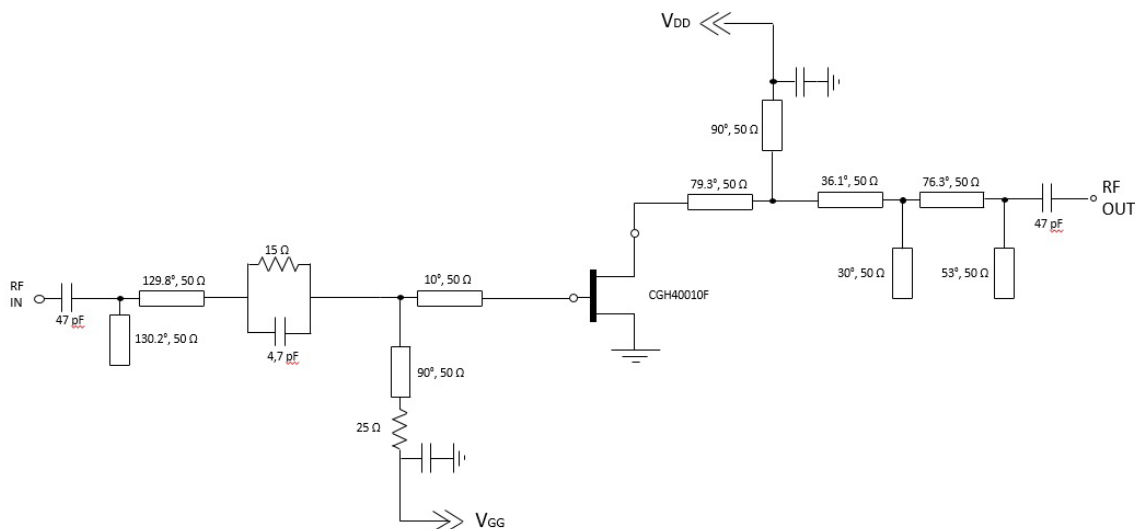


Figura 4. Esquemático del amplificador clase F diseñado

Los valores de  $V_{DD}$  y  $V_{GG}$  son 28V y -2.8V respectivamente, los cuales presentan una polarización clase AB cercana a clase B, como lo sugerido por varios autores (Colantonio et al., 2009, p.177)-(Cripps et al., 2006). La figura 5 muestra las formas de onda obtenidas para la corriente y el voltaje de drenaje cuando se entra en saturación. Nótese la tendencia del voltaje de drenaje a ser una onda cuadrada y el de la corriente a ser una sinusoidal truncada, como sugiere la teoría sobre amplificadores clase F.

La figura 6 muestra los resultados de eficiencia de drenaje, ganancia transducida y potencia de salida en función de la potencia disponible desde la fuente de excitación. Como puede notarse una eficiencia en saturación de 65 % ha sido obtenida, junto con una ganancia a pequeña señal de 14.2 dB y una potencia de salida en saturación de 41 dBm (12.6 W).

Este resultado es satisfactorio en comparación con el estado del arte para este tipo de dispositivos, como se muestra en la tabla 1.

Referencia	Ganancia (dB)	Eficiencia (%)	Potencia (dBm)
(Gao et al., 2006, p.1719)	10	50	38
(Ando, Takayama, Yoshida, Ishikawa, & Honjo, 2009, p. 269)	19.5	70.6	27.8
(Lee, Lee, & Jeong, 2008, p.59)	12.2	70.9	40.2
(Wongtanarak & Chalermwisutkul, 2011, p. 152)	20	68.45	37.2
Este Trabajo	14.2	65	41

Tabla 1. Estado del arte amplificador Clase F

El amplificador diseñado está siendo implementado sobre el sustrato RF35 de Taconic con espesor de 0.76 mm y constante dieléctrica de 3.5, y un *set-up* está siendo preparado para su caracterización tanto a pequeña como gran señal.

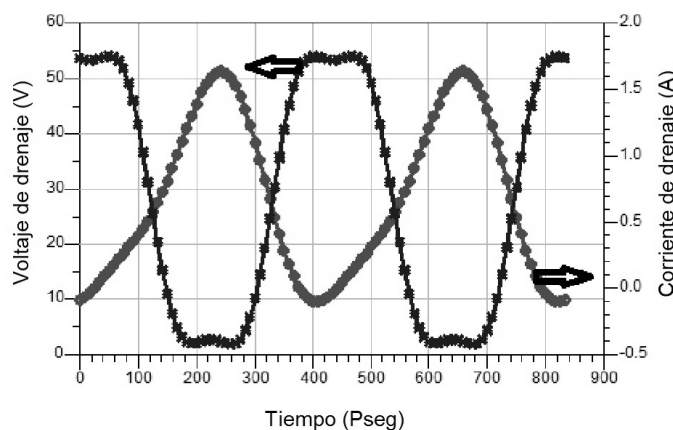


Figura 5. Voltaje (estrellas) y corriente (círculos) de drenaje.

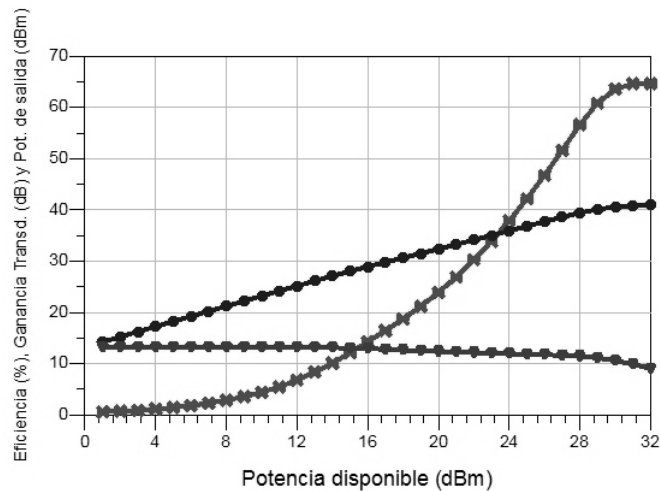


Figura 6. Eficiencia (estrellas), ganancia transducida (triángulos) y potencia de salida (círculos).

#### 4. Conclusiones

Este artículo muestra una propuesta que usa ecuaciones cerradas para el diseño de la red de acople de salida de amplificadores clase F. Un prototipo ha sido realizado mostrando la efectividad de la metodología, y entregando excelentes resultados en cuanto a eficiencia, ganancia y potencia de salida. Los resultados han sido comparados con el estado del arte, dejando ver su competencia frente a otros prototipos diseñados. Se le entregó al ingeniero de RadioFrecuencia y Microondas, una herramienta que le permite obtener de forma casi inmediata el diseño de un amplificador de alta eficiencia para aplicaciones en sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones, GINTEL, de la UPTC, por su patrocinio.

#### Referencias

Ando, A., Takayama, Y., Yoshida, T., Ishikawa, R., & Honjo, K. (2009). A predistortion linearizer for

a class-F GaN HEMT power amplifier using two independently controlled diodes. *En Microwave Conference, 2009. APMC 2009. Asia Pacific* (pp. 269-272).

Camarchia, V., Fang, J., Ghione, G., Rubio, J., Pirola, M., & Quaglia, R. (2012). X-band wideband 5W GaN MMIC power amplifier with large-signal gain equalization. In *Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMMIC)*, pp. 1-3, 3-4. DOI: 10.1109/INMMIC.2012.6331935.

Colantonio, P., Giannini, F., & Limiti, E. (2009). *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers*. Wiley Library (pp. 177-277).

Cripps, S. C. (2006). *RF power amplifiers for wireless communications*, second edition. Artech House, Incorporated.

Gao, S., Butterworth, P., Sambell, A., Sanabria, C., Xu, H., Heikman, S., Mishra, U., & York, R. A. (2006). Microwave Class-F and Inverse Class-F Power Amplifiers Designs using GaN Technology and GaAsPHEMT. in *European Microwave Integrated Circuits Conference*, pp. 1719-1722 DOI: 10.1109/EMICC.2006.282691.

Kim, B., Junghwan, M., & Ildu, K. (2010). "Efficiently Amplified". IEEE Microwave Magazine, 11 (5), 87-100. DOI: 10.1109/MMM.2010.937099.

Kim, Y.K., & Prasad, R. (2006). 4G: Roadmap and Emerging Communication Technologies. Artech House, Incorporated.

Liu, J., Zhou, Y., Zhu, J., Lau, K.M., & Chen, K. J. (2006). AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> DH-HEMTs with an InGa<sub>N</sub> notch for enhanced carrier confinement. IEEE Electron Dev. Lett., vol. 27, (pp. 10 – 12)

Liu, J., Zhou, Y., Zhu, J., Lau, K.M., & Chen, K. J. (2006). AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> DH-HEMTs with an InGa<sub>N</sub> notch for enhanced carrier confinement. IEEE Electron Device Letters, 27(1), 10 – 12. DOI: 10.1109/LED.2005.861027

Moreno-Rubio, J.J., Angarita-Malaver, E.F., Perez-Mancera, L.F., & Burgos, N.R., Cuevas-Carrero,

W.A. (2014). Armonic Tuned RF/Microwave High Efficiency Power Amplifier Design Accessing the Intrinsic Drain. IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV). (pp. 1-6). Panamá, Panamá.

Yong-Sub, L., Mun-Woo, L., & Yoon-Ha, J. (2008). High-Efficiency Class-F GaN HEMT Amplifier With Simple Parasitic-Compensation Circuit. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 18(1) pp.55-57. DOI: 10.1109/LMWC.2007.912023

Wongtanarak, C., & Chalermwisutkul, S. (2011). Design and implementation of a 1 GHz GaN HEMT class-F power amplifier for transistor model evaluation. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference pp.152-155. DOI: 10.1109/ECTICON.2011.5947794