

Artículo original

# Automatización de un banco de mediciones para caracterización a gran señal

Automation of a bank of measurements for large signal characterization

**Jorge Julián Moreno, Ph.D.**

*jorgejulian.moreno@uptc.edu.co*

**Nydia Esperanza Cely, M.Sc.(c)**

*nydia.cely@uptc.edu.co*

**Javier Francisco Rodríguez, M.Sc.(c)**

*javier.rodriguez@uptc.edu.co*

**Édison Ferney Angarita, M.Sc.(c)**

*edison.angarita@uptc.edu.co*

*Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia, Sogamoso*

.....  
*Fecha de recepción: Julio 21 de 2014*

*Fecha de aceptación: Septiembre 24 de 2014*

## **Palabras clave**

Caracterización; RF/  
Microondas; scattering;  
analizador vectorial de redes.

## **Keywords**

Characterization; RF /  
Microwave; scattering; vector  
network analyzer.

**Colciencias  
tipo 1**

*Los resultados que presenta el artículo hacen parte del proyecto de investigación Caracterización a pequeña señal de dispositivos de RF y microondas a través de un analizador vectorial de redes, requisito para optar por el título de Magister en Tecnología Informática.*

## **Resumen**

El artículo presenta una estrategia para la medición y caracterización de circuitos de Radio Frecuencia y microondas (RF/Microondas), aplicados a sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas, por medio del diseño de un software que permite capturar y controlar, de manera remota, los datos obtenidos en los equipos de medición utilizados –en este caso, un analizador vectorial de redes R&S ZVA8 y un multímetro digital DM3061–. Como evidencia, se presenta el resultado de esta estrategia a partir de la caracterización de un amplificador de potencia [PA] altamente eficiente, a una frecuencia de prueba de 2.4 GHz.

## **Abstract**

This paper shows a strategy for the measurement and characterization of Radio Frequency and Microwave circuits (RF / Microwave), which are used in modern wireless communication systems, through a designed software able to capture and control, remotely, the collected data by the measurement setup –in this case, a vector network analyzer R&S ZVA8 and a digital multimeter DM3061). As an evidence, the characterization of a high efficiency Power Amplifier [PA] has been carried out, using this strategy, at a test frequency of 2.4 GHz.

## I. Introducción

En la actualidad, los sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas requieren de un diseño exigente en sus diferentes circuitos de RF/Microondas, principalmente debido a que estos necesitan manejar señales de información a altos rangos de frecuencia y por la presencia de no linealidades en sus dispositivos. Estos circuitos se caracterizan a gran señal por sus figuras de mérito ganancia, potencia y eficiencia, y a pequeña señal por sus parámetros S, los cuales determinan el comportamiento eléctrico de redes lineales, mediante medición de ondas de tensión incidentes y reflejadas, hacia y desde los puertos de señal de los diferentes dispositivos, sean activos o pasivos (González, 1997).

Un tipo de circuito importante, para el desarrollo de sistemas inalámbricos de comunicación, es el amplificador de potencia [*Power Amplifier*, PA], ya que cumple la función de amplificar señales, previamente moduladas, para su posterior transmisión, por medio de la conversión de corriente continua en potencia de Radio Frecuencia [RF] (Raab et al., 2002).

Para la medición y caracterización de circuitos de RF/Microondas implementados en microcintas, se requiere de equipos precisos y especializados que manejen grandes rangos de frecuencia y bajo ruido. Un equipo comúnmente utilizado para tal fin es el Analizador Vectorial de Redes [*Vector Network Analyzer*, VNA], un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales. También se requiere manejar un multímetro de alta resolución, en el caso, por ejemplo, de circuitos amplificadores de potencia, debido a que es necesario medir corrientes y voltajes en el dispositivo, con el fin de calcular su eficiencia. Estas mediciones son un poco complejas, principalmente porque se necesita de una gran cantidad de datos medidos y de cálculos de los circuitos de RF/microondas para graficar sus figuras de mérito.

En el presente trabajo se muestra una posible solución para superar estos inconvenientes, con el diseño y la implementación de un software que adquiere y guarda automáticamente, en una computadora, los datos obtenidos de los equipos de medición, con el propósito de procesarlos y graficarlos fácilmente.

La estrategia propuesta de medición consiste en semi-automatizar la caracterización y el análisis de medición de ganancia, potencia y eficiencia en dispositivos RF y microondas a través de un VNA y un multímetro Rigol, apoyándose en controladores N-Visa de National Instruments [NI] y Rohde & Schwarz [R&S].

El funcionamiento se basa en la emisión de una señal de banda ancha a través de uno de sus puertos y el análisis, en el mismo puerto, de la señal reflejada para medidas de reflexión, o el análisis, en su otro puerto, de la señal transmitida para medidas de transmisión, en el dispositivo bajo prueba [DUT] (Padilla-Corral & García-Ruiz,

2010). Este instrumento, para su óptimo funcionamiento, debe ser calibrado previo a su utilización, para cada toma de medida, para así corregir los errores sistemáticos; es necesario aplicar el proceso de corrección de los parámetros de dispersión medidos, los cuales representan los parámetros de caracterización del dispositivo DUT, para luego almacenarlos en el banco de mediciones al igual que la toma de corriente y el voltaje, y graficar y comparar la construcción del circuito con el diseñado en ADS en tiempo real (López-Bonilla, 2010).

## **II. Trabajos realizados**

Un banco de pruebas es una plataforma para experimentación de proyectos de gran desarrollo. Los bancos de pruebas brindan una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible, de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías. Puede ser implementado como un entorno de pruebas, pero no necesariamente con el propósito de verificar seguridad. Un banco de pruebas se usa cuando un nuevo módulo se prueba aparte del programa al que luego será agregado.

Su, Liu, y Gao (2010) presentan un banco de mediciones para obtener medidas de un VNA utilizando GPIB, para comunicación entre un PC y dispositivos de medición, y el software del sistema en tiempo real; Leskovar (1978) muestra un sistema de mediciones o banco para las características de los dispositivos de carga; Raffo, Giacomo, Di-Member, Traverso, Santarelli, & Vannini (2009), presentan un sistema de medición automatizada para la caracterización de degradación del dispositivo electrónico en un régimen no lineal y el mejoramiento de la dotación transitoria de parámetros S de simulación de circuitos y sistemas de simulación; Griffin, Durgin, Haldi y Kippelen (2006), presentan la construcción de un banco de pruebas para antenas RFID. Mehdi, Mons, Bennadji, Ngoya, y Quere (2011), presentan una mejora en la simulación de parámetros temporales; Fu, Dussopt, Vuong, y Ndagijimana (2012) presentan un trabajo de caracterización de antenas integradas en las frecuencias de ondas milimétricas; y Mabrouk (2010) describe los requisitos de prueba de señal mixta de dispositivos RF y Microondas.

Los parámetros S son usados para redes eléctricas que operan en RF y microondas; para medir estos parámetros de un dispositivo eléctrico se implementa un estímulo de onda continua [CW] a los puertos físicos del dispositivo, y se miden, corrigen y convierten, las respuestas resultantes a sus figuras de mérito, empleando un VNA.

Como se indicó, el VNA debe ser calibrado previo a su utilización en cada medición; al respecto, Bockelman y Eisenstadt (1998) presentan, teóricamente, la calibración del analizador generalmente a un analizador de n-puertos, incluyendo la corrección de la diafonía de puerto a puerto, y muestran las normas utilizadas en la calibración y el número mínimo de estándares; de la misma manera, Rolfes, Will y Schiek (2008) presentan un trabajo de calibración de la unidad de medida para la automatización de las mediciones del VNA, mientras Zhao, Zhao, Qin, Qiang y Lu (2010), y Zhao, Zhao y Qin (2010), muestran un algoritmo de calibración del analizador vectorial de n-puertos,

utilizando la ecuación general de nodo y la calibración del VNA de tres puertos con el modelo general *6-term error*.

Bianco et al., (1976) implementó un módulo de medición de parámetros S para las bandas de telefonía móvil celular en el rango de 0,8 a 2 GHz, que cumple con las características propias de un VNA; este módulo junto con el generador constituye un instrumento independiente para su uso en mediciones de laboratorio, líneas de producción y calibración en la industria electrónica. Ishida, Yamaguchi, Ishizaki, y Awai (2012), por su parte, presentan una técnica novedosa de medición, describiendo la potencia transmitida y la eficiencia, calculado por parámetros S a través de un VNA; y Ferrero, Garelli, Grossman, Choon y Tepatti (2011), muestra la perplejidad de la medición de los parámetros S en radio frecuencias; usualmente se hacen estudios detallados de uno y dos puertos de un sistema de medición, pero este se centra en la investigación de parámetros S multipuerto en analizadores de redes vectoriales, haciendo comparaciones entre los laboratorios y los grandes instrumentos de prueba de escala.

### III. Conceptos básicos de amplificadores de potencia

Un proceso simple de transmisión se puede esquematizar como se muestra en la Figura 1, en este, se requiere amplificar señales previamente moduladas para luego ser transmitidas por una antena. Esta función la cumple el amplificador de potencia, el cual, principalmente, convierte corriente continua en potencia RF.

Un amplificador de potencia se caracteriza principalmente por tres figuras de mérito: Ganancia [Gain], relacionada directamente con la potencia de la señal a transmitir; Potencia de Salida [Pout], usada para observar la potencia de salida máxima que se obtiene del amplificador; y Eficiencia [ $\eta$  (%)], que corresponde a la relación entre la potencia de salida y la potencia DC que alimenta el amplificador (Colantonio, Gianini, & Limiti, 2009).

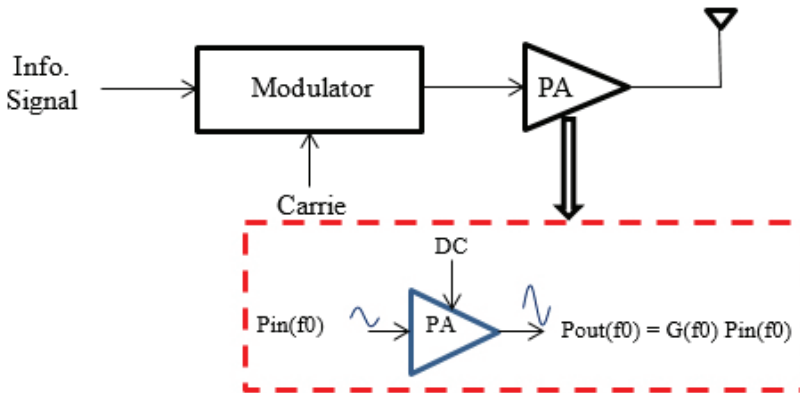


Figura 1. Esquema simple de transmisión

### A. Analizador vectorial de redes

El VNA es uno de los instrumentos modernos para medición de dispositivos y componentes en alta frecuencia; es capaz de medir módulo y fase de componentes, retardo de grupo e impedancia de puertos graficado en diagrama de Smith; utiliza métodos de calibración complejos para disminuir errores de método y tiene la capacidad de manejar el dominio temporal [TDR]; permite además detectar desfases remotas o fallas a distancia.

El VNA utilizado para esta investigación es Rohde & Schwarz ZVB 8, el cual tiene un ancho de banda de operación que va desde los 300KHz a los 8GHz, con una resolución de 1Hz; realiza mediciones universales sobre componentes pasivos y activos. La Tabla 1 presenta sus características.

El VNA cuenta con un generador de señales de RF que se utiliza como estímulo para el dispositivo bajo prueba DUT, y contiene múltiples receptores de medida que censan las señales incidentes, reflejadas y transmitidas en sentido directo e inverso de la señal. Incorpora dos puertos de prueba, ya que, por lo general, un DUT tiene entre uno y dos puertos.

### B. Multímetro digital DM3061

El multímetro es un instrumento para medición de magnitudes tales como resistencia, corrientes en corriente alterna [AC] y corriente continua [DC], voltajes en AC y DC, frecuencia, temperatura, continuidad, capacitancia. El Rigol DM3061 es un equipo diseñado especialmente para realizar medidas de alta precisión, multifuncionales y automáticas. Permite la combinación de funciones básicas de medida con múltiples funciones matemáticas, así como una función de medida aleatoria con sensor. Soporta interfaces como RS-232 y USB. La Tabla 2 presenta sus características.

.....

**Tabla 1.** Características R&S ZVB 8

Precisión de frecuencia	$8 \times 10^{-6}$
Rango de frecuencia	300 kHz - 8 GHz
Resolución de frecuencia	1 Hz
Impedancia de Salida	50 ohm
Rango de potencia de salida	13 dBm - 123 dBm
Resolución de Salida	0,01 dB
Rango de barrido de potencia	50 dB
Tipo de VNA	2 Puertos
Tiempo de medición	4.5 ms por 201 puntos
Conmutación entre canales	1 ms
Conmutación entre configuraciones	10 ms
Tiempo de transferencia de datos	0.7 ms (201 puntos vía RSIB)

**Tabla 2.** Características multímetro Rigol DM3061

Velocidad medida	2.5, 20 y 120
Rango de tensión DC	Entre 200mv y 1000V
Rango de corriente DC	Entre 200uA y 10A.
True-RMS, rango de tensión AC	Entre 200mV y 750V
True-RMS, rango de corriente AC	Entre 20mA y 10A
Rango de resistencias	Entre 200Ω y 100MΩ
Rango de frecuencia	Entre 20Hz y 1MHz
Suporte remoto	USB, RS-232

#### **IV. Proceso para la toma de medidas en el laboratorio**

El propósito del banco de mediciones es capturar y sincronizar los datos en tiempo real de los instrumentos VNA y multímetro; la adquisición de estas medidas de espectro de microondas y voltaje, optimizan los procesos de toma de datos manual, lo que permite reducir considerablemente el tiempo requerido para la obtención de resultados.

El proceso de medición manual para la caracterización de circuitos de RF/Microondas (en este caso un amplificador de potencia) consiste en obtener los parámetros S dados por el VNA, donde se observa el comportamiento del circuito a pequeña señal para diferentes valores de frecuencia y sus características en potencia como ganancia, potencia de salida y eficiencia.

Para obtener las figuras de mérito del amplificador, se lleva a cabo el siguiente proceso: se calibra el VNA a una frecuencia o banda de frecuencia específica (frecuencia a la que fue diseñado el circuito) con diferentes valores de potencia; esta señal ingresa al circuito amplificador; a su vez, se mide la potencia de salida con otro canal del VNA. Paralelamente se mide con el multímetro la corriente que pasa a través del dispositivo del circuito, para así poder calcular la eficiencia del amplificador. Este proceso podría ser demorado si se hace manualmente, punto a punto, los valores de potencia de salida y corriente, para cada valor de potencia de entrada, y posteriormente hacer los cálculos correspondientes. En cambio, con la estrategia de diseño propuesta, mediante el control remoto de los equipos por medio del software, se puede adquirir, guardar, procesar y graficar automáticamente estos datos, disminuyendo considerablemente el tiempo utilizado para medir y trazar resultados.

Una razón importante en el desarrollo del software es ofrecer ventajas como: la captura en tiempo real entregados por el VNA y las variables de voltaje y corriente de los circuitos de RF y microondas, para compararlos con los datos obtenidos en el diseño generado por el simulador ADSL; la reducción del tiempo de medición, permitiendo superar dificultades de toma de datos erróneos; la captura de datos de forma inmediata y personal (que permite la manipulación de los instrumentos a través de un equipo de cómputo externo); y el desarrollo de habilidades como la comprensión y el análisis

de las gráficas de potencia, eficiencia y ganancia de los circuitos de RF/Microondas. Resumiendo, el desarrollo del software facilita la adquisición de datos, disminuyendo los tiempos de toma de medidas y elaboración de gráficas de las variables, facilitando la comparación de los modelos simulados y el desarrollo real del circuito.

Con la puesta en marcha del software se mejora la tediosa cantidad de veces que se tuviera que repetir la medición, lo que hace que el software sea dinámico y funcional en el proceso de caracterizar dispositivos de RF y microondas.

Los instrumentos utilizados para la toma de mediciones se conectan de la siguiente manera: El VNA se conecta a la computadora por medio de un cable cruzado UTP, utilizando el protocolo TCP/IP; el otro dispositivo de medición, el multímetro, se conecta con una interfaz USB, como se muestra en la Figura 2. La conexión USB es un bus de comunicación basado en mensajes, esto significa que una PC y un dispositivo USB se comunican enviando comandos y datos a través del bus en forma de texto o datos binarios

La conexión y comunicación entre los dispositivos mencionados se apoya en el controlador NI\_VISA, el cual permite utilizar funciones de lectura y escritura, enviando comandos al instrumento, y leer la respuesta del mismo. NI-VISA es la Arquitectura de Software Virtual (VISA), un estándar para la configuración de sistemas de programación y resolución de problemas de instrumentación que comprenden GPIB, VXI, PXI, Serial, Ethernet y / o interfaces USB (NI, s.f).

La comunicación del instrumento VNA con la computadora es Ethernet, una tecnología madura, ampliamente utilizada para sistemas de medición en muchas capacidades, que incluye la creación de redes en general y el almacenamiento de datos a distancia. Ethernet ofrece una opción para el control del instrumento debido a su flexibilidad. La conectividad a través de Ethernet permite controlar el instrumento desde cualquier punto de la red a la que está conectado. Ethernet, definido por el estándar IEEE 802.3, ofrece configuraciones de red que proporcionan tasas teóricas de transferencia de datos de 10 Mb / s (10BaseT), 100 Mb / s (100BaseTX) y 1 Gb / s (1000BaseT).

Una razón fundamental de la gran popularidad de Ethernet en el control del instrumento es que la mayoría de empresas y laboratorios cuentan con redes Ethernet existentes, disponibles para el control de instrumentos. LXI es un nuevo estándar construida en el protocolo Ethernet, desarrollado para implementar la sincronización de instrumentos distribuidos (NI, 2014).

El multímetro está conectado por el protocolo *USB Test and Measurement Class* (USBTMC) y utiliza la clase de recursos USB INSTR. Los dispositivos USBTMC cumplen con un protocolo que la clase de recursos USB INSTR de VISA puede entender. No se necesita ninguna configuración para comunicarse con un dispositivo USBTMC. La aplicación se desarrolló en Visual (ver Figura 3).

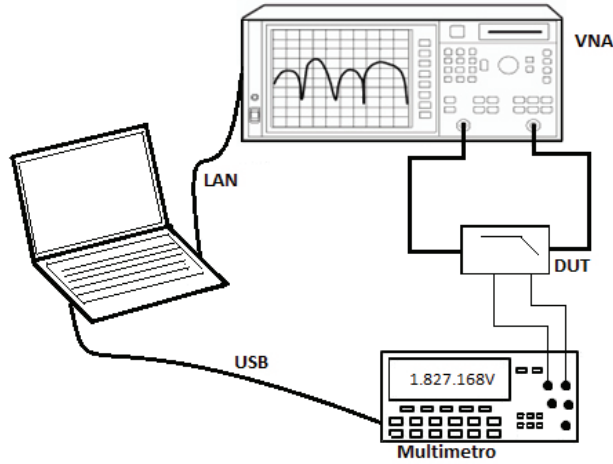


Figura 2. Conexión de los instrumentos con el PC en el laboratorio

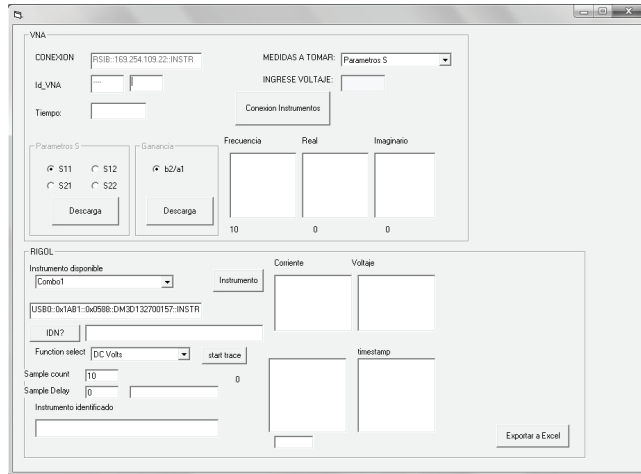


Figura 3. Ventana de control y captura del VNA

## V. Estrategia de medición

Después de comprobar las conexiones entre los equipos, se procede a ejecutar la aplicación desarrollada; se verifica que el software tenga comunicación con los instrumentos, identificando la dirección IP de la PC cliente donde está instalada la aplicación, con respecto al equipo servidor, el cual tiene instalado el software del VNA y la conexión USB con el multímetro. Con la interfaz se tiene control de captura de las siguientes ondas: a1, onda incidente en el puerto 1; a2, onda incidente en el puerto 2; b1, onda reflejada en el puerto 1; b2, onda reflejada en el puerto 2.

La captura de los datos del VNA se toma en formato CSV y contiene tres columnas, el barrido en frecuencia, la parte imaginaria y la parte real; la captura de los datos



del multímetro en formato TXT, corresponden al barrido de corriente a un voltaje constante, datos que se extraen a un archivo en Excel y luego se integran y se plantean las respectivas fórmulas para hallar: magnitud, fase, razón de onda de voltaje estacionario (VSWR) y posteriormente graficar. Esta información obtenida permite generar resultados y graficas en tiempo real de los comportamientos del circuito y, de este modo, compararlos con lo que se diseñó en ADS.

## VI. Resultados

La Figura 4 presenta el resultado de la prueba realizada. Como se puede observar, bajo el método desarrollado en este artículo, se obtienen automáticamente las figuras de mérito para un amplificador de potencia clase F a una frecuencia de 2.4GHz (el amplificador fue diseñado e implementado por el grupo GINTEL de la UPTC).

La Figura 4 permite apreciar las figuras de mérito del amplificador, esto es: ganancia, Gain(dB); potencia de salida, Pout(dB); y eficiencia, DC\_to\_RF(%); para un barrido de potencia de entrada, PAv(dB).

Cabe resaltar que este resultado se obtuvo en un tiempo inferior a un minuto, lo que claramente contrasta con el tiempo que habría tomado realizar este proceso manualmente, el cual ya no se mediría en segundos, como el caso actual, sino en horas, lo que ilustra con claridad las bondades del proyecto.

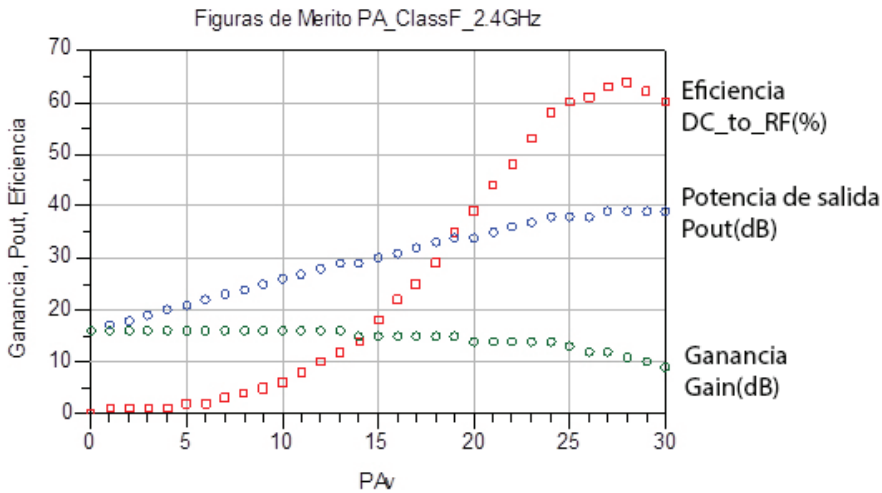


Figura 4. Figuras de mérito para un amplificador de potencia clase F a una frecuencia de 2.4GHz

## Conclusiones

Se desarrolló una estrategia de medición y caracterización de circuitos de RF/Microondas, por medio del diseño e implementación de un software que sincroniza y controla remotamente los equipos de medición. El software disminuye substancialmente el tiempo utilizado para caracterizar esta clase de circuitos, debido a la automatización del proceso, lo que se puede comprobar con los resultados mostrados en la Figura 4, resultados que como se dijo, fueron obtenidos en menos de un minuto.

Desarrollar un software que capture los datos de los dos instrumentos –y que estos se integren– es el objetivo de la investigación. Se concluye que el sistema operativo y las versiones que se utilizan en el software son importantes al momento de desarrollar las aplicaciones. La investigación aprovecha la tecnología de desarrollo de Microsoft, como Visual, y controladores NI\_VISA, para desarrollar la aplicación que integre tecnologías de R&S y Rigol. *sm*

## Referencias bibliográficas

- Bockelman, D.E. & Eisenstadt, W.R. (1998). Calibration and verification of the pure-mode vector network analyzer. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(7), 1009-1012.
- Colantonio, P., Gianini, F., Limiti, E. (2009). High efficiency RF and microwave solid state power Amplifiers. Chichester, UK: Wiley.
- Ferrero, A., Garelli, A., Grossman, B., Choon, S., & Teppati, V. (2011). Uncertainty in multiport S-parameters measurements. In *2011 77th ARFTG Microwave Measurement Conference: Design and Measurement of Microwave Systems, ARFTG 2011*, (paper3.3). Piscataway, NJ: IEEE.
- Fu, Y., Dussopt, L., Vuong, T.P., & Ndagijimana, F. (2012). Characterization of integrated antennas at millimeter-wave frequencies. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 4(1), 15.22.
- González, G. (1997). *Microwave transistor amplifiers, analyses and design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Griffin, J. D., Durgin, G. D., Haldi, A. & Kippelen, B. (2006). How to construct a test bed for RFID antenna measurements. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006*, (pp. 457-460). Piscataway, NJ: IEEE.
- IEEE (2013). *IEEE 802.3. Ethernet*. Retrieved from <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>
- Ishida, T., Yamaguchi, K., Ishizaki, T., & Awai, I. (2012). FRI-H-4 Novel measurement technique of WPT circuits using VNA and its data Transformation into

- 0-ohm System. In *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS)*, 2012, (pp. 231–234). Piscataway NJ: IEEE.
- Leskovar, B. (1978). *Charge-coupled device high-frequency drivers and testing instruments* [Report to US Department of Energy under Contract W-7405-ENG-48]. Available at <https://publications.lbl.gov/islandora/object/ir%3A106393>
- Linares y Miranda, R., González-Jaimes, H.E., & López-Bonilla, J. (2010). Una propuesta didáctica para la caracterización de dispositivos y redes eléctricas de radiofrecuencia en la banda de 100 khz a 500 mhz. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 18(3), 295-301.
- Mabrouk, M. (2010). RF and microwave production test requirements for advanced mixed-signal devices. In *2010 11th Latin American Test Workshop (LATW)*, (pp.1-4) . Piscataway NJ: IEEE.
- Mehdi, H., Mons, S., Bennadji, A., Ngoya, E., & Quere, R. (2011). Improvement of the envelope - Transient S-parameters' simulation in circuit and system simulation. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 3(6), 657-665.
- National Instruments [NI] (s.f). *Guía sobre control de instrumentos por USB*, [on line]. Retrieved from <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/ictrl/lang/es/pg/1/sn/n17:ictrl,n21:25/fmid/6000/>
- National Instruments [NI]. (2013, August 21<sup>th</sup>). *Understanding LAN / LXI for Instrument Control* [on line]. Retrieved from <http://www.ni.com/white-paper/2922/en/>
- Padilla-Corral, S., & García-Ruiz, I. (2010). Estimación de la incertidumbre de la medición de un analizador vectorial de redes. Simposio de Metrología, 2010 (S3-D31) [on line]. Retrieved from <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pjueves/sm2010-jp04d.pdf>
- Raab, F.H., et al. (2002). Power amplifiers and transmitters for RF and microwave. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 814-826.
- Raffo, A., Giacomo, V. Di, Member, S., Traverso, P. A., Santarelli, A., & Vannini, G. (2009). An automated measurement system for the characterization of electron device degradation under nonlinear dynamic regime. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(8), 2663-2670.
- Rolfes, I., Will, B., & Schiek, B. (2008). Calibration-measurement unit for the automation of vector network analyzer measurements. *Advances in Radio Science*, 6, 27-30.
- Su, Y., Liu, L., & Gao, K. (2010). Research of an Automatic RF Devices Characteristic Test Bench for DC and Scattering Parameters Measurement. In *2010 2<sup>nd</sup> International Conference on Information Engineering and Computer Science*, (pp.1-4). Piscataway, NJ: IEEE

Zhao, W., Zhao, Y.-J., & Qin, H.-B. (2010). Calibration of the three-port VNA using the general 6-term error model. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24(2-3), 319-326.

Zhao, W., Zhao, Y.-J., Qin, H.-B., Qiang, L., & Liu, B. (2010). Calibration algorithm of the n-port vector network analyzer using the general node equation. *IET Science, Measurement & Technology*, 4(6), 298-302.

## **Currículum vitae**

### **Jorge Julián Moreno Rubio**

Doctor en Dispositivos Electrónicos (2011) de la Universidad Politécnico Di Torino (Italia) y Máster en Ingeniería Electrónica (2006) de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia). En la actualidad es el Coordinador de la Maestría de Ingeniería y Director del grupo de investigación en telecomunicaciones [GINTEL] de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

### **Nydia Esperanza Cely Angarita**

Candidato a Magister en Tecnología Informática de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC] (Tunja, Colombia) e Ingeniera de Sistemas de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia [UNAD] (Sogamoso, Colombia, 2008).

### **Javier Francisco Rodríguez Mora**

Candidato a Magister en Tecnología Informática de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC] (Tunja, Colombia) e Ingeniero de Sistemas de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD (Sogamoso, Colombia, 2008).

### **Édison Angarita**

Ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC].

Joven investigador del grupo de investigación en telecomunicaciones [GINTEL].

Actualmente adelanta sus estudios de maestría y se desempeña en la investigación de circuitos de radio frecuencia y microondas, en el marco del uso eficiente de la energía para sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas.