

SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE LOS COEFICIENTES MÁS ÓPTIMOS PARA UN MODELO NO LINEAL DE UN RF-PA

EXTRACTION SYSTEM OF THE MOST OPTIMAL COEFFICIENTS FOR A RF-PA NON-LINEAR MODEL

Yasmany J. Martínez Reyes

TecNM / Instituto Tecnológico de Tijuana, México
yasmany.martinez18@tectijuana.edu.mx

J. R. Cárdenas Valdez

TecNM / Instituto Tecnológico de Tijuana, México
jose.cardenas@tectijuana.edu.mx

J. C. Núñez Pérez

Instituto Politécnico Nacional, México
nunez@citedi.mx

José Alejandro Galaviz Aguilar

Tecnológico de Monterrey, México
jalex39@hotmail.com

Everardo Inzunza González

Universidad Autónoma de Baja California, México
einzunza@uabc.com.mx

Manuel de J. García Ortega

TecNM / Instituto Tecnológico de Tijuana, México
manuel.garcia@tectijuana.mx

Recepción: 17/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema para el modelado de comportamiento de amplificadores de potencia a partir de la extracción de coeficientes basado en los kernels pares, impares y todos de un modelo polinomial con memoria, el sistema toma en cuenta los órdenes de no linealidad y nivel de memoria de corto término del dispositivo. Se implementó en una tarjeta FPGA Cyclone V para un proceso de modelado no lineal basado en banda simple previo a un proceso de predistorsión digital. Además, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario que automatiza el proceso de extracción de coeficientes y modelado a partir de los kernels óptimos del modelo polinomial con memoria en base a la métrica NMSE como criterio para

determinar la precisión del modelo que se desea calcular a partir de juego de datos de entrada-salida de un amplificador de potencia. Lo anterior se realiza una como alternativa viable de modelado para una etapa posterior de predistorsión digital como medio de reducir el efecto no deseado de recrecimiento espectral e invasión de bandas adyacentes. En este caso se presenta la opción óptima de modelado para un RF-PA de 10 W, donde la mejor precisión obtenida es de -53.48 dB NMSE superando sistemas de modelado reportados en el estado del arte.

Palabras Claves: FPGA, Kernels, modelo polinomial con memoria, modelado no lineal, RF-PA.

Abstract

In this work a system is developed for the behavior modeling of power amplifiers from the extraction of coefficients based on the odd, even and all kernels of a polynomial model with memory, the system takes into account the orders of non-linearity and short term memory level of the device. It was implemented on a Cyclone V FPGA card for a non-linear modeling process based on single band prior to a digital predistortion process. In addition, a graphical user interface was developed that automate the process of extraction of coefficients and modeling from the optimal kernels of the polynomial model with memory based on the NMSE metric as a criterion to determine the precision of the model to be calculated at starting from input-output data set of a power amplifier. The above is done as a viable modeling alternative for a further stage of digital predistortion as a means of reducing the unwanted effect of spectral regrowth and invasion of adjacent bands. In this case, the optimal modeling option for a 10 W RF-PA is presented, where the best precision obtained for the model found is -53.48 dB NMSE exceeding modeling systems reported in the state of the art.

Keywords: FPGA, kernels, Memory Polinomial Model, non-linear modelling, RF-PA.

1. Introducción

Los sistemas de información y telecomunicaciones modernos con su acelerado desarrollo se han vuelto imprescindibles en la vida diaria, esto deriva en la

necesidad de comunicación entre las personas sin importar distancias entre locaciones geográficas. Para lo anterior es preciso que estos sistemas tengan mayor ancho de banda y mayor eficiencia tanto espectral como energética, esta condición conduce al desarrollo de nuevas tecnologías de modulación digital mucho más eficientes.

Resulta cada vez mayor el reto para los organismos reguladores de las telecomunicaciones de cada país tener sistemas que garanticen la transmisión de datos, en este sentido los sistemas inalámbricos juegan un papel cada vez más preponderante. Tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi o sistemas de redes móviles como: Sistema global para las comunicaciones móviles (GSM), Sistema universal de telecomunicaciones móviles (UMTS), el estándar LTE (acrónimo de Long Term Evolution), o variantes más recientes como ZigBee, Bluetooth y 6LowPAN usadas en Internet de las Cosas (IoT) están soportadas sobre sistemas inalámbricos [Valente, 2017].

El elemento fundamental en la cadena de transmisión de los sistemas inalámbricos es sin dudas el amplificador de potencia (PA) de radio frecuencia (RF). Es además el dispositivo que induce la mayoría de las no linealidades, efectos de memoria y es a la vez el mayor consumidor de potencia. El modelado de comportamiento del RF-PAs es un tema ampliamente estudiado durante las últimas dos décadas, existen diversas técnicas de linealización propuestas en la literatura para lidiar con el conocido compromiso entre linealidad y eficiencia del PA, lo que da pautas a los investigadores para proponer diversas técnicas de extracción de coeficientes con el fin de obtener métodos precisos de modelado [Yuan, 2013], [Cárdenas, 2015], [Núñez, 2017]. La obtención de un correcto modelo matemático que describa el comportamiento del RF-PA es el primer paso en el proceso de linealización, y la técnica de predistorsión digital (DPD) es la técnica más efectiva desde la década de los 90s [Lin, 2015], [Allende, 2018], [Allende, 2016], [Wood, 2005]. Existen trabajos importantes relacionados a modelado basado en el modelo polinomial con memoria (MPM) para RF-PAs con implementaciones en información del tipo LTE donde involucran la reducción de coeficientes [Hammi, 2016], [Abdelrahman, 2016], así como multiplexaciones digitales del tipo WCDMA [Khalifa, 2015], en este contexto

se propone un sistema de extracción de coeficientes y se exploran tres vertientes de los kernels de Volterra, donde se estima el menor error de precisión basado en términos pares, impares y todos.

Para llevar a cabo la corrección de la transmisión de datos a través del proceso de linealización, es necesario tener modelos matemáticos que representen plenamente las no linealidades del RF-PA, y estas están representadas por las curvas de conversión de amplitud AM/AM y fase AM/PM. Estas medidas modelan la amplitud y la fase de la señal fundamental con el incremento de la amplitud de entrada. El problema de usar estas conversiones de amplitud como recurso para estimar el grado de no linealidad es que miden en la banda fundamental, de manera que, si los efectos no lineales en dicha banda fundamental son pequeños las medidas AM/AM y AM/PM son sensibles a errores.

2. Métodos

El modelado de comportamiento basado en las Series de Volterra es un modelo general no lineal con memoria y constituye una herramienta matemática para caracterizar amplificadores de potencia entre otras aplicaciones, aunque son una herramienta precisa requiere de una gran cantidad de coeficientes para modelar un sistema [Núñez, 2013].

Una serie de Volterra es la combinación de una convolución lineal y una serie de potencias no lineal que se utiliza para describir la relación de entrada - salida de un sistema invariante en el tiempo causal no lineal con memoria desvaneciente. En el dominio de tiempo discreto, una serie de Volterra se define en la ecuación 1.

$$y(n) = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{i_1=0}^{\infty} \dots \sum_{i_p=1}^{\infty} h_p(i_1, \dots, i_p) \prod_{j=1}^p x(n - i_j) \quad (1)$$

Donde, $x(n)$ e $y(n)$ representan la entrada y la salida respectivamente, el término $h_p(i_1, \dots, i_p)$ se denomina kernel o núcleo de Volterra de orden p . Las series de Volterra se truncan de forma general hasta un orden finito no lineal P y una memoria finita M .

El MPM es un caso especial de las series de Volterra que no cuenta con todos los elementos de la serie original. Para modelar los efectos de memoria y no

linealidades en el PA es preciso realizar truncaciones con el fin de optimizar recursos de cálculo y tiempos de estimación. El MPM consiste en varias fases de retardo y solo contempla los términos diagonales de la serie de Volterra, esto trae consigo una reducción considerable en comparación con la serie original. El MPM y se formula en ecuación 2.

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^{k-1} \quad (2)$$

Donde x es la entrada, y salida, K orden de potencia máxima, M profundidad máxima de memoria y a_{km} núcleos o kernel (coeficientes) del sistema.

El MPM proporciona buen equilibrio entre exactitud y complejidad. El estado del arte reporta trabajos con implementación en hardware cuya precisión es alta para sistemas en banda simple [Cárdenas, 2015], [Núñez, 2017], [Lin, 2015]. En la figura 1 se observa una etapa sin memoria del MPM para un proceso de amplificación, donde sólo se consideran los órdenes de no linealidad del dispositivo bajo prueba, en este caso el sistema desarrollado involucra hasta un MPM de orden 11.

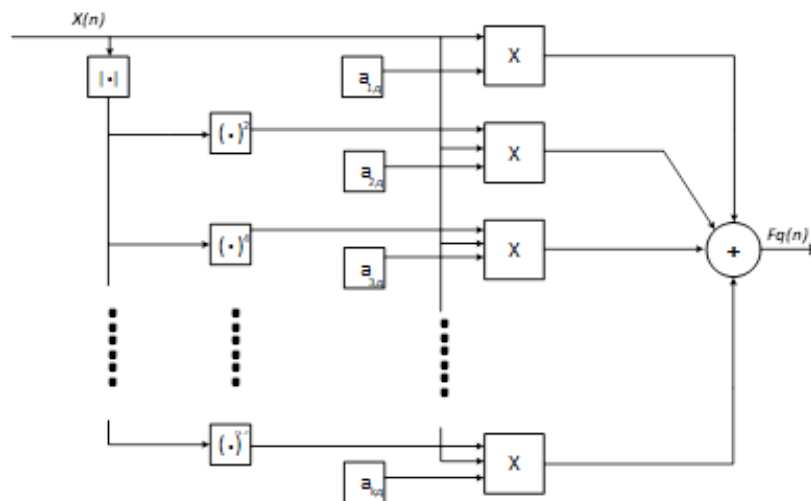


Figura 1 Etapa interna del MPM desarrollado implementado en Simulink.

En la figura 2 se muestra el sistema desarrollado para ambas curvas de distorsión del RF-PA de 10 W @2.34 GHz, el esquema está desarrollado en Simulink y en el caso que nos ocupa representa un modelo cuyo orden de no linealidad del polinomio

con memoria se eleva hasta 11 y con un nivel de memoria igual a 6. Estos valores, además de los relacionados a los coeficientes del modelo se emplearon para conformar el esquema de simulación en Simulink, fueron obtenidos a partir del método de estimación de mínimos cuadrados (LSE). Cabe indicar que esta representación del modelo realizado en Simulink se expanden para sistemas con representación polinomial de mayor no linealidad.

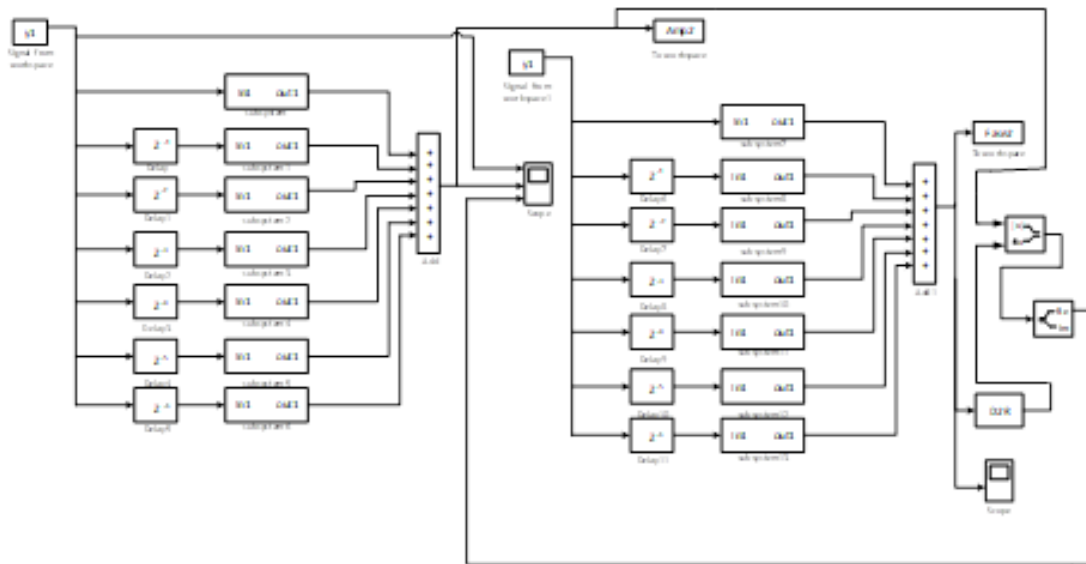


Figura 2 Sistema desarrollado en Simulink para efectos de memoria de hasta $m=6$ y no linealidad $n=11$.

En la figura 3 se muestran las curvas de distorsión AM/AM y AM/PM del dispositivo del RF-PA 10W NXP @2.34 GHz, como se aprecia contiene altos órdenes de no linealidad debido a la dispersión de los datos en un rango de voltaje tan corto.

El sistema desarrollado a través de la interfaz gráfica evalúa en base a la métrica dB NMSE la mejor de las opciones de modelado a partir de los datos de entrada y salida al RF-PA. En este trabajo se utiliza el MPM como proceso de modelado de comportamiento, este se basa en el método de extracción LSE para determinar los coeficientes del modelo a partir de datos de medición. Con esta idea se programa en Matlab un método que inicialmente calcula la matriz de retardo del sistema $H^{(m)}$ aplicando la ecuación 3, a partir de los datos de entrada. En el mismo método se calcula además la pseudo-inversa de $H^{(m)}$ y este resultado se multiplica por el

arreglo de datos que representa la salida del sistema para obtener la matriz de los coeficientes según ecuación 4.

$$h_{2K-1,q}^{(m)} = |x(n-q)|^{2(k-1)}x(n-q) \quad (3)$$

$$\hat{a}^{(m)} = [\hat{a}_0^{(m)} \dots \hat{a}_q^{(m)} \dots \hat{a}_Q^{(m)}] = H^{m-1} * Y \quad (4)$$

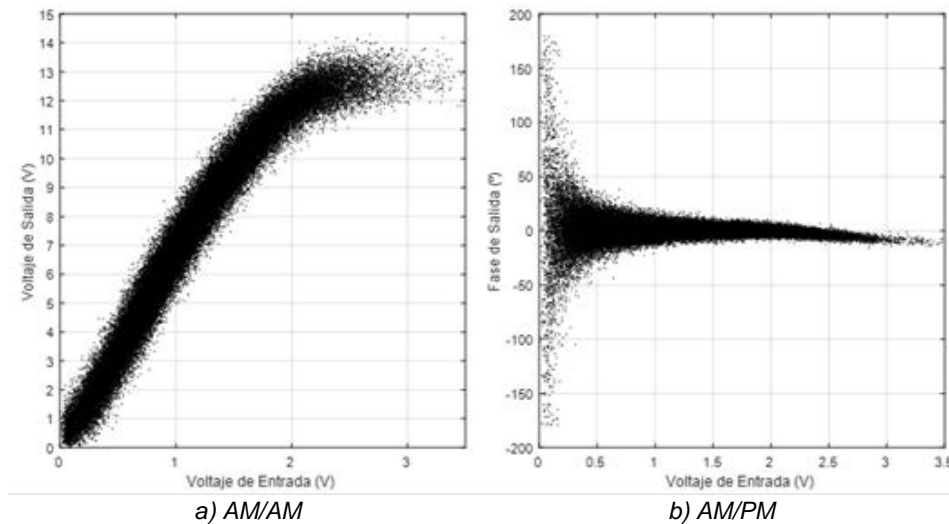


Figura 3 Curvas de distorsión del RF-PA 10W NXP @2.34 GHz.

El otro método programado es para el cálculo de la salida estimada del modelo a partir de la ecuación 5, empleando los resultados obtenidos en el método anterior.

$$Y = H^{(m)} * a^{(m)} \quad (5)$$

La interfaz gráfica propuesta en este trabajo se utiliza tanto de forma manual como automática, para el primero modo de operación debe insertarse orden de no linealidad y profundidad de memoria con que se desea modelar. El segundo modo de operación calcula el modelo óptimo de forma automática basado en el criterio del valor del error cuadrático medio normalizado NMSE (<-30 dB). Los métodos de cálculo programados incluyen las tres variantes de extracción de coeficientes (todos, pares e impares), además de la opción de visualización de cuál de estas configuraciones se empleó en el cálculo.

3. Resultados

En la figura 4 se muestra la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollado en Matlab para el control tanto de la etapa de modelado como de linealización donde se aprecia el rango de datos cubierto por un sistema MPM y un -53.48 dB NMSE, el programa desarrollado en C compara entre la extracción de kernels impares, pares y todos y determina el menor error logrado en una correlación lineal de datos de salida contra entrada. La GUI desarrollada carga los datos de entrada en formato *.mat y el proceso de modelado se define de forma manual o automática con exploración de los tres métodos de extracción de kernels como se mencionó anteriormente.

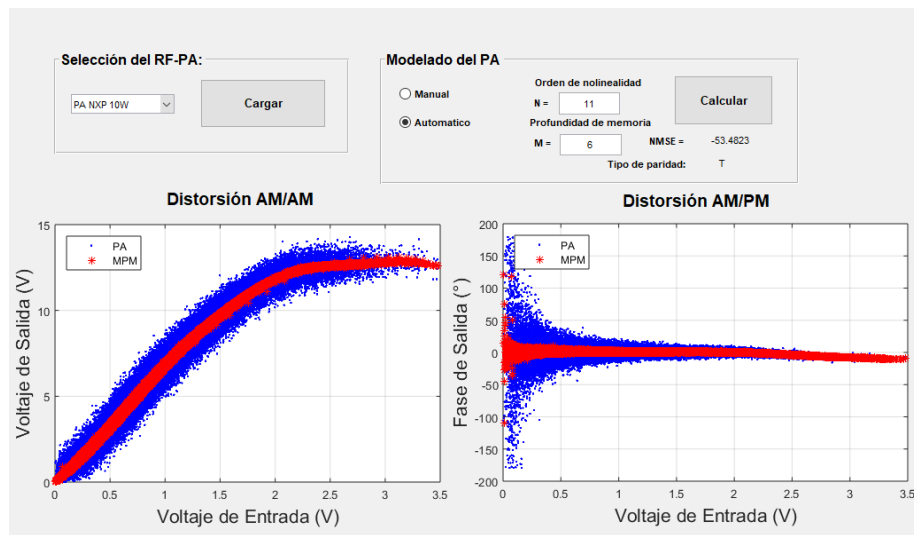


Figura 4 Sistema desarrollado en Simulink para efectos de memoria de hasta $m=6$ y no linealidad $n=11$.

En la figura 5 se muestra la implementación en la cual el sistema utiliza la resolución de 14 bits de la tarjeta de adquisición de datos, en este caso los convertidores digital-analógico (DAC) como puntos de salida, sin embargo, la señal de entrada se enlaza con un generador vía los convertidores analógico-digital (ADC), los datos de salida se almacenan en una tabla look-up (LUT) de 1024 direcciones.

En la figura 6 se muestra la cadena de implementación aunada a los sistemas desarrollados en Simulink, bajo este esquema los resultados se almacenan como un arreglo de datos en forma de LUT con una amplitud máxima de 2^{14} bits, es decir,

que tanto la entrada como la salida del amplificador bajo prueba en forma digital, las señales obtenidas se convierten a una relación de 0 a 16, 383 basado en la característica de la tarjeta de adquisición. En este sistema la señal modelada por el amplificador de potencia pasa por el DAC2 y la señal original por el DAC1 de la tarjeta HSMC.

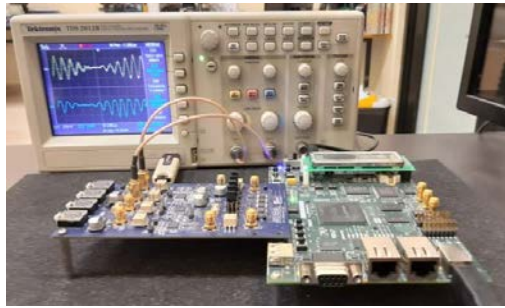


Figura 5 Implementación de hardware de la etapa de modelado para un amplificador de potencia de 10 W NXP @2.34 GHz.

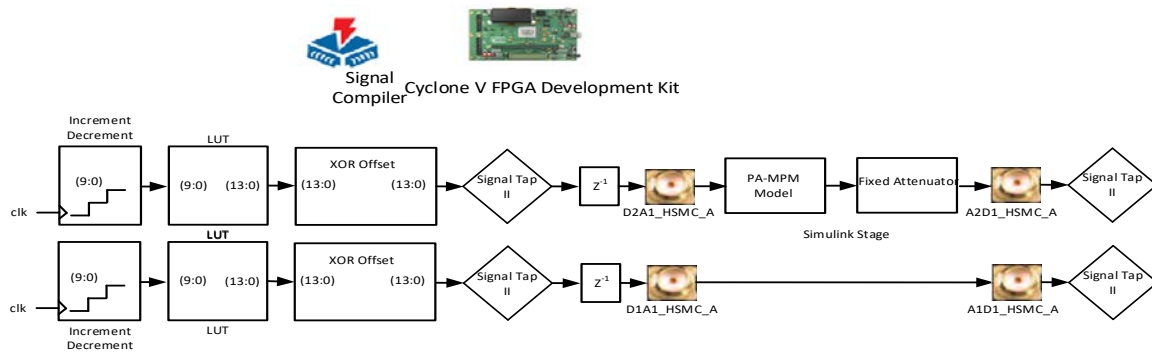


Figura 6 Cadena de emulación en hardware basado en la herramienta DSP Builder para la tarjeta de desarrollo FPGA.

La resolución de 14 bits basta para tener señales de salida con bastante claridad y se alcanzan los 500 kHz para el caso de la señal de entrada y se detectan frecuencias de hasta 17 MHz debido a los efectos de memoria inducidos en el proceso de simulación el sistema.

En el proceso de administración de los datos en la etapa de la entrada se manejaron 10 bits de resolución para la dirección, es decir, los datos se almacenaron en LUTs de 1024 datos por cada evento de simulación, cabe indicar que el sistema basado en la herramienta de diseño DSP Builder tiene una resolución de hasta 16384 datos.

En la figura 7 se muestra la implementación en el osciloscopio donde se logra una relación de 4.04 veces la señal de entrada del RF-PA bajo prueba donde se alcanza una frecuencia de 17.39 MHz en la señal de salida debido al alto orden de memoria introducido, la señal de entrada se establece a 506 KHz, el reloj de muestreo del dispositivo es de 125 MHz, por lo que no está comprometido el muestreo del sistema.

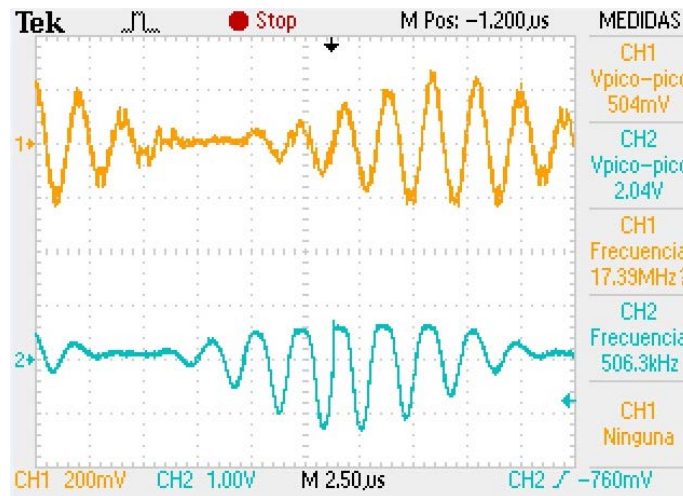


Figura 7 Vista del osciloscopio de la amplificación lograda en una relación de 4.04 veces la señal de entrada, potencia de 10 W NXP @2.54 GHz.

4. Discusión

En la tabla 1 se muestra la implementación desarrollada, se muestran el uso de recursos utilizados en dicho sistema, en este caso el FPGA de la tarjeta de desarrollo Cyclone de Altera, las 340 unidades lógicas utilizadas de las 56,480 representan menos del 1% de las disponibles en el sistema, este punto es crucial dado que se proyecta como trabajo futuro agregar un proceso de DPD adaptativa como proceso de corrección para diversos RF-PAs, otro punto importante es el análisis de bloques de memoria de 43,008 los que representan menos del 1% de la capacidad total de la tarjeta.

El sistema es adaptable para un proceso de DPD adaptativa basada en tarjetas de desarrollo para amplificadores con altos índices de no linealidad y niveles de memoria variables. El error obtenido de -53.48 dB NMSE cumple con los estándares

reportados en el estado del arte donde se exige una precisión superior a los -30 dB NMSE.

Tabla 1 Descripción de los recursos de hardware utilizados durante la implementación.

Descripción	Cantidad
FPGA	5CEFA7F31/7
Unidades lógicas utilizadas	340/56,480 (<1%)
Registros totales	771
Pines totales	40/480 (8%)
Total de bits de bloque de memoria	43,008/7,024,640 (<1%)
Total de bloques de DSP	0/156 (0%)
PLL Totales	1/7 (14%)

5. Conclusiones

A continuación, se describen las principales conclusiones obtenidas:

- Se desarrolló una GUI cuya programación en lenguaje C extrae el mejor de los casos en cuanto a kernels del MPM tanto pares, impares y todos.
- Se propone el análisis de un RF-PA con altos órdenes de no linealidad y memoria de corto término de modo de comprobar que el sistema es funcional para dispositivos altamente no lineales y que serán linealizados en un proceso de DPD como proceso de corrección espectral como el RF-PA de 10W, NXP @2.34 GHz.
- Se obtiene una precisión de -53.48 dB NMSE lo que cumple con los estándares reportados en el estado del arte de al menos -30 dB de precisión.
- En la evaluación de recursos se utilizó la máxima resolución de la tarjeta de 14 Bits, ambas señales se muestrearon en 16384 muestras con un reloj de muestreo de 125 MHz, se analiza en la discusión de los resultados las métricas de hardware y de memoria requeridas y se demuestra que se adapta al sistema un proceso de corrección basado en DPD, por ejemplo, de aprendizaje indirecto, así como la evaluación espectral del sistema desarrollado.
- El estado del arte indica precisión en procesos de modelado de -30 dB NMSE, en este trabajo se supera en hasta 13 dB las etapas de modelado

reportados, por lo que el sistema este óptimo para un proceso posterior de DPD y corrección del efecto de recrecimiento espectral durante una transmisión inalámbrica, todo lo anterior controlado por una tarjeta de desarrollo.

- El sistema de modelado que se incluirá en una etapa posterior de predistorsión digital es una opción viable para reducir el efecto no deseado de recrecimiento espectral e invasión de bandas adyacentes, lo que es una alternativa viable para transmisiones de datos eficientes.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Allende-Chávez, E., Cárdenas-Valdez, J. R. Calvillo-Téllez, A., & Núñez Pérez, J.C. Metodología para la implementación del MPM en VHDL y la emulación de amplificadores de potencia en una tarjeta FPGA. *Pistas Educativas*, vol. 39, No. 128, pp. 363-376, feb. 2018.
- [2] Allende-Chávez E. et al. (2018) Coefficients Estimation of MPM Through LSE, ORLS and SLS for RF-PA Modeling and DPD. In: Maldonado Y., Trujillo L., Schütze O., Riccardi A., Vasile M. (eds) NEO 2016. *Studies in Computational Intelligence*, vol. 731. Springer, Cham.
- [3] Cárdenas-Valdez, J. R. et al., Modeling memory effects in RF power amplifiers applied to a digital pre-distortion algorithm and emulated on a DSP-FPGA board. *Integration*, vol. 49, pp. 49-64, mar. 2015.
- [4] Hammi, O., Abdelrahman; A., & Zerguine, A. Multi-basis weighted memory polynomial for RF power amplifiers behavioral modeling. *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Shanghai, China, March. 2016.
- [5] Abdelrahman; A., Hammi, O., Kwan A., & Zerguine, A Novel Weighted Memory Polynomial for Behavioral Modeling and Digital Predistortion of Nonlinear Wireless Transmitters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 63, no. 3, pp. 1745–1753, March. 2016.
- [6] Yuan, X.-H. & Feng, Q. Behavioral modeling of RF power amplifiers with memory effects using orthonormal hermite polynomial basis neural network. *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 34, pp. 239-251, 2013.

- [7] Khalifa, M., Abdelhafiz, A., Kwan, A., Ghannouchi, F. & Hammi, O. Behavioral modeling of envelope tracking power amplifier using Volterra series model and compressed sampling. IEEE International Wireless Symposium. Shenzhen, China March. 2015.
- [8] Lin, Y., Quindroit, C., Jang, H., & Roblin, P. 3-D Fourier Series Based Digital Predistortion Technique for Concurrent Dual-Band Envelope Tracking with Reduced Envelope Bandwidth. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, No. 9, pp. 2764-2775, Sep. 2015.
- [9] Núñez-Pérez; J. C., Allende-Chávez; E., Cárdenas-Valdez; J. R., & Tlelo-Cuautle, E. Coefficient extraction for MPM using LSE, ORLS and SLS applied to RF-PA modelling. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Baltimore, MD, USA, 2017
- [10] Núñez Pérez, J.C., et al. Flexible test bed for the behavioural modelling of power amplifiers. COMPEL, vol. 33, no. 1/2, pp. 355-375, dic. 2013.
- [11] Valiente A. Integración de Internet de las Cosas en Sistema Embebido System on Chip, con aplicación a domótica. Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia, 2017.
- [12] Wood, J., & Root, D., Fundamentals of Nonlinear Behavioral Modeling for RF and Microwave Design. Artech House Inc., Massachussets, USA, 2005.