

Capítulo 1: Introducción al proyecto

1.1. Motivación y justificación del proyecto

El desarrollo actual de las comunicaciones móviles está condicionado por la capacidad y velocidad de los canales de transmisión, lo que supone formatos de modulación de señal cada vez más complejos que permitan un aprovechamiento óptimo del espectro. De esta manera, un aspecto fundamental a tener en cuenta en los futuros sistemas de comunicaciones móviles está relacionado con la eficiencia espectral de las aplicaciones. Siendo esta eficiencia espectral un requisito que anteriormente constituía un problema, pero la tecnología que hasta hace poco limitaba el aprovechamiento del espectro en los servicios ubicados en la banda de microondas está dejando de ser un obstáculo, permitiendo ya estándares y formatos de modulación capaces de aprovechar eficientemente todo el ancho de banda reservado a un servicio.

Otro aspecto fundamental de las comunicaciones móviles, viene dado cuando se emplean formatos complejos de modulación, los extremos transmisor y receptor deben tener una buena respuesta, no sólo en términos de ganancia y capacidad de manejar potencia (que garantice el alcance de las estaciones base) o de alcanzar una elevada eficiencia (que proporcionen autonomía útil en equipos portátiles), sino que han de tener una respuesta con bajos niveles de distorsión no-lineal. Los fenómenos no-lineales asociados esencialmente a los elementos activos de las etapas de amplificación dan lugar a deformaciones del espectro (recrecimiento espectral) que puede provocar, además de un aumento de la tasa de error, problemas de interferencia, y en definitiva, limitaciones en la capacidad del canal.

Los objetivos de máxima eficiencia y mínima distorsión no-lineal suelen ser, en principio, contrapuestos. Las técnicas clásicas de diseño de amplificadores de potencia (PA) de alta eficiencia pasan por la utilización de condiciones de trabajo altamente no-lineales (Clases C, D, E). Las condiciones de trabajo esencialmente lineales (Clases A, AB) no suelen alcanzar niveles de eficiencia muy elevados. Surge así como uno de los objetivos más perseguidos en la actual ingeniería de circuitos de microondas la de la optimización de la linealidad en los amplificadores pagando un mínimo precio en términos de potencia y eficiencia [1.1], [1.2]. Este compromiso se verá más de una vez a lo largo de este proyecto.

La minimización de la distorsión no lineal en etapas amplificadoras no es un tema nuevo en el diseño de circuitos y puede enfocarse de múltiples formas, tal y como se puede encontrar en la bibliografía [1.1], [1.2]. Su desarrollo ha estado fuertemente condicionado por las disponibilidades técnicas del momento. Por ello, en la actualidad, cabe destacar dos líneas fundamentales de trabajo:

1. **Técnicas de predistorsión:** Más específicamente predistorsión digital en banda base, técnicas que se recogen en la bibliografía [1.3]-[1.8], donde se resaltan problemas como las exigencias de memoria para modulaciones multinivel, las limitaciones de convergencia, o la invertibilidad de un sistema descrito por un modelo de Volterra. No es objetivo de este proyecto profundizar en estas variantes.
2. **Técnicas basadas en el dispositivo activo.** Desde que se dispuso de sistemas de medida de dispositivos activos de alta frecuencia funcionando en régimen no-lineal [1.9]-[1.11] que permiten una caracterización completa del dispositivo, se ha podido emplear esta información para optimizar las técnicas de diseño de circuitos que buscan el mínimo nivel de distorsión no lineal sin comprometer el objetivo de eficiencia de la etapa de amplificación. En [1.12]-[1.17] pueden encontrarse estudios detallados de cómo los productos de intermodulación de tercer orden generados por la no-linealidad del dispositivo son fundamentales a la hora de evaluar la distorsión. La búsqueda de puntos de trabajo en los que estos productos alcanzan niveles mínimos (conocidos como *sweet-spots*) permiten diseñar amplificadores con figuras de linealidad equivalentes a las de un amplificador funcionando en Clase AB pero con eficiencias mucho mayores (del orden del 60-70 %). Es bien conocido, del análisis de Volterra, que si se desea modelar con fidelidad el comportamiento de los productos de intermodulación que caen dentro de la banda de interés es preciso contar con una descripción precisa de las derivadas de tercer y quinto orden de las funciones de carga y corriente del dispositivo. Además de esto, si se desea analizar el dispositivo en gran señal sin las restricciones que impone el análisis de Volterra, es necesario contar con modelos de gran señal que

puedan analizarse con otras herramientas como el balance armónico [1.12], [1.18].

La irrupción en la tecnología de microondas de dispositivos de media y alta potencia como los FET de AlGa_N/Ga_N, LDMOS o los de SiC requieren de modelos específicos para ellos, dado que los modelos convencionales no producen resultados satisfactorios. Por ello, se trabaja en la actualidad en la mejora de las técnicas de simulación para estos dispositivos [1.19], [1.20]. Dispositivos a los que soluciones basadas en las características de las antenas [1.21],[1.22], o la utilización de amplificadores de alta frecuencia controlados por la tensión de drenador [1.23], le abren perspectivas muy amplias para poder asegurar una transmisión eficiente a la vez que lineal. Nuestro proyecto versará sobre una de estas tecnologías, el GaN.

1.2. Objetivos

Resumiendo todo lo anterior, podemos decir que el objetivo principal de este proyecto es el diseño de un amplificador de potencia a partir de un transistor HEMT de GaN. En todo este proceso, podemos discernir unos objetivos más específicos o hitos, que nos guiarán a lo largo de todo este estudio.

- ✓ Diseño y simulación de un amplificador de microondas en pequeña señal, basado en el transistor bajo estudio, mediante la herramienta ADS.
- ✓ Diseño y simulación de un amplificador de potencia de microondas, basado en el transistor bajo estudio, mediante la herramienta ADS.

- ✓ Montaje en laboratorio del amplificador de potencia estudiado en el hito anterior, y obtención de resultados experimentales. Y posterior comparación de los resultados del amplificador de potencia obtenidos mediante simulación y mediante las medidas de laboratorio. Este punto es un objetivo adicional a lo inicialmente predispuesto en el proyecto.

1.3. Estructura de la memoria del proyecto

Una vez analizados los objetivos propuestos por este proyecto, describiremos la forma en la que se ha estructurado esta memoria de acuerdo a estos objetivos.

En el segundo capítulo de esta memoria hablaremos del estado del arte actual en la tecnología que nos ocupa, el GaN. Los dispositivos de potencia en RF basados en GaN han hecho progresos sustanciales en la última década. En este capítulo intentamos hacer una revisión de los últimos desarrollos en tecnologías HEMT GaN, incluyendo crecimiento del material, tecnologías de procesado, estructuras epitaxiales y diseños MMIC para ilustrar el estado del arte de las tecnologías de microondas y ondas milimétricas. Los desafíos en la fiabilidad y fabricación también serán discutidos.

El tercer capítulo lo destinaremos al diseño de amplificadores. Con este fin, haremos un repaso a la teoría existente en el diseño de amplificadores, pasando primero por el diseño de amplificadores de microondas, y llegando posteriormente al diseño de amplificadores de potencia, viendo los ejemplos de diseño de un amplificador Clase A y de un amplificador Clase B.

En el cuarto capítulo, una vez vista la teoría referente al diseño de amplificadores, se centrará ya de lleno en la realización propia de diseños de amplificadores, utilizando como herramienta el software de diseño ADS. Se comenzará, como se hizo en teoría, con el diseño de un amplificador de microondas a través de varias fases. Y luego se pasará al diseño de amplificadores de potencia, concretamente de un Clase A y de un Clase B.

En el quinto capítulo, y tras haber hecho diseños a nivel de simulación, se verán los resultados obtenidos. Para ello, presentaremos primero el montaje experimental con el instrumental utilizado. Y posteriormente se presentarán los resultados obtenidos a través de la simulación, y a través de la toma de medidas del montaje mencionado. Finalmente se discutirán los resultados obtenidos.

Por último, el sexto capítulo está dedicado a las conclusiones. En este capítulo recordaremos los objetivos que nos propusimos al principio del proyecto, el desarrollo que se ha hecho a partir de ellos, los resultados a los que hemos llegado finalmente, y hasta qué grado estos resultados cumplen con los objetivos inicialmente propuestos.

1.4. Bibliografía

- [1.1] P. B. Kenington, “High-linearity RF Amplifier Design”, *Artech–House*, Norwood, England, 2000.
- [1.2] S.C. Cripps, “Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design”, *Artech–House*, Norwood, England, 2002.

- [1.3] H. Ku and J. S. Kenney, “Behavioral Modeling of Nonlinear RF Power Amplifiers Considering Memory Effects,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 51, No. 12, pp. 2495-2504, Dec. 2003.
- [1.4] F. Filicori and G. Vannini, “Mathematical Approach to Large-Signal Modeling of Electron Devices”, *Electronics Letters*, Vol. 27, No. 4, pp. 357-359, 1991.
- [1.5] A. Zhu, J. C. Pedro and T. J. Brazil, “Dynamic Deviation Reduction Based Volterra Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 12, pp. 4323-4332, Dec. 2006.
- [1.6] C. Crespo, J. Reina and M. J. Madero, “Volterra Based Behavioral Model for Wideband RF Amplifiers”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, No. 3, pp. 449-457, Mar. 2007.
- [1.7] J. Kim and K. Konstantinou, “Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory”, *Electronics Letters*, vol. 37, no. 23, pp. 1417–1418, Nov. 2001.
- [1.8] L. Ding, G. T. Zhou, D. R. Morgan, Z. Ma, J. S. Kenney, J. Kim, and C. R. Giardina, “A Robust Digital Baseband Predistorter Constructed Using Memory Polynomials,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 52, No. 1, Jan. 2004.

- [1.9] D. Barrataud et al., “Measurement and Control of Current/Voltage Waveforms of Microwave Transistors Using a Harmonic Load–Pull System for the Optimum Design of High Efficiency Power Amplifiers”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 9, pp. 835-842, Aug. 1999.
- [1.10] T. M. Martín-Guerrero, J. D. Baños-Polglase, C. Camacho-Peñalosa, M. Fernandez-Barciela, D. Morgan, P.J., “Frequency domain-based approach for nonlinear quasi-static FET model extraction from large-signal waveform measurements”, *European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC06)*, 10-13 Sep. 2006, Manchester (United Kingdom).
- [1.11] T. M. Martín-Guerrero, Janie D. Baños-Polglase, Carlos Camacho-Peñalosa, “Frequency domain-based extraction method of quasi-static nonlinear state functions from large-signal microwave measurements”, *International Journal on Microwave and Optical Technologies*, Vol.1, No. 1, pp. 90-99, June 2006.
- [1.12] N. B. Carvalho and J. C. Pedro, “Large- and small-signal IMD behaviour of microwave power amplifiers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, pp. 2364–74, Dec. 1999.
- [1.13] C. Fager, J.C. Pedro, N.B. Carvalho, H. Zirath, “Prediction of IMD in LDMOS transistor amplifiers using a new large-signal model,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, No. 12, pp. 2834-2842, Dec. 2002.
- [1.14] J.A. Garcia, E. Malaver, L. Cabria, C. Gómez, A. Mediavilla, A. Tazón, “Device-level intermodulation distortion control on III-V FET’s”, *Proc. 11th GaAs Symposium*, pp. 77-79, Munich, Oct. 2003.

- [1.15] P. M. Cabral, J. C. Pedro N. B. Carvalho, “An Integrated View of Nonlinear Distortion Phenomena in Various Power Amplifier Technologies,” *Proc. 33rd European Microwave Conference*, Munich, Oct. 2003, pp. 69-73.
- [1.16] P.M. Cabral, J.C. Pedro, N.B. Carvalho, “Nonlinear device model of microwave power GaN HEMTs for high power-amplifier design”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, No. 11, pp. 2585-2592, Nov. 2004.
- [1.17] N. Borges, J.A. García, E. Azpitarte, J.C. Pedro, “Load-impedance selection for maximized large-signal IMD sweet-spot effects”, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 434-440, Sep. 2005.
- [1.18] C. Crespo-Cadenas, J. Reina-Tosina, M.J. Madero-Ayora, “Evaluation of ACPR in mixer based on parametric harmonic-Balance approach”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 1, pp. 445-450, January 2006.
- [1.19] G. Crupi, D. Xiao, D. Schreurs, E. Limiti, A. Caddemi, W. De Raedt, M. Germain, “Accurate Multibias Equivalent-Circuit Extraction for GaN HEMTs”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 10, pp. 3616-3622, October 2006.
- [1.20] T.M. Martin Guerrero, F. Y. Ng Molina, C. Camacho Peñalosa, J.A. García, A. Mediavilla, R. Aubry, C. Gaquiere, “Extracción y validación de un modelo no-lineal para un dispositivo HEMT de GaN”, remitido al XXI Symposium Nacional de la URSI, Tenerife, Septiembre 2007.

- [1.21] J. A. García, A. Mediavilla, L. Cabria, F. R. Marante, “Device-level Amplifier Linearization Techniques integrating Printed Antennas for Spatial IMD Control,” *WS5 Circuit Level Linearization Techniques*, 36th European Microwave Conference, Manchester, Sept. 2006.
- [1.22] 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 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 11, pp. 3848-3856, Nov. 2006.
- [1.23] C. Devlin, T. Brazil, G. Magerl, “TARGET Network: Microwave power amplifiers”, *IEEE Microwave Magazine*, pp. 34-47, April 2006.