

DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE AMPLIFICADORES DE POTENCIA EN BANDA L CON TRANSISTORES DE ELECTRONES DE ALTA MOVILIDAD DE NITRITO DE GALIO

Especialista de III. Ing. Pedro Luis Hernández Portilla ¹, Inv. Agregado Enrique Romero Mustelier ², Inv. Aux MSc Yosvany González Mandado ³

¹²³CIDP “Grito de Baire”, Santa Ana #711 / 47 y Reforma, Plaza de la Revolución, La Habana

¹pfernandezp94@gmail.com, ²enromero@nauta.cu

RESUMEN

El trabajo refleja procedimientos asociados al diseño, modelación computacional y construcción de etapas de potencia en banda L empleando transistores de nitrito de Galio (HEMT GaN). En la ponencia se exponen, además, aspectos relacionados con simulación de procesos estáticos y dinámicos, acoplamientos de impedancias y polarización secuencial para los amplificadores de potencia basados en transistores de GaN dado al gran empleo que tiene en la actualidad para el desarrollo de las industrias como la automovilística y la aeronáutica, debido a las posibilidades y facilidades que brindan. Se incluyen resultados prácticos de construcción de una etapa de potencia de 5W con transistor de GaN.

PALABRAS CLAVES: transistores GaN, alta movilidad, nitrito de galio.

DESING, SIMULATION AND CONSTRUCTION OF POWER AMPLIFIERS AT BAND L WITH TRANSISTORS OF HIGH MOVILITY ELECTRONIC GAN

ABSTRACT

The work reflects procedures associated with the design, computational modeling and construction of L-band power stages, using gallium nitrite transistors (HEMT GaN). The paper also discusses aspects related to simulation of static and dynamic processes, impedance coupling and sequential polarization for power amplifiers based on GaN transistors. These devices are of great connotation given the great employment they currently have for the development of the industries, such as the automobile and aeronautics, due to the possibilities and facilities they provide. This paper include practical results of the construction a 5 W GaN power amplifier.

KEY WORDS: GaN transistor, high movility, gallium nitrite.

1. INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA.

Estado del arte

El auge y desarrollo de los sistemas de comunicaciones ha potenciado la investigación y el desarrollo de amplificadores de potencia. Un amplificador de potencia 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. Tres figuras de mérito que caracterizan a los amplificadores de potencia son la ganancia, la potencia de salida y la eficiencia [1]. Una alta eficiencia disminuye la disipación de calor, promoviendo 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 amplificadores de potencia han sido propuestos con el fin de superar el problema de la pérdida de energía. Las exigencias de diseño a estos dispositivos (mayor potencia, linealidad, eficiencia y ancho de banda) los hacen los elementos más críticos en cualquier sistema de comunicaciones [2]. Si bien constituye una gran meta diseñar amplificadores de gran ganancia, más exigente lo

es que se comporten lineales en toda la banda de trabajo. La alta eficiencia de estos amplificadores permite que se reduzcan costos y tamaño de los transmisores de los sistemas de telecomunicaciones [3].

Los estudios realizados destacan que las tecnologías más prometedoras son aquellas basadas en materiales de banda prohibida ancha. Dentro de ellos destacan los semiconductores de nitrito de galio, y sus aleaciones con aluminio e indio. Estos semiconductores son aplicables en los transistores de efecto de campo (FET) para requerimientos de alta potencia y temperatura. Dada la complejidad de estas tecnologías se puede afirmar que el diseño y desarrollo de amplificadores de estado sólido de potencia dentro del mundo de la ingeniería en RF y microondas es una especialidad [4].

Dada la alta movilidad de los electrones, los transistores de nitrito de galio permiten manejar grandes valores de corriente, por lo que tienen una alta densidad de potencia unido a un voltaje de ruptura alto. Su funcionamiento es permitido hasta altas frecuencias y a elevados términos de temperatura. Estos transistores tienen su principal aplicación en amplificadores de potencia, y se emplean en la etapa de salida de estaciones base de celulares, radares y otras. Para la comunicación 3G son críticas la alta linealidad y eficiencia. Un solo dispositivo de GaN puede suplantar a diez dispositivos de arseniuro de galio (GaAs) [5]. Esto conlleva a una reducción de costos y espacio, además de mejor acoplamiento de impedancias de entrada. Además en el ámbito militar se investiga la incursión en transmisores de estaciones base, satélites de banda ancha, sistemas de distribución local multipunto, terminales de banda Ku (12-18 GHz) y de radio digital. En amplificadores de alta potencia clase AB en la banda X (8-12 GHz) [6]. Se puede agregar también que, dada su elevada estabilidad térmica podría emplearse en vehículos eléctricos híbridos y en radares compactos para la detección y evasión de obstáculos, con aplicación en la industria automotriz y aeronáutica [7].

En nuestra entidad se tiene la necesidad de fabricar un amplificador de potencia para emplearlo en varias frecuencias de interés comprendidas dentro del espectro de frecuencias que comprende banda L (según IEEE), por ende nuestra propuesta debe meritarse a mantener la misma potencia en dicho rango de frecuencia. Además se requiere de un dispositivo capaz de trabajar a temperatura ambiente, sin ventilación forzada, lo cual demanda a su vez que este sea eficiente para disminuir los consumos, el calentamiento por pérdida de energía y mayor aprovechamiento de esta última. Para darle solución a esta problemática se diseñó y fabricó un amplificador clase A de 5 W en el rango de frecuencias de 800 a 2500 MHz, cuya eficiencia es de un 40 %. Los resultados muestran la linealidad alcanzada por el dispositivo y la potencia deseada. También se pudo concluir que dada la eficiencia alcanzada se puede trabajar el dispositivo por espacios de tiempo prolongados sin que alcance temperaturas superiores a los 36 °C, sin ocasionar daños al transistor, y solo haciendo uso de un disipador. Para el desarrollo del dispositivo fueron empleadas las potencialidades y bondades de los softwares de simulación tales como Microwave Office (NI AWR v13). Este permite diseñar y simular las características de corriente directa, circuitos de acoplamiento de impedancia, estabilidad, así como facilidades para su optimización. Esta herramienta permite un ahorro de materiales, tiempo y permite además verificar los resultados esperados y validar los cálculos realizados.

Este documento describe el proceso de desarrollo y fabricación de el amplificador de potencia empleando un semiconductor de GaN para obtener 5W en el rango de frecuencia de banda L en clase A. Se muestra la metodología empleada para el diseño del amplificador, la cual es generalizada para el desarrollo de amplificadores de potencia. Apoyados en las ventajas (ver tabla 1) que evidencian los semiconductores de alta movilidad de electrones (HEMT). El artículo consta de cuatro secciones, la primera es la introducción y el estado del arte referente a la temática. La sección segunda contiene dos epígrafes en el cual se destacan las principales características físicas y de I-V del transistor así como su principal limitante y la solución dada. En la sección tercera se encuentran los procedimientos para el diseño del amplificador de potencia y sus resultados son discutidos en la cuarta sección.

2. TRANSISTORES DE ALTA MOVILIDAD ELECTRÓNICA DE GaN

Los transistores de nitrito de galio son crecidos sobre un sustrato de carburo de silicio (SiC) y zafiro (Al₂O₃), obteniéndose mejores resultados con SiC por tener mejor conductividad térmica. El contacto de sus compuertas se despliega sobre metalizaciones de platino (Pt) y oro (Au) [7]. Estos transistores son de efecto de campo (FET), de los cuales se identifican distintos tipos entre ellos los transistores de alta movilidad electrónica (HEMT). Simplificando su construcción, son dos materiales semiconductores de banda prohibida diferente (una estrecha y una ancha) denominada heterounión con una discontinuidad entre las dos regiones llamada 2DEG.

Tabla 1: Ventajas de los dispositivos de GaN

Necesidad	Características del GaN	Ventajas del GaN
Alta potencia por unidad de longitud de compuerta	Banda prohibida ancha	Dispositivos compactos, facilidad de acoplamiento
Alta linealidad	Topología HEMT	Óptima colocación de bandas
Alta frecuencia	Alta velocidad electrónica	Ancho de bando del orden de μm
Alta eficiencia	Altos voltajes de operación	Ahorro de potencia
Bajo ruido	Alta ganancia, alta velocidad	Alto rango dinámico
Altas temperaturas de operación	Gap ancho	Ahorro en sistemas de refrigeración
Buen manejo térmico	Substrato de SiC	Dispositivos de alta potencia con bajas pérdidas por disipación térmica

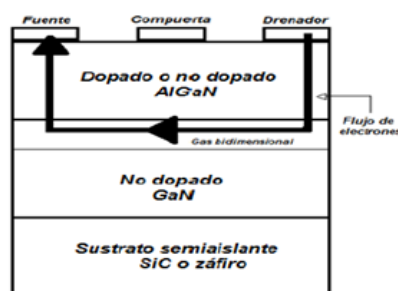


Figura 1: Esquema de estructura de un transistor.

Características I-V de los transistores

El comportamiento I-V de estos dispositivos puede separarse en dos regiones según el potencial que se aplique entre la fuente y el drenador (V_{ds}). Para valores pequeños se trabaja en la zona lineal o región óhmica, para grandes voltajes la corriente crece mucho más lento, hasta alcanzar el voltaje de ruptura donde el transistor deja de funcionar. Los parámetros característicos más importantes de estos dispositivos trabajando en régimen de DC son: corriente máxima de saturación (I_{max}), conductancia de salida (g_{ds}) y transconductancia (g_m); los cuales son convenientes que sean lo más grande posible [9]. El colapso de la corriente es atribuido al calentamiento del transistor debido a la elevada disipación de potencia, la cual degrada la velocidad de saturación de los electrones y por ende reduce la corriente. A este efecto se le llama auto-calentamiento, el cual tiene un impacto significativo sobre el rendimiento del dispositivo operando a bajas frecuencias.

Para el caso de los transistores de nitrato de galio la polarización tiene detalles y especificidades con respecto al resto de los transistores. La polarización de la compuerta (gate) de estos transistores se realiza con voltajes negativos, al punto que con voltaje de 0V se llega a máxima conducción. Estos transistores llevan una secuencia de polarización, pues no se debe alimentar la unión drenador-fuente sin haber puesto el voltaje negativo en la compuerta; por tanto, primero se da voltajes negativos a la compuerta y luego se alimenta la unión drenador-fuente con voltajes permisibles para el transistor según expresen las hojas de datos de estos semiconductores [3] [10].

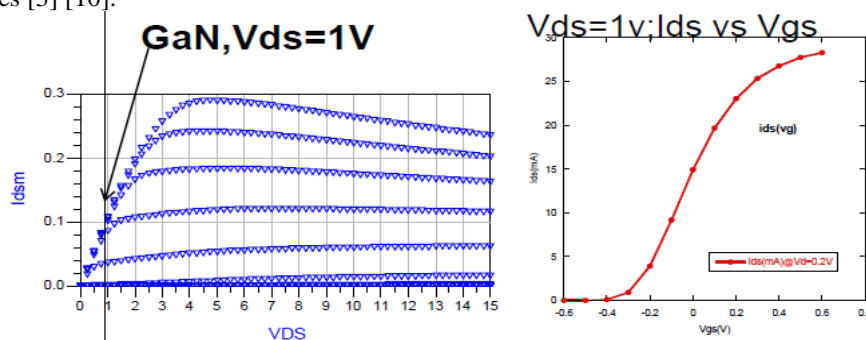


Figura 2: Curvas de DC características de los transistores de GaN.

Polarización secuencial de los transistores de GaN

La tecnología de transistores de electrones de alta movilidad (HEMT) es actualmente el área de mayor perspectiva en los semiconductores de RF de potencia por las ventajas ante otras tecnologías. Entre sus requisitos básicos de empleo se encuentra la conexión secuencial de su polarización [3]; primero debe polarizarse la compuerta y después el drenador. Para retirar la polarización debe hacerse a la inversa. No cumplir con este principio conlleva a cortocircuitos o grandes sobrecargas de la fuente de alimentación. Esto es a consecuencia de las características de estos transistores donde la impedancia vista entre la compuerta y el drenador es elevada al contrario de la impedancia de la fuente al drenador. La polarización negativa de la compuerta provoca una variación de la impedancia entre la fuente y el drenador, desapareciendo la posibilidad de cortocircuito en el dispositivo. A continuación, proponemos una solución a este problema, que no es más que un circuito secuenciador capaz de polarizar este tipo de transistor, imponiendo la tensión negativa en la compuerta en primer orden y posteriormente, con el retardo recomendado por fabricantes, de $1.6\mu s$ aparece la tensión en el drenador. Para la desconexión se realiza de manera inversa, primero se quita el voltaje en el drenador y $100\mu s$ después se quita el voltaje en la compuerta [11].

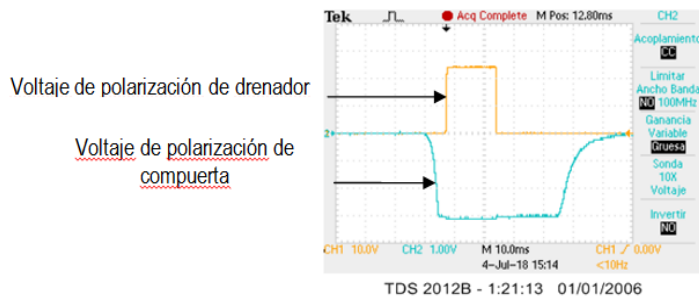


Figura 3: Mediciones de polarización secuencial de transistores GaN.

Debido a lo costoso de estos dispositivos se hace necesario protegerlos de un sobreconsumo de corriente, o por desbalance existente por desconexión de la carga a la salida del amplificador.

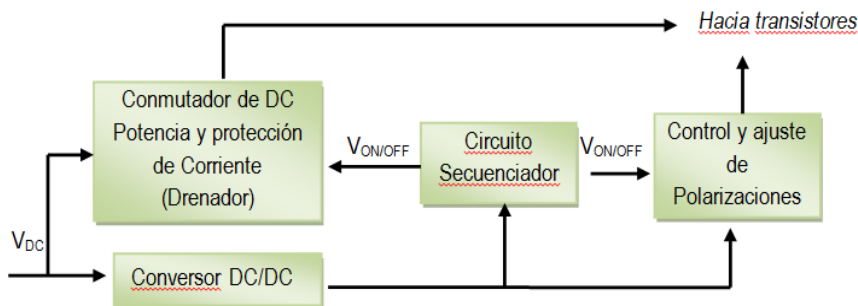


Figura 4: Diagrama en bloques de polarización secuencial de transistores de GaN y protección de amplificador

3. DISEÑO DE AMPLIFICADOR DE POTENCIA DE 5W

El transistor seleccionado fue el HEMT CGH40006P de GaN (firma CREE Inc), con un V_{ds} de 28 V y una corriente I_{ds} en saturación típica de 2,1 ampere. Su I_{dq} es de 75 mA con un voltaje de polarización en compuerta de $V_g = -2.6$ V. Este dispositivo tiene un rango de trabajo en frecuencia desde DC hasta 6 GHz, y fue empleado para trabajar en banda L.

Objetivos de diseño: lograr en toda la banda de frecuencia 5 W o más en clase A, optimizando la banda de trabajo con un comportamiento lineal y una ganancia de 13 dB, con eficiencia y estabilidad.

Procedimientos de diseño.

A partir de los siguientes pasos a seguir lograremos el diseño de un amplificador de potencia, para lo cual necesitamos del uso de un software de simulación de RF tal como NI AWR, u otro similar.

Paso 1: Análisis de las características de DC.

El primer paso a seguir es la verificación de las curvas I-V, y ver que se cumplan las características de DC correspondientes a la hoja de datos, así como encontrar el V_g para los 75 mA del punto de operación en que trabaja el transistor. Determinar el circuito de polarización para el transistor dadas las condiciones empleando AWR.

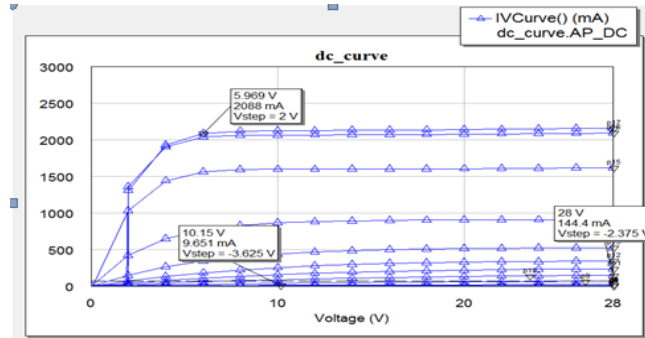


Figura 5: Curvas I-V del CGH40006P.

Paso 2: Impedancias de entrada, salida y resistencia de carga.

Pasado el análisis de DC del transistor se realiza una extracción de las impedancias de drenador y compuerta del transistor.

La resistencia de carga del transistor para la potencia deseada puede ser calculada como se muestra en (1)

$$R_l = \frac{(V_{ds} - V_{knee})^2}{2 * P_{sal}} \quad (1)$$

Una vez determinado la resistencia de carga de salida se determina las impedancias de salida necesarias para obtener máxima potencia. Para el software NI AWR la herramienta LTuner permite sintonizar las impedancias de salida y poder determinar las características de transformación de las redes de acoplamiento. El acoplamiento de impedancia de entrada se realiza buscando obtener mayores ganancias.

Con la ayuda de un programa desarrollado en MATLAB calculamos, para facilitar el diseño, la cantidad de transformadores de un cuarto de longitud de onda para llegar a la relación de transformación requerida teniendo en cuenta el ancho de banda y la ROE que se exige (NI AWR v13 tiene un utilitario que realiza esta función: “Component Synthesis”). Se tendrá en cuenta que, si dicha relación excede dos dígitos, entonces se necesitará realizar la transformación en dos pasos.

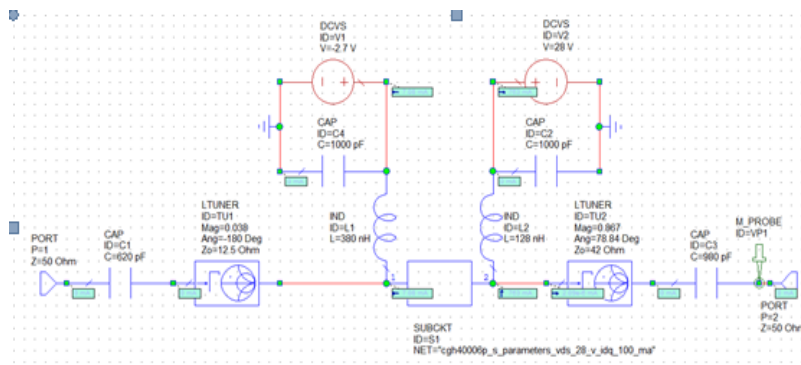


Figura 6: Circuitos con sintonizadores para determinar impedancias del transistor.

Los valores de impedancias necesarios para las redes de acoplamientos se realizan usando líneas de transmisión. La obtención de los niveles de potencia de salida en la banda de frecuencia de operación se puede realizar mediante sintonización manual o procedimientos de optimización, siendo empleados en la práctica la

combinación de ambos. (Ver Figura 6). Para las líneas de transmisión fueron determinadas sus dimensiones empleando las ecuaciones clásicas del cálculo de líneas de transmisión [3] y la herramienta “TxLine” de AWR.

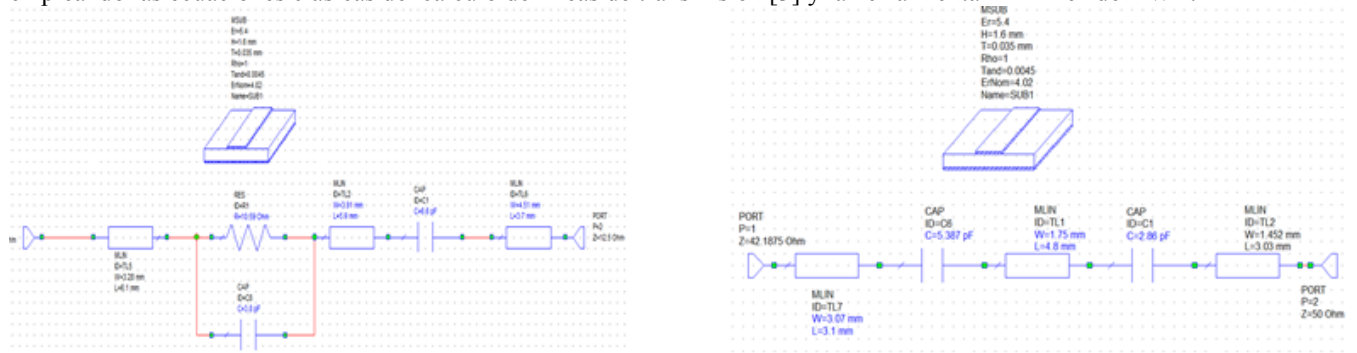


Figura 7: Redes de acoplamiento de entrada y salida.

Paso 3: Examinar estabilidad del circuito.

Existen diversos métodos y parámetros para determinar la estabilidad de un circuito. Hay que tener en cuenta que un circuito inestable no alcanza la máxima ganancia y puede llegar a destruir el componente activo. Lograr un sistema estable determina la robustez del mismo. Métodos empíricos muestran las siguientes ecuaciones para el cálculo de la estabilidad (2)-(4).

$$k = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2) / (2 * |S_{12} * S_{21}|) \quad (2)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (3)$$

$$B_1 = |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (4)$$

para los cuales si $K > 1$ y $B_1 > 0$ el sistema es incondicionalmente estable.

El software permite verificar la estabilidad del sistema mediante la Carta de Smith. Para el caso en que el circuito es inestable se emplean técnicas de estabilización (ver figura 7). Dada la región de la Carta de Smith en la que los círculos de estabilidad la interceptan determinan las características del circuito, y por tanto podemos añadir al sistema una combinación de resistencias y capacitores en serie o un paralelo.

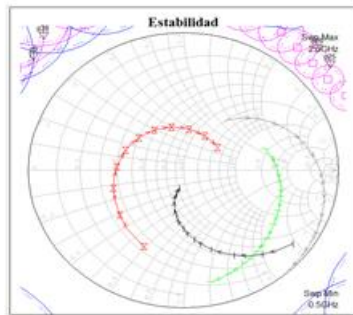


Figura 8: Círculos de estabilidad para sistema incondicionalmente estable.

Paso 4: Diseño del circuito de amplificador de potencia

Se garantiza la estabilidad del sistema y se reajusta la red de acoplamiento de entrada con mínima degradación de la ganancia (Ver Figura 8). Verificar los resultados obtenidos en cuanto a parámetros S, potencia, y linealidad para proceder a su construcción luego de haber realizado los últimos ajustes. Calcular con los datos obtenidos la eficiencia para tener elementos comparativos con los resultados reales.

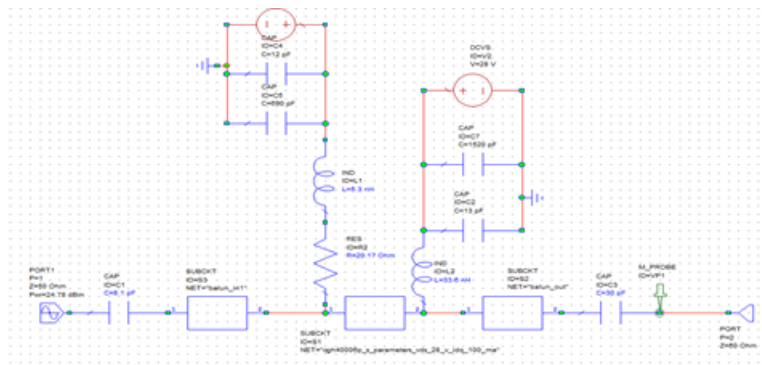


Figura 9: Diseño final de circuitos simulados y diseñados.

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

El amplificador diseñado fue simulado en el software MICROWAVE OFFICE V13 con el empleo de parámetros de dispersión ofrecidos por el fabricante, donde fueron optimizados: potencia de salida y linealidad. Los resultados obtenidos por la modelación del dispositivo están en correspondencia con lo esperado. Para el caso de las redes de acoplamiento lo que se requiere es que las pérdidas por inserción sean pequeñas y la característica transferencial del amplificador (ganancia) sea grande. Esto se evidencia con los parámetros S21 mostrados en la Figura 10.

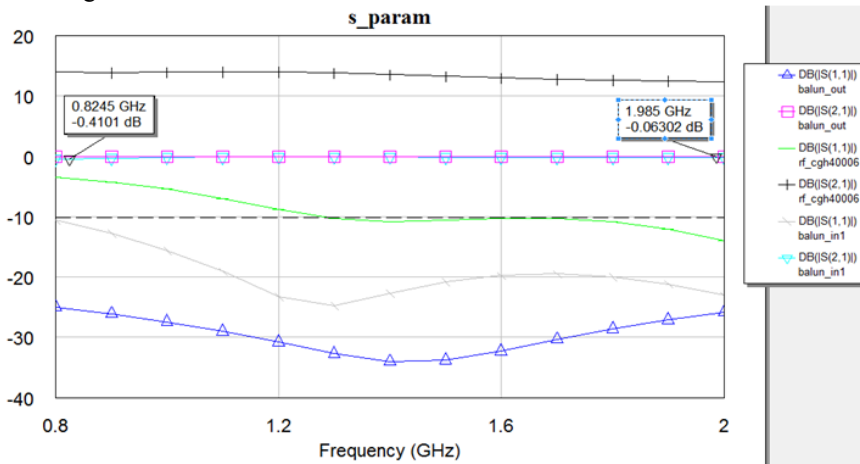


Figura 10: Parámetros distribuidos de las redes de acoplamiento de entrada y salida y del amplificador

La medición de la potencia de salida esperada no posee muchas variaciones lo cual es ideal para que nuestro sistema sea lineal. La potencia de salida posee una variación de menos de 1dBm en toda la frecuencia para así garantizar la linealidad del amplificador (ver figura 11).

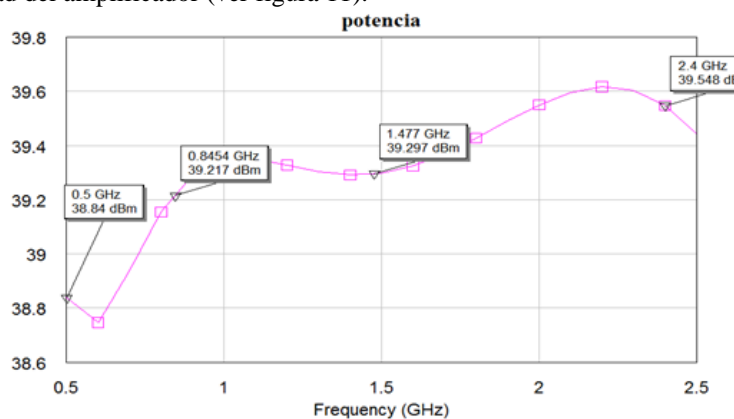


Figura 11: Potencia de salida de amplificador con CGH40006.

Resultados practicos y mediciones.

Se realizaron dos experimentos con la finalidad de demostrar y dar por cumplidos cada uno de los objetivos propuestos. Uno para mostrar la linealidad del amplificador construido y otro para obtener la máxima potencia a la salida. Se emplearon el generador Advantest TR4515 y el analizador de espectro Agilent 8594E.

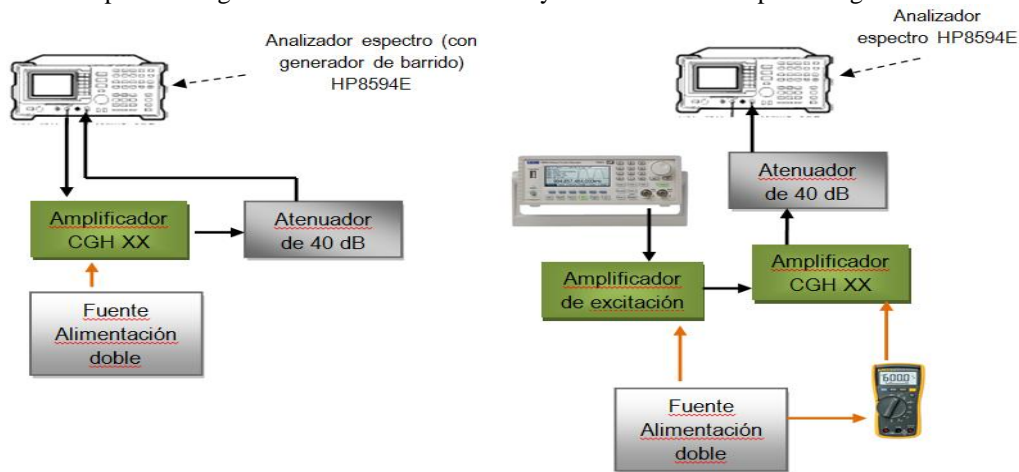


Figura 12: Set de mediciones del amplificador.

La eficiencia medida del amplificador según fórmula (5) fue de 40% (valor promediado), siendo este resultado favorable en la disipación de calor.

$$\eta = \left(P_{RF} / P_{DC} \right) * 100 \tag{5}$$

Las mediciones fueron tomadas y procesadas mediante MATLAB, arrojando los resultados esperados según la simulación y el diseño.

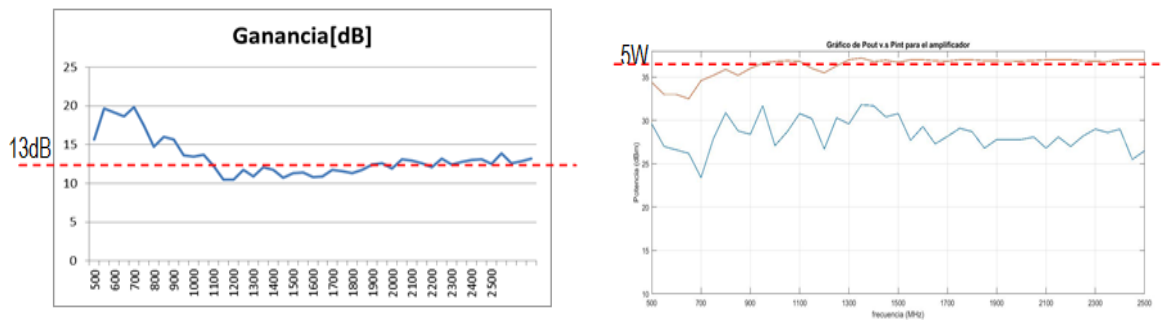


Figura 13: Gráficos de ganancia y potencia contra frecuencia.

Como parte de los resultados de este trabajo se llegó al desarrollo o construcción de este amplificador (ver figura 14), el cual presente requisitos de diseño muy específicos debido a la complejidad que presenta esta banda de frecuencia en la que se trabajó.

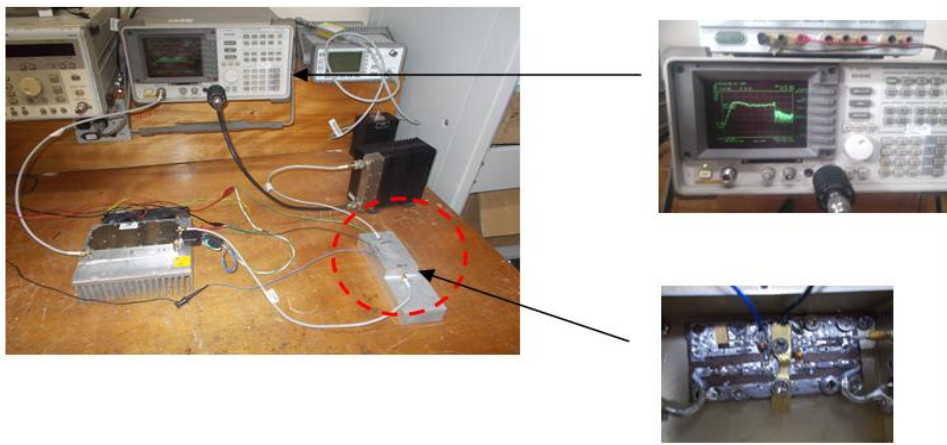


Figura 14: Amplificador de potencia de 5W desarrollado.

Otro de los resultados de este trabajo fue el diseño de un sistema que permitiera la correcta polarización del amplificador de potencia y las protecciones pertinentes (ver figura 15). Este sistema se puede apreciar que es útil para cualquier amplificador de potencia con estos requerimientos de polarización y brinda la posibilidad de manejar más de un amplificador de potencia. Las mediciones de este sistema se pueden ver en la figura 3.

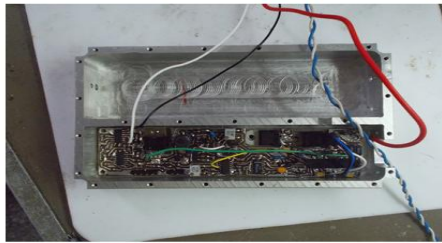


Figura 15: Circuito secuenciador de polarización de transistores de GaN.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo, debido a lo actual que de la temática y las diversas aplicaciones de su empleo, presenta gran importancia. El empleo de esta tecnología genera transformaciones positivas para la industria del automovilismo y la aeronáutica. La banda de frecuencia sobre la que se trabaja provee diversos servicios de importancia como telefonía móvil, GPS, Wifi, Bluetooth, ... lo que le añade un valor agregado a esta investigación. Se realiza una propuesta factible para controlar y proteger los amplificadores de potencia ante sobrecarga o incorrecta polarización de los transistores. Además, se logró determinar y validar un procedimiento efectivo para el diseño de amplificadores de potencia de alta eficiencia, lo cual favorece en la disipación térmica, y linealidad en un gran ancho de banda.

REFERENCIAS

1. **Moreno Rubio Jorge Julián, Salamanca Juan Mauricio.** “Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN”, Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 16 N° 1, pp. (21-25), 2016.
2. **Abdullah Eroglu,** “Introduction to RF Power Amplifier Design and Simulation”, CRC Press Taylor & Francis Group.
3. **Umesh K. Mishra,** “GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers”, Proceedings of the IEEE.
4. **Ivan Boshnakov, Anna Wood, Simon Taylor,** “RF and microwave solid-state power amplifiers design requires specialised engineering”, Amplifier Technology Ltd. Microwave Engineering Europe, Agosto 2012.

5. **Luo Peng, Bengtsson Olof, Rudolph Matthias.** “*A Drain Lag Model for GaN HEMT based on Chalmers Model and Pulsed S-Parameter Measurements*”, Ulrich L. Rohde Chair of RF and Microwave Techniques, Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus, Germany. IEEE 2017.
6. **Tianhao Li, Wenjun Li, and Jun Liu.** “*An improved large signal model of InP HEMTs*”, Key Laboratory for RF Circuits and Systems of Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310037, China. Journal of Semiconductors Vol. 39, No. 5, May 2018.
7. **Shashwat.** “*Wide bandgap HEMT Device (GaN) Characterization and Modeling for High Power Amplifier Design.*”, Indraprastha Institute of Information Technology New Delhi. June 11, 2016.
8. **Zhang Hao.** “*Physics Based Virtual Source Compact Model of Gallium-Nitride High Electron Mobility Transistors*”, Waterloo, Ontario, Canada, 2017.
9. **Angelov Ilcho, Rorsman Niklas, Stenarson Jörgen, Garcia Mikael, Zirath Herbert.** “*An empirical table-based FET model*”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 47, NO. 12, DECEMBER 1999.
10. **Freescale Semiconductor.** “*Gallium Nitride RF Technology Advances and Applications*”.
11. **Umesh K. Mishra,** “*GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers*”, Proceedings of the IEEE.

SOBRE LOS AUTORES

Pedro Luis Hernández Portilla

Graduado de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Tecnológica de La Habana en el año 2017. Especialista de III categoría del Departamento de Radio y Antena del CIDP “Grito de Baire”. Autor de la publicación en el VIII Taller de Lucha Radioelectrónica “Diseño, simulación y construcción de amplificadores de potencia en banda L”.

Enrique Romero Mustelier

Ingeniero Radioelectrónico, Investigador agregado del Departamento de Radio y Antena del CIDP “Grito de Baire”. Profesor instructor adjunto de la Universidad Tecnológica de la Habana. Autor de la publicación en el VIII Taller de Lucha Radioelectrónica “Control de potencia y protección de amplificadores en banda L”.

Yosvany Gonzalez Mandado

Ingeniero Radioelectrónico, Master en Ciencias Electrónicas, Investigador Auxiliar del Departamento de Radio y Antena del CIDP “Grito de Baire”. Coautor de las publicaciones en el VIII Taller de Lucha Radioelectrónica “Diseño, simulación y construcción de amplificadores de potencia en banda L” y “Control de potencia y protección de amplificadores en banda L”.