



17 del 24 al 28 de noviembre de 2014
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



PROPUESTA Y SIMULACIÓN DE UN MÉTODO DE PREDISTORSIÓN DIGITAL BASADO EN SERIES DE VOLTERRA

**Claudia Rivera Muñoz¹, Alejandro Valbuena Almeida¹, José Ángel Amador Fundora¹,
Rodney Martínez Alonso²**

¹Fac. de Ing. Eléctrica, CUJAE, Calle 114 s/n, Marianao, La Habana, Cuba;

²LACETEL, Ave. Independencia No.34515, km 14½, Reparto 1ro de Mayo, Boyeros, La Habana.

¹e-mail: amador@eléctrica.cujae.edu.cu

RESUMEN

La migración de la televisión analógica a la digital trae como beneficio una mayor eficiencia en el empleo del espectro radioeléctrico, mayor calidad de imagen y sonido y la aparición de nuevos servicios. Como se transmiten varios canales con video comprimido junto a estos nuevos servicios, se requieren mayores tasas de transmisión y preservar los niveles de eficiencia espectral. Debido a esto, muchos estándares para sistemas de comunicación digital, incluido el estándar DTMB adoptado en Cuba, consideran el empleo de modulaciones de amplitud no constantes tales como QAM en formatos OFDM. Uno de los principales obstáculos para el funcionamiento de los sistemas de comunicación digital basados en OFDM, es el comportamiento no lineal de los amplificadores de alta potencia utilizados en las estaciones transmisoras, que provocan distorsión en la señal y la aparición de componentes espectrales ausentes en la señal original. Este efecto negativo, introducido por la imperfección de los amplificadores de potencia reales, puede ser compensado utilizando técnicas de linealización, siendo la predistorsión digital una de las más investigadas en la actualidad por sus bondades. La predistorsión digital consiste en modificar la señal de entrada del amplificador de potencia, haciéndola pasar previamente por un bloque predistorsionador que genera una función inversa (teóricamente) de la introducida por el amplificador de potencia. La predistorsión digital puede basarse en el empleo de series de Volterra, ya que proporcionan exactitud en los resultados y tienen la capacidad de modelar los efectos de memoria del sistema.

PALABRAS CLAVES: comportamiento no lineal, predistorsionador, series de Volterra

ABSTRACT

The migration from analogue to digital TV brings benefit more efficient use of radio spectrum, higher quality picture and sound and the emergence of new services. As several channels with compressed video are transmitted, together with these new services, higher transmission rates and the preservation of spectral efficiency are required. Because of this, many standards for digital communication systems, including the DTMB standard adopted in Cuba, consider the use of non-constant amplitude modulations such as QAM in OFDM formats. One of the main obstacles to the functioning of systems based on OFDM digital communication is the nonlinear behavior of high-power amplifiers used in transmitting stations, which cause signal distortion and the appearance of spectral components absent in the original signal. This negative effect, introduced by the power amplifier can be compensated using linearization techniques, digital predistortion being one of the most investigated today. The digital predistortion consists in modifying the input signal power amplifier by making it pass through a predistorter block that generates an inverse function (theoretically) of the one introduced by the power amplifier. The digital predistortion can be based on the use of Volterra series as they provide accurate results and have the ability to model the memory effects of system.

KEY WORDS: non linear behavior, predistorter, Volterra series



1. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones se encuentran presentes en múltiples aspectos de la vida cotidiana, y han alcanzado un gran desarrollo en las últimas décadas. Uno de los avances más revolucionarios es la migración de la televisión analógica a la digital, proceso que muchos países han comenzado y en el cual se encuentra inmersa Cuba.

Con la radiodifusión se requieren mayores tasas de transmisión y preservar los niveles de eficiencia espectral, por tanto, muchos de los estándares para sistemas de comunicación digital actuales consideran el uso de modulaciones de amplitud no constantes tales como QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura) en formatos OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales). Así sucede con el estándar de Televisión Digital Terrestre DTMB (del inglés, Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting), el cual se adoptó oficialmente en Cuba, por el acuerdo 7455 del Consejo de Ministros, el 10 de septiembre de 2013.

La modulación OFDM por sus ventajas es ampliamente utilizada en comunicaciones inalámbricas, pero al ser una señal de envolvente no constante es muy vulnerable a la distorsión no lineal introducida fundamentalmente por los amplificadores de potencia en la etapa de transmisión.

Esta distorsión no lineal ocurre, porque la búsqueda de una mayor eficiencia en la conversión de energía de corriente directa en energía de radiofrecuencia, hace que se trabaje en puntos sobre la característica transferencial de los amplificadores de potencia donde la pendiente de la misma deja de ser constante. Esto provoca efectos negativos en la señal como distorsión y el recrecimiento espectral.

Afortunadamente, estos efectos negativos introducidos por los amplificadores de potencia, pueden compensarse utilizando técnicas que contribuyen a aumentar la linealidad de estos sistemas, las cuales permiten que la salida de los amplificadores de potencia sea más lineal en las zonas cercanas a los puntos de corte y de saturación de los mismos, lo que permite una mejor eficiencia con linealidad mejorada.

En la literatura es posible encontrar referencias a diferentes técnicas de linealización, siendo la predistorsión digital una de las que más se está investigando en la actualidad. Las técnicas de predistorsión digital consisten en la estimación de los parámetros de una función de predistorsión que posteriormente, se aplica a la señal de entrada antes de pasar por la etapa del amplificador de potencia.[1]

2. PREDISTORSIÓN DIGITAL

La técnica de predistorsión digital consiste en cambiar la señal de entrada del amplificador de potencia haciéndola pasar previamente por el bloque predistorsionador, que genera una función transferencial inversa (teóricamente) a la introducida por el amplificador. De esta manera, la salida del amplificador se aproxima a la recta teórica ideal. Este efecto se ilustra en la Fig. 1:

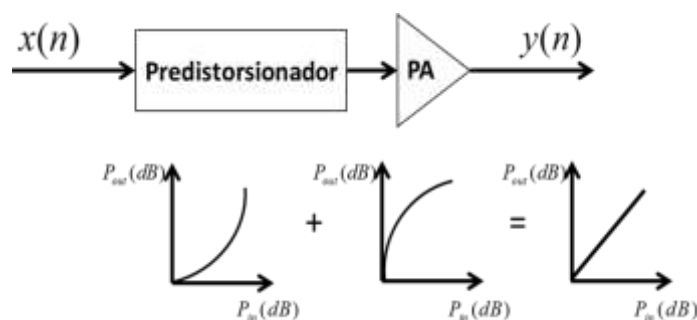


Figura 1: Linealización con predistorsión digital.



La predistorsión digital puede aplicarse sobre una señal o sobre datos. Esta última, la que se aplica sobre los datos, se propuso en los años 80 y su interés creció a principios de los 90. Es una técnica que se realiza a medida para los formatos concretos de modulación digital. La función de predistorsión pretende compensar el espacio vectorial de los datos, o la constelación. Los coeficientes se optimizan minimizando el parámetro EVM, (del inglés, Error Vector Magnitude). Sin embargo, con esta técnica la distorsión fuera de banda no se compensa y esto puede ser un problema para cumplir determinadas especificaciones técnicas de los estándares. Además, es preferible considerar una técnica de predistorsión que pueda utilizarse más en general como la que se aplica sobre la señal.

La predistorsión digital de señal genera una señal predistorsionada que al pasar a través del amplificador de potencia debería no tener distorsión a la salida, es decir, convertiría al amplificador de potencia en un dispositivo lineal ideal hasta el punto de saturación. El objetivo de esta técnica es compensar la distorsión en banda y fuera de banda mientras el nivel de saturación del amplificador lo permita. Es una técnica que presenta ventajas desde el momento en que no depende del tipo de amplificador (clase A, AB, C, según el ángulo de conducción, o de la tecnología), banda de trabajo y de la modulación.[1]

Para lograr una compensación por predistorsión en la transmisión de DTV (Televisión Digital), los sistemas precorrectores deben incluirse en los transmisores luego de la modulación digital, pero antes de la conversión de la señal a analógica. El propósito y principio general de la pre-corrección en DTV es similar al existente en los transmisores analógicos.[2]

3. PREDISTORSIONADOR BASADO EN SERIES DE VOLTERRA

El nombre de este predistorsionador se debe a que el modelo empleado para modelar la no linealidad serán las series de Volterra.

Se utilizará este modelo, por su capacidad de modelar el comportamiento de los amplificadores tomando en cuenta diferentes grados de efectos de memoria. Además se puede emplear tanto con métodos de entrenamiento para conseguir el ajuste deseado, como con métodos adaptativos.

Para considerar la función del predistorsionador se emplearán las series de Volterra, pero debido a la gran complejidad computacional que implica el empleo de las mismas, se utilizará el Modelo Polinómico con Memoria, que es un modelo de Volterra simplificado que tiene en cuenta los efectos de memoria del sistema. La relación entrada salida de este modelo se describe en (1).

$$y_{MP}(n) = \sum_{q=0}^Q \sum_{j=1, \text{impares}}^K h_{j,q} x(n-q) |x(n-q)|^{j-1} \quad (1)$$

Donde Q representa la longitud de la memoria y K es el orden de la no linealidad. Se tendrán en cuenta las componentes impares, pues son las que están relacionadas con la no linealidad.

La ecuación (1) se puede reescribir de forma matricial:

$$\bar{Y}_{MP} = \bar{X} \bar{H} \quad (2)$$

Donde $\bar{Y}_{MP}$ es el vector de la señal de salida del predistorsionador, $\bar{H}$ es el kernel de la serie de Volterra que configura al predistorsionador y $\bar{X}$ es el vector de la señal de entrada al sistema.

De (2) se necesita obtener $\bar{H}$, pues un sistema de Volterra se considera caracterizado a partir del conocimiento de su kernel, para ello se utiliza la técnica de mínimos cuadrados, cuyo resultado es:



$$\overline{H} = (\overline{X}^H \overline{X})^{-1} \overline{X}^H \overline{Y}_{MP} \quad (3)$$

Donde el superíndice $(.)^H$ denota la traspuesta conjugada.[3] Por lo tanto, si se identifican las señales de entrada y salida del predistorsionador, la obtención de los parámetros es inmediata.

Para calcular los coeficientes del predistorsionador, lo primero que se debe hacer es identificar las señales de entrada y salida del mismo. Como se quiere lograr un sistema con característica inversa a la del amplificador de potencia, para el cálculo de los coeficientes se asumirá que la señal de entrada al predistorsionador será la salida del amplificador de potencia y la salida del predistorsionador será la señal de entrada al amplificador.

Antes de hallar los coeficientes del kernel de Volterra con esta suposición hay que normalizar los datos que intervienen en el proceso de extracción, para que el nivel de potencia de la señal predistorsionada, sea el mismo al de la señal de entrada original y de esta manera se está teniendo en cuenta la ganancia del amplificador.

Para ello se define la ganancia esperada de la siguiente manera:

$$k = \frac{\max \left[|y(n)| \right]}{\max \left[|x(n)| \right]} \quad (4)$$

Donde $y(n)$ y $x(n)$ son la envolvente compleja de la salida y la entrada del amplificador, respectivamente. Hay que decir, que se supone que la potencia de salida del amplificador aumenta monótonamente con el aumento de la potencia de entrada, es decir, el pico de potencia ocurre solo con la máxima potencia de excitación.[4] Con esta ganancia esperada ya definida, la entrada original y la predistorsionada deben alcanzar el mismo nivel de potencia máximo en la entrada del amplificador, aunque se incurre en un sacrificio de ganancia a niveles intermedios para forzar a que la función de transferencia corregida mantenga ganancia constante.

Posteriormente, es posible calcular los coeficientes del kernel de Volterra. Para ello la señal de salida del predistorsionador será $x(n)$ y la entrada normalizada $y(n)/k$, siendo k la ganancia esperada calculada en (4).

Por lo tanto, sustituyendo en (3) se llega a:

$$\overline{H} = \left(\left(\overline{Y/k} \right)^H \overline{Y/k} \right)^{-1} \left(\overline{Y/k} \right)^H \overline{X}_{MP} \quad (5)$$

De esta manera se pueden obtener los coeficientes deseados que caracterizarán al predistorsionador.

4. SIMULACIÓN EN MATLAB

Antes de simular el predistorsionador basado en series de Volterra se simulará un amplificador de potencia genérico, que será el encargado de introducir la no linealidad al sistema para comprobar las bondades del predistorsionador y además con las muestras de la señal a su entrada y su salida se hallarán los coeficientes del kernel de Volterra que configuran al predistorsionador.

Para representar el amplificador de potencia en MatLab se utilizó el modelo de Wiener que consiste en la cascada de un sistema LTI (Lineal Invariante en el Tiempo), con un sistema no lineal sin memoria, como se observa en la Fig. 2.

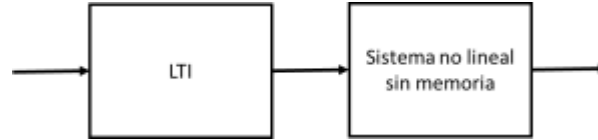


Figura 2: Modelo no lineal con memoria.

El sistema LTI simula la memoria a través de un filtro FIR (Respuesta Finita al Impulso), y el sistema no lineal sin memoria se implementa a partir del modelo de Saleh de Amplitud-Fase, pues las curvas de comportamiento que propone Saleh se asemejan en general a las de cualquier tipo de amplificador de potencia, para ello se implementaron en MatLab las funciones de amplitud $A(\cdot)$ y fase $\Phi(\cdot)$ propuestas por Saleh:

$$A[r(t)] = \frac{\alpha_a r(t)}{1 + \beta_a r^2(t)} \quad (6)$$

$$\Phi[r(t)] = \frac{\alpha_\phi r^2(t)}{1 + \beta_\phi r^2(t)} \quad (7)$$

Donde α_a , β_a , α_ϕ , β_ϕ son constantes y $r(t)$ es la señal de entrada normalizada. Para este modelo se asumirán los siguientes coeficientes, que son una aproximación recomendada en la literatura: $\alpha_a=2.0$, $\beta_a=1.0$, $\alpha_\phi=\pi/3$, $\beta_\phi=1.0$. Cabe decir que estas constantes se corresponden con una amplitud de saturación de entrada y de salida normalizada.[5]

Posteriormente se implementan (4) y (5) en MatLab para cuando se le introduzcan muestras de las señales de la entrada y salida del amplificador, obtener los coeficientes del kernel del Volterra, los cuales serán aplicados antes del amplificador a la señal que pase por el sistema.

De esta manera el sistema que se simula en MatLab es el mostrado en la fig. 3.



Figura 3: Sistema simulado en MatLab.

Para la simulación se utiliza una señal con características similares a DTMB (3780 portadoras), la cual será aplicada al sistema de la Fig. 3, y para comparar los resultados se aplicará también únicamente al amplificador de potencia simulado para de esta forma comprobar los beneficios que suponen el uso del predistorsionador.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Un diagrama de representación espectral es una herramienta útil para mostrar el recrecimiento espectral causado por la distorsión no lineal en los sistemas de comunicaciones. Proporciona una forma de examinar el nivel de interferencia de canal adyacente, causado por la distorsión de la señal transmitida.

La Fig. 4 permite comparar los espectros para sistema no lineal con memoria con predistorsión y sin predistorsión.

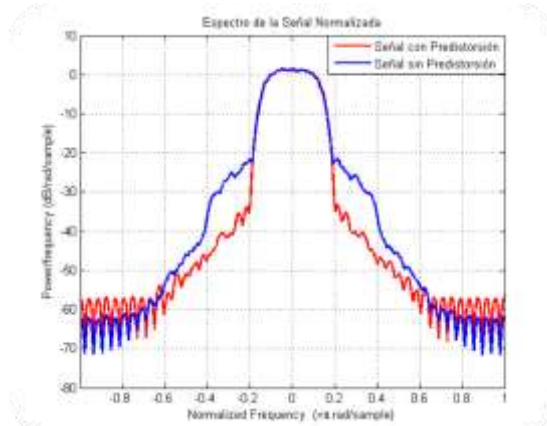
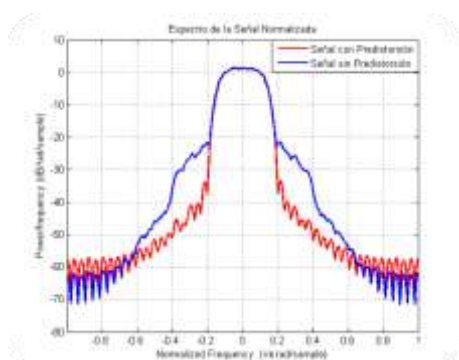
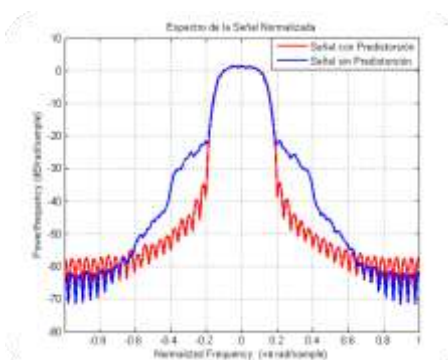


Figura 4: Espectro con predistorsión y sin predistorsión para un orden de no linealidad $K=3$.

Gráficamente se observa que la señal previamente predistorsionada (salida del predistorsionador digital), luego de ser aplicada al amplificador de potencia, presenta mejoras en cuanto al recrecimiento espectral con respecto al caso en que únicamente se utiliza el PA, sin predistorsión de la excitación. En esta figura se puede observar que aunque en el sistema con predistorsionador se logra una mejora de hasta 15 dB, el predistorsionador solo tiene en cuenta un orden de no linealidad de $K=3$, por lo que presenta productos de intermodulación de órdenes superiores. En la Fig. 5 (a) y 5 (b) se observa qué sucede cuando se aumenta el orden de la no linealidad a tener en cuenta en el diseño del predistorsionador.



(a)



(b)

Figura 5: Espectro con predistorsión y sin predistorsión para un orden de no linealidad en (a) $K=5$ y en (b) $K=7$.

En la Fig. 5 se puede observar que a medida que aumenta el orden de la no linealidad a tener en cuenta en el diseño del predistorsionador, se corrigen los productos de intermodulación de dichos órdenes.

Otra forma de observar las mejoras que introduce el predistorsionador propuesto es a través de la relación AM/AM del sistema. En la Fig. 6 se observa esta relación, obtenida para el sistema formado únicamente por el PA, y para el sistema formado por el predistorsionador-amplificador de potencia.

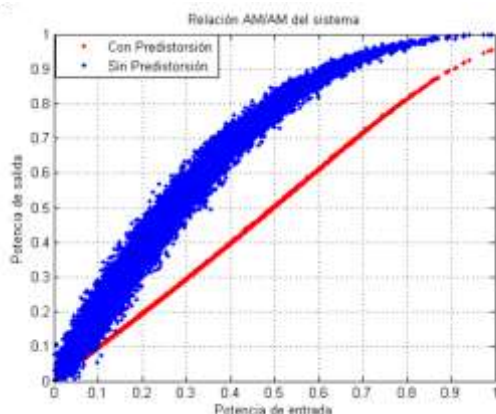
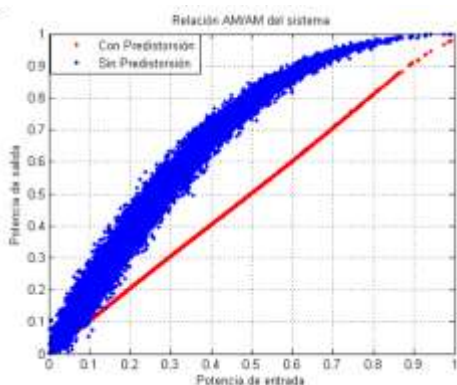


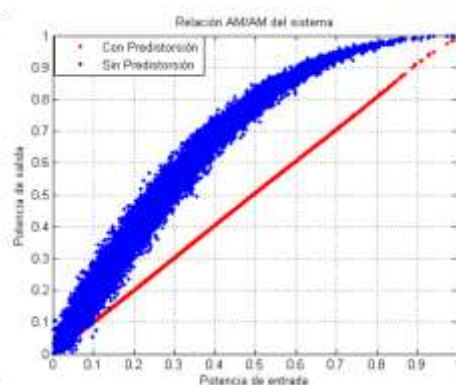
Figura 6: Relación AM/AM del sistema con predistorsión y sin predistorsión para un orden de no linealidad $K=3$.

El uso del predistorsionador mejora la linealidad del amplificador de potencia, aunque se observan imperfecciones en la curva linealizada, fundamentalmente cerca de la zona de saturación del amplificador de potencia. Esto se debe a que solo se tuvo en cuenta la corrección para un orden de no linealidad de $K=3$.

En la Fig. 7 (a) y 7 (b) se ilustra la relación AM/AM del sistema con predistorsión y sin predistorsión para un orden de no linealidad $K=5$ y $K=7$, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7: Relación AM/AM del sistema con predistorsión y sin predistorsión para un orden de no linealidad en (a) $K=5$ y en (b) $K=7$.

En la Fig. 7 se puede observar que a medida que se tengan en cuenta los productos de intermodulación de órdenes superiores en el diseño del predistorsionador se obtiene mayor linealidad en el sistema global.

Para este caso particular del amplificador de potencia que se simuló, con un orden de no linealidad $K=7$ en el diseño del predistorsionador, se obtienen resultados satisfactorios en la linealización del sistema, pero el orden de la no linealidad al igual que la longitud de la memoria dependerán de las características del amplificador de potencia.

Vale la pena señalar que a medida que aumenta este valor, se incrementa la complejidad computacional, lo que requerirá más recursos de hardware para su implementación.



17 del 24 al 28 de noviembre de 2014
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



6. CONCLUSIONES

La implementación del método en Matlab permite determinar los coeficientes del predistorsionador a partir de introducir muestras de señal de la entrada y la salida de un amplificador real.

Se obtuvieron resultados satisfactorios al simularse el método propuesto usando un modelo genérico de amplificador de potencia y una señal de entrada similar en espectro a una señal DTMB (OFDM, 3780 portadoras).

La longitud de la memoria y el orden de la no linealidad a tener en cuenta en el diseño del predistorsionador dependerán de las características del amplificador de potencia y de la señal que se aplicará al sistema.

REFERENCIAS

1. Rodríguez, M.S.V., Implementación en DSP de un Predistorsionador Digital para la Linealización de Amplificadores de Potencia. 2006, Universidad Politécnica de Cataluña.
2. WILLIAMS, E.A., ENGINEERING HANDBOOK. 2007: National Association of Broadcasters.
3. Pradas, G.L., PREDISTORSIÓN DIGITAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OFDM: ESTUDIO MEDIANTE SIMULACIÓN, en Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. 2011, UNIVERSIDAD DE SEVILLA Escuela Técnica Superior de Ingeniería: Sevilla.
4. Zhu, A., P.J. Draxler, and J.J. Yan, Open-Loop Digital Predistorter for RF Power Amplifiers Using Dynamic Deviation Reduction-Based Volterra Series. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2008. 56(7): p. 1524-1534.
5. Wasaff, H.D., PREDISTORSIÓN DIGITAL ADAPTATIVA PARA LINEALIZACIÓN DE AMPLIFICADORES EN SISTEMAS OFDM. Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá, 2005. 13(3): p. 53-60.

SOBRE LOS AUTORES

Claudia Rivera Muñoz. Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica (2014). Ha investigado en sistemas de reducción de distorsión en amplificadores lineales de potencia.



Alejandro Valbuena Almeida. Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica (2014). Ha investigado en sistemas de reducción de distorsión en amplificadores lineales de potencia.



José Ángel Amador Fundora. Ingeniero Electricista (1979) Máster en Ciencias en Sistemas de Radiocomunicaciones (2003), Profesor Auxiliar (1995) del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, CUJAE. Imparte la asignatura Radioelectrónica 1, que cubre temas de generación y síntesis de frecuencias, modulación y amplificadores de potencia, Sistemas de Radiocomunicaciones, Radiodifusión y Televisión. Ha sido proyectista, diseñador de equipos electrónicos y especialista de desarrollo del ICRT de 1979 a 1994. Es miembro de la Comisión Técnica para la implantación de la TDT, MINCOM, Cuba.





17 del 24 al 28 de noviembre de 2014
CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



Rodney Martínez Alonso: Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica (2010). Experiencias de trabajo: Metodología para la reparación de Motherboards industriales y tarjetas de comunicación serie (publicado en la XI Semana Tecnológica de FORDES), Firmware en VHDL para sistema de audioconferencia, Optimización de Sintetizador Digital Directo en lenguaje VHDL para la implementación en un ASIC de alta velocidad, diseño de sintetizadores de radiofrecuencia empleando tecnología DDS, PLL y sistemas embebidos en FPGA, Diseño y medición de Antenas para la banda ISM y UHF. Línea actual de investigación: Diseño de un Equipo Modulador para la norma DTMB de televisión digital. Principales eventos científicos: Cuba-EU Forum on Research and Development of ICT, X y XI semana tecnológica de FORDES, Fórum de Ciencia y Técnica. Cursos de Postgrado: Signal Tap II, Workshop on Nanotechnology and Nanoelectronics: Challenges and trends, Propiedad Industrial en los negocios Jurídicos, Redacción de Patentes, ICTP-TWAS Advanced Course on FPGA Design for Scientific Instrumentation, Havana, 2012. Posición Actual: Reserva Científica, LACETEL, Cuba, e-mail: rodney@lacetel.cu

