

# Comunicaciones inalámbricas ecológicas: El análisis no lineal aplicado a la caracterización de dispositivos móviles

Artículo cedido por Darren McCarthy de Tektronix y Wally Arceneaux de Mesuro



Traducido y adaptado —  
por Juan Ojeda de  
AFC Ingenieros S.A.  
(jojeda@afc-ingenieros.  
com)

*Un objetivo fundamental para el diseño inalámbrico es lograr dispositivos que sean más eficientes o más ecológicos, ya sea reduciendo el consumo de energía en las estaciones base o aumentando la vida de las baterías de varios miles de millones de teléfonos. La utilización de los dispositivos activos en su región no lineal mejora la eficiencia operativa de los productos inalámbricos.*

Tradicionalmente, la caracterización del comportamiento no lineal de los dispositivos ha supuesto la utilización de medidas y modelos para lograr unos resultados óptimos. En cuanto a lo que respecta a las medidas, los productos existentes han ido ampliando sus prestaciones con la aplicación de software y hardware en un intento de hacer frente a este mercado y para facilitar la creación de modelos de comportamiento. Sin embargo, las técnicas de medida de estos amplificadores de potencia (AP) pueden carecer de una integración coherente con un sistema de creación de armónicos mediante variación de la carga (harmonic source/load pull system) dando como resultado dispositivos y amplificadores que se están caracterizando a impedancias que son diferentes de las correspondientes a su aplicación final, haciendo que esto suponga un reto para (1) trasladar las prestaciones del dispositivo sobre el que se mide al diseño del AP o (2) lograr las prestaciones potenciales disponibles del dispositivo o de la arquitectura empleada en el AP.

Se han desarrollado recientemente nuevos métodos para la extrapolación de los datos medidos sobre las formas de onda en sus componentes fundamentales y armónicas. Estos métodos se basan principalmente en los modelos PHD que se han desarrollado y constituyen una manera coherente y matemáticamente robusta de ampliar los parámetros en un dominio no lineal. Sin embargo, se requiere mayor investigación para

determinar qué tan bien este método es capaz de realizar una extrapolación más allá de la impedancia medida a las frecuencias fundamentales y armónicas.

Un método alternativo es un sistema integrado de medida que soporta simultáneamente la medida de las formas de onda de las corrientes y de las tensiones reales de los dispositivos al mismo tiempo que ofrece el control sobre la fuente de generación de armónicos mediante la variación de la impedancia de carga (harmonic source/load impedance) en toda la carta Smith. Para tener el control de la impedancia y de la variación de la carga activa causantes de los armónicos es necesario compensar cualquier pérdida entre el dispositivo bajo prueba y el sistema de generación de armónicos mediante la variación de la carga (source/load pull). Tal sistema integrado permite establecer una relación verdadera y coherente entre la caracterización del dispositivo no lineal y el diseño del AP. Por ejemplo, el sistema de generación de armónicos mediante la variación de la carga permite la generación de formas de ondas de radiofrecuencia que promueven el funcionamiento eficiente del dispositivo y la translación directa de las impedancias obtenidas garantiza la replicación exacta del rendimiento dentro del diseño de un AP. Lo recíproco también es posible puesto que las impedancias que están presentes dentro de un PA pueden ser fácilmente emuladas por el sistema y las formas de onda de tensión y de corriente de RF resultantes pueden ser utilizadas para obtener información detallada sobre que tan próximo está el dispositivo ha funcionar al máximo de su eficiencia o que impacto pueden tener las oscilaciones de las tensiones y de las corrientes sobre la fiabilidad de los dispositivos.

El diseño de un AP de gran eficiencia está emparejado con el control preciso de las impedancias causantes de las componentes fundamentales y

armónicas que están presentes en el dispositivo. Por lo tanto, es básico que el diseñador pueda medir las frecuencias y niveles de potencia relevantes que necesite utilizando una señal tan compleja como sea necesaria para una aplicación determinada.

En este artículo se analiza la evolución de las soluciones de medida no-lineales y a continuación, se detalla un método de diseño emergente que reduce en gran medida las iteraciones complejas incluso para los modos complejos de amplificación de potencia, al mismo tiempo que se logran resultados que coinciden con la teoría.

Se han intentado diversos métodos de medidas no-lineales y cada uno se enfrenta a una serie de desafíos que han dificultado la obtención de la máxima eficiencia en los APs. Estos métodos incluyen fuentes pasivas/variadores de carga (passive source/load pull), variadores de impedancia activos de bucle cerrado (closed loop active load pull) y más recientemente, variadores de impedancia activos de bucle abierto (open loop active load pull).

## Fuentes pasivas/ variadores de carga

Para realizar medidas no lineales se pueden utilizar sensores de potencia, VNAs u osciloscopios de tipo "sampling", como se muestra en la Figura 1. Los sintonizadores permiten ajustar los valores de impedancia para controlar la generación de armónicos en la entrada y salida del dispositivo bajo prueba (DUT). Esto proporciona valores de impedancia para el diseño de circuitos y de niveles de potencia acoplados.

El mayor inconveniente de estos sistemas es que generan variedad de impedancias sobre una gran gama de frecuencias, pero el control de la impedancia tiene lugar sobre una sola frecuencia. La impedancia de control se logra mediante el posicio-

namiento de la varilla del sintonizador, que afecta físicamente a todas las demás frecuencias por encima de las que se puede hacer funcionar al sintonizador. En consecuencia, todos los armónicos debidos a los valores correspondientes de las impedancias no sólo son incontrolables, sino que también cambian su valor con cada nueva posición dando como resultados artefactos de medida que no son reproducibles en los circuitos reales. Esto puede dar lugar a importantes variaciones de rendimiento entre las medidas hechas al variar la carga y el amplificador de potencia real.

El mismo inconveniente es válido para los sintonizadores de armónicos (sintonizadores pasivos con varias varillas de sintonización y cortos deslizamientos) que permiten un control limitado de las impedancias generadoras de armónicos aunque los armónicos superiores (por encima del armónico 3º) no están controlados y varían aún en gran medida. Por ejemplo, una pequeña corriente procedente del DUT puede ser transformada, debido a la Ley de Ohm, en una gran tensión con impedancias armónicas (por encima del armónico 31º), que son fácilmente generadas por los sintonizadores. Las variaciones incontroladas de la carga hacen que sea imposible lograr unas formas de onda tan limpias como las que requieren en ingeniería; ya que, la introducción de cargas capacitivas e inductivas importantes hace que las formas de onda sufran mucha distorsión.

Otro problema importante, especialmente debido a los cortos ciclos de diseño actuales, es que el correcto funcionamiento de los sintonizadores pasivos requiere un procedimiento de calibración de alta precisión al que hay que dedicar una gran cantidad de tiempo, lo que da como resultado tiempos muertos importantes.

Las cargas con alto nivel de reflexión dan lugar a otro reto. Las lecturas del sensor de potencia pueden ser gravemente afectadas por el coeficiente de reflexión de la salida del sintonizador. Esto es especialmente cierto a las frecuencias armónicas en la que los altos coeficientes de reflexión (en circuito abierto o en cortocircuito) son deseables, dando como resultado la casi total reflexión

de la potencia de los armónicos y su vuelta al dispositivo. En esta situación, una lectura en el sensor de potencia es difícil debido a su limitado rango dinámico. Esto puede ser compensado mediante un analizador de redes que tiene un mayor rango dinámico, pero que es más caro.

La posición del sintonizador pasivo entre el de DUT y el receptor de medida (como se muestra en la Figura 1) hace que sea difícil distinguir los artefactos del sintonizador y del propio DUT. Este efecto tiene un impacto potencial sobre la entrada o salida de la red de acoplamiento en el diseño de un AP. El aumento de la longitud producirá una mayor variación de la fase e introducirá artefactos de medida distintos de los circuitos reales. Por ejemplo, se ha demostrado que una diferencia de fase de sólo unos pocos grados puede introducir artefactos que se asemejan a los efectos de memoria. Aún más, estos artefactos de impedancia están cambiando con cada ajuste de impedancia (debido a la colocación de las diferentes varillas del sintonizador) y por tanto, es muy difícil tenerlos en cuenta. Tales variaciones de fase pueden ocurrir fácilmente al utilizar señales moduladas de banda ancha como en los sistemas W-CDMA o LTE o en los sistemas de banda estrecha con de múltiples canales.

### Variador de carga activo de bucle cerrado

La arquitectura de bucle cerrado, que se muestra en la Figura 2, utiliza el propio DUT como estímulo en el método de bucle cerrado. El variador de carga de bucle cerrado compensa las pérdidas mediante el proceso de toma de señal del DUT, la modulación de su magnitud y fase y la amplificación la señal antes de ser inyectada de nuevo en el DUT. El control resultante de la relación entre la señal que se genera por el DUT y la señal que se envía de vuelta permite la generación de cualquier impedancia de la carta Smith incluyendo impedancias negativas con magnitudes del coeficiente de reflexión mayores que la unidad.

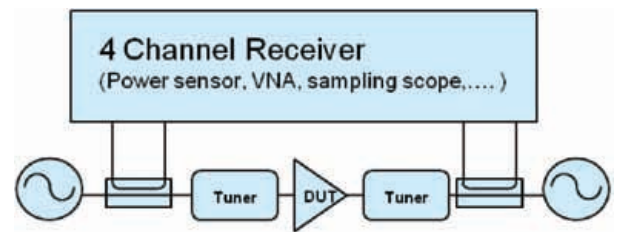


Figura 1. Configuración de la prueba con fuente pasiva y variador de impedancia.

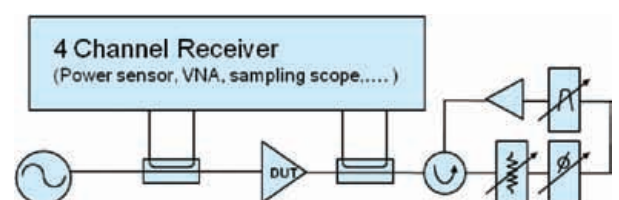
Se requiere que el producto  $\Gamma_{DUT} \times \Gamma_{LP}$  que está formado a partir de los coeficientes de la reflexión generados por el dispositivo bajo prueba (DUT) y el variador de carga (LP: Load Pull) sea igual o menor que 1 para cualquier frecuencia con el fin de garantizar su estabilidad. Para reducir esta interacción entre los dos coeficientes y reducir al mínimo el riesgo de acumulación de potencia incontrolada se introduce en el bucle un filtro sintonizable de banda estrecha.

Para los productos que requieren elevados coeficientes de reflexión para su óptimo funcionamiento, como es el caso de los dispositivos de alta potencia, tales como Si LDMOS, GaAs HBTs ó GaN pHEMT, las oscilaciones y la acumulación de potencia descontrolada son un reto. En consecuencia, el bucle activo opera cerca de la condición de oscilación  $\Gamma_{DUT} \cdot \Gamma_{LP} = 1$ , así como, los coeficientes de reflexión del dispositivo  $\Gamma_{DUT}$  tienden a estar cerca de la unidad. En otras palabras, el sistema de bucle activo funciona al borde de la oscilación y cualquier pequeña desviación del coeficiente de reflexión a las frecuencias vecinas puede hacer que todo el sistema entre en oscilación y acumule una potencia descontrolada que tenga el potencial de destruir el DUT y la instrumentación de medida.

Para mantener el lazo tan estable como sea posible, los filtros paso-banda deben ser de banda estrecha y excluir la aplicación de lazos activos a las señales moduladas con un ancho de banda por encima de 1MHz, como ocurre con W-CDMA, LTE.

En caso de señales multi-tono la arquitectura de bucle cerrado no permite un control independiente de las

Figura 2. Configuración de prueba con variador de carga activo de bucle cerrado.



impedancia sobre el ancho de banda de la modulación; ya que, tanto los elementos de control de la magnitud y la fase siguen permaneciendo constantes con respecto al ancho de banda de la modulación.

### Variador de carga activo de bucle abierto

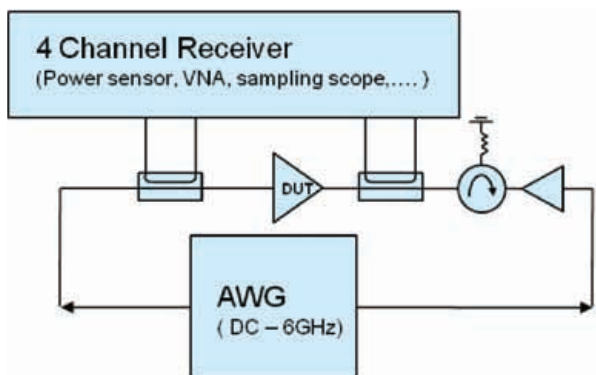
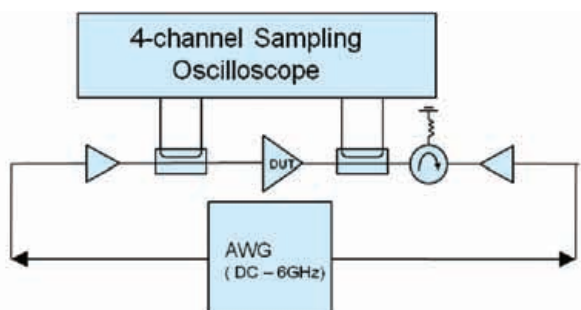


Figure 3. Configuración de prueba con variador de carga activo de bucle abierto.

Un método más reciente para las medidas no-lineales es el variador de impedancia activo de lazo abierto, como se muestra en la Figura 3. Esta técnica utiliza una fuente de señal, ya sea para realizar estímulos desde el lado de la fuente o de la carga del DUT eliminando así cualquier interacción incontrolada entre el DUT y el sistema de variación de la carga. Esto elimina la acumulación de potencia que tanto preocupa en el método de bucle cerrado. Curiosamente, la arquitectura de bucle abierto puede ser segura incluso cuando se utiliza para generar coeficientes de reflexión mayores que la unidad. Esto permite la investigación exclusiva sobre la interacción entre el controlador y la etapa principal del AP. Debido a la estabilidad incondicional de la arquitectura de bucle abierto, este método puede ser fácilmente utilizado en sistemas de medida.

El hecho de que los sistemas activos de variación de carga se posicio-

Figura 4. Configuración de prueba fuente activa/variación de carga de bucle abierto.



nen más allá de una red de impedancia dentro del diseño del circuito real puede ser fácilmente compensado por el control de la fase y la magnitud de cada componente de frecuencia dentro de la señal que se genera mediante el generador de forma de onda arbitraria (AWG). Como el sistema activo de variación de carga se coloca fuera del camino del calibrado (compuesto de acopladores y su conexión con el osciloscopio "sampling") el variador de carga puede reconfigurarse sin necesidad de volver a calibrar el sistema de medida. Cuando no hay señal de salida en el AWG, la arquitectura fuente/variador de carga presenta un entorno de impedancia de 50 ohmios en banda ancha y por lo tanto, un coeficiente de reflexión que es casi cero en todo el ancho de banda del sistema. Este entorno de 50 ohmios sufre cambios sólo a las frecuencias que produce el AWG. En consecuencia, esta arquitectura de variación de la carga elimina también los artefactos de los que se trató previamente en el método del sintonizador pasivo.

El sistema activo de variación de carga está controlado electrónicamente y no incluye elementos mecánicos móviles. Esto lo hace ideal para la medida de obleas. Con ello, se consigue la máxima fiabilidad de la sonda de contacto, ya que no se generan vibraciones mecánicas durante las medidas de variación de carga.

El AWG puede generar también señales pulsadas y por ello, permite el uso de la arquitectura de lazo abierto para las medidas de los pulsos. Además, el AWG permite un control preciso de todas las componentes espectrales que constituyen la señal pulsada, por lo que es posible investigar la dependencia del comportamiento del dispositivo con las señales reflejadas de los pulsos. La frecuencia del ancho de banda del AWG se inicia desde CC, lo que hace posible utilizar el mismo sistema de variación de carga para el control de impedancia en frecuencias de banda base. Por último, los sintetizadores modernos son capaces de cubrir las frecuencias que van desde las inferiores al hertzio hasta gigahertzios, lo que permite la utilización de la arquitectura de bucle abierto en frecuencias de banda base, fundamentales y armónicas.

En la actualidad, los AWGs disponibles son capaces de generar cualquier señal dentro de un ancho de banda de 6GHz, permitiendo el control de todas las componentes de frecuencia en fase y magnitud, tanto si se trata de simple señal CW o de una señal compleja multi- tono, abarcando por tanto, la amplia gama de frecuencias fundamentales y armónicas que se utilizan en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

El método de bucle abierto tiene algunas desventajas. Por ejemplo, se necesita la búsqueda iterativa del nivel correcto de potencia para conseguir el coeficiente deseado de reflexión. Puesto que hay un variador de la carga fundamental, no se necesitan iteraciones en la región lineal del DUT. Sin embargo, se requieren iteraciones dentro de la región no lineal del DUT durante un barrido de potencia o para tener en cuenta las relaciones no lineales entre las cargas armónicas.

Además, para realizar la caracterización adicional de los dispositivos de alta potencia de los APs se necesita reducir la diferencia entre la impedancia característica del sistema y la carga óptima. Este es el único caso en que a la frecuencia fundamental no se necesita disipación de potencia para los armónicos. Cabe señalar que los APs de banda estrecha están fácilmente disponibles en la mayoría de las empresas.

### Capacidades de medida no lineales de la siguiente generación

Dada la demanda de los dispositivos móviles más ecológicos, se necesitan las soluciones de medida más avanzadas para que los diseñadores puedan caracterizar dispositivos de comportamiento no lineal más rápida y eficazmente. La variación activa de carga en bucle abierto es un prometedor método nuevo que ofrece un conjunto exclusivo de ventajas.

Este método de variación de carga puede ser combinado en principio con cualquier receptor no lineal que sea capaz de medir las 4 formas de onda presentes en el dispositivo de entrada y salida. Una solución atractiva consiste en combinar la arquitectura de lazo abierto con los osciloscopios de tipo "sampling" disponibles en el comercio, como muestra en la Figura 4.

El uso de los osciloscopios de tipo "sampling" permite la realización de medidas de banda ancha coherentes en fase. La ventaja de utilizar osciloscopios de tipo "sampling" es la alineación coherente de todas las componentes espectrales de las múltiples señales que se miden simultáneamente. El osciloscopio de tipo "sampling" puede adquirir hasta 8 señales simultáneamente haciendo que se pueda ampliar fácilmente a las medidas de dispositivos con hasta 4 terminales referidos a tierra o con dos puertos diferenciales. Además, las unidades de adquisición miden todas las componentes espectrales relevantes dentro de la señal, incluyendo la fundamental y los múltiples armónicos de orden superior, así como la respuesta en CC y en banda base, lo cual es esencial para capturar los efectos de memoria vistos a menudo en los dispositivos. Como resultado, se obtienen formas de onda de tensión y de corriente genuinas que representan las propiedades físicas del dispositivo.

### Creación de la forma de onda

Para mejorar la eficiencia de diseño, el siguiente paso lógico es utilizar la configuración de prueba que se acaba de describir para crear un sistema integrado que proporcione un acondicionamiento de la señal emparejado con el software dedicado a la creación de la forma de onda y así llevar a cabo la calibración no lineal, las medidas y el análisis. En los libros de texto se han descrito las bases teóricas de las formas de onda de tensión y de corriente para amplificadores de potencia específicos, como en

el caso de los diseños de Clase-M y Clase-J. La creación de la forma de onda describe la habilidad del diseñador para optimizar su diseño y conseguir esas formas de onda teóricas. Un sistema totalmente integrado permite la medida de parámetros no lineales a través de las formas de onda de corriente y de tensión genuinas con el fin de obtener una imagen precisa de la conducta del DUT. Los resultados obtenidos permiten profundizar en la investigación y en el desarrollo eficiente de los modos de funcionamiento de los AP [2] y en la caracterización avanzada de los efectos de memoria [3 y 4]. Los datos de tensión y corriente permiten una fácil capacidad de intercambio entre la medida y la simulación, dando como resultado un mejor tiempo de lanzamiento de los productos al mercado [6]. Este flujo de trabajo se muestra en la Figura 5.

El usuario puede ahora determinar si un dispositivo dado está mejor representado en el simulador a través de un conjunto de medidas no lineales o de un modelo no lineal. Estas capacidades hacen que este tipo de método sea de interés para la industria de semiconductores; ya que, se pueden generar formas de onda específicas para probar e investigar las propiedades particulares de un transistor, tales como el "knee-walk-out" o las características de tensión de ruptura [7]. Este método de medida es en esencia una realización práctica del equilibrio armónico o de un simulador de envolvente y ofrece la capacidad de integración perfecta con cualquier software no lineal de tipo EDA.

### Conclusión

La utilización de un osciloscopio de tipo "sampling" y un AWG ofrece una nueva alternativa a los tradicionales analizadores de redes vectoriales (VNAs) basados en técnicas de medida que miden sólo una componente de frecuencia a la vez. La solución tiene plenamente en cuenta que los dispositivos y sistemas no lineales producen señales de gran riqueza espectral en banda base, frecuencias fundamentales y armónicas y permite su control simultáneo para obtener el máximo rendimiento de una tecnología determinada. Su método modular tiene plenamente en cuenta la diversidad del mercado abarcando las pequeñas, medianas y grandes aplicaciones de potencia para la explotación de mercados de 20W a 150W. La tecnología no se limita solo a las técnicas de respuesta correspondientes a estímulos de tonos, sino que se pueden adaptar a medidas de estímulos modulados o pulsados mediante software. Este método ofrece ventajas significativas para el diseño de dispositivos inalámbricos más eficientes y ecológicos.

### Bibliografía

- [1] www.janverspecht.com
- [2] P. Wright, A. Sheikh, Ch. Roff, P. J. Tasker and J. Benedikt, "Highly Efficient Operation Modes in GaN Power Transistors Delivering Upwards of 81% Efficiency and 12W Output Power," in 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, Georgia, USA, June 15-20, 2008
- [3] A. Alghanim, J. Lees, T. Williams, J. Benedikt, and P. J. Tasker, "Reduction of Electrical Baseband Memory Effect in High-Power LDMOS Devices using Optimum Termination for IMD3 and IMD5 using Active Load-Pull," in 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, Georgia, USA, June 15-20, 2008
- [4] J Lees, T Williams, S Woodington, P McGovern, S Cripps, J Benedikt, and P Tasker, "Demystifying Device related Memory Effects using Waveform Engineering and Envelope Domain Analysis," in 38th European Microwave Conference, , Amsterdam, Netherlands, October 27-31, 2008

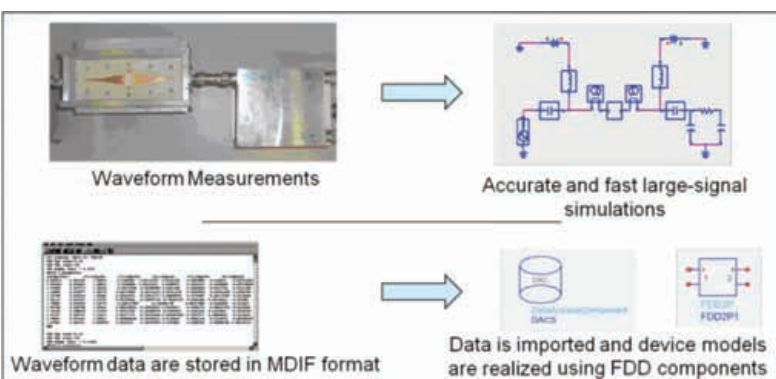


Figura 5. Flujo de trabajo para la exportación de formas de onda a las herramientas de software de EDA.

- [5] S. Woodington, T. Williams, H. Qi, D. Williams, L. Pattison, A. Patterson, J. Lees, J. Benedikt, P. J. Tasker, "A Novel Measurement Based Method Enabling Rapid Extraction of a RF Waveform Look-up Table Based Behavioral Model," in 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, Georgia, USA, June 15-20, 2008
- [6] A. Sheikh, J. Lees, J. Benedikt, P. J. Tasker, "Utilization of a Measurement Based CAD Tool for Enhanced PA Design Investigations," in 38th European Microwave Conference, , Amsterdam, Netherlands, October 27-31, 2008
- [7] C. Roff, Johannes Benedikt, Paul J. Tasker, and Mike Uren et al, "Analysis of DC-RF Dispersion in AlGaIn/GaN HFETs using RF Waveform Engineering," IEEE Transactions on Electron Devices, volume 56, issue 1, January 2009

## Autores

**Darren McCarthy** es el director de marketing técnico de RF de Tektronix a nivel mundial. Ha trabajado ampliamente en diferentes puestos de trabajo de prueba y medida durante más de 20 años, incluyendo: ingeniero de I+D, director de proyectos de I+D, planificación de productos, desarrollo de negocios y mercados. Durante su trayectoria profesional, ha representado también a EE.UU. como asesor técnico y miembro del grupo de trabajo durante ocho años en varios comités técnicos del IEC y en grupos de trabajo sobre los estándares internacionales de EMC y actualmente representa a Tektronix en varios grupos de trabajo y foros sobre estándares industriales. Sus contribuciones recientemente publicadas incluyen una amplia variedad de temas que van desde la caracterización de dispositivos no-lineales a los retos de las medidas en banda ultra-ancha.

Darren posee el título de BSEE de la Universidad Northwestern de Evanston, Illinois.

**Wally Arceneaux** es el director de ventas y marketing de Mesuro Ltd. y lidera la introducción comercial de las nuevas soluciones de medida que permiten la creación sistemática de formas de onda a las frecuencias de RF y microondas.

Durante sus 25 años de carrera, ha trabajado como ingeniero de I+D en la industria de defensa y como un especialista de marketing en el negocio de prueba y medida. A lo largo de su carrera se ha centrado en varias áreas incluyendo: diseño de antenas y radomos, radares, tecnologías de invisibilidad a radares, verificación de componentes y aplicaciones comerciales inalámbricas.

Wally posee el título de BSEE de la Universidad de Virginia Occidental y el título de MSEE de la Universidad de Florida Central.