

# INTRODUCCION A LAS MEDICIONES EN RADIOFRECUENCIAS EN LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN

Israel García Ruiz

Centro Nacional de Metrología, (CENAM), Div. de Mediciones Electromagnéticas  
Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Qro. 76241 México,  
Tel: (442)2110500 Ext 3451, Fax: 2153904, e-mail: [igarcia@cenam.mx](mailto:igarcia@cenam.mx)

## Resumen

A pesar que las telecomunicaciones son un sector que ha experimentado un crecimiento continuo en nuestro país en los últimos años, no ha habido un crecimiento similar en el número de laboratorios de calibración con capacidades para magnitudes en el campo de las radiofrecuencias. El desarrollo ha sido escaso y los pocos laboratorios que existen tienen alcances limitados y manifiestan un profundo desconocimiento de los principios físicos que gobiernan los fenómenos que existen en radiofrecuencias así como de los métodos y prácticas de medición que exige la metrología en radiofrecuencias. Por lo tanto, este campo sigue representando un área de oportunidad y de desarrollo en nuestro país. En este trabajo se describen principios básicos y consideraciones prácticas que deben tomarse en cuenta por lo interesados en la metrología en radiofrecuencias.

### 1. El espectro radioeléctrico

Cuando hablamos de señales de radiofrecuencia (RF), nos referimos a señales en corriente alterna (c.a.) con frecuencias por arriba de 3 kHz y cuyo límite superior es de 300 GHz. El límite inferior está establecido de forma natural debido a que, a partir de aproximadamente 3 kHz, al aplicar una señal alterna a una antena se produce los fenómenos de radiación de y propagación a través del aire. Por arriba de 300 GHz existe una ventana de absorción de la atmósfera en la que prácticamente no hay propagación. A este intervalo de frecuencias se le conoce también como espectro radioeléctrico.

Debido a esto, una de las aplicaciones más generalizadas de las señales de radiofrecuencia es en los sistemas de radiocomunicación. Otras aplicaciones que existen son el calentamiento de materiales, telemetría y detección remota, sistemas de radar, etc.

El espectro radioeléctrico se ha dividido en bandas de frecuencias cuya nomenclatura y límites ha obedecido la mayoría de las veces a razones históricas y tecnológicas. En general, pueden identificarse tres regiones del espectro radioeléctrico: 1) las frecuencias por debajo de 3 GHz conocidas tradicionalmente como radiofrecuencias, 2) las frecuencias entre 3 GHz y 30 GHz conocidas como microondas y 3) las frecuencias entre 30 GHz y 300 GHz que se conocen como ondas milimétricas. En realidad todas las ondas electromagnéticas con frecuencias dentro de estas regiones son de

radiofrecuencia por la razón que ya se mencionó con anterioridad.

### 2. Introducción a la metrología en RF

Desde el punto de vista de la metrología, el tratamiento de las señales de radiofrecuencia es diferente al de las señales de frecuencia cero o de corriente continua (c.c.). En c.c. las magnitudes de base son la tensión eléctrica, la corriente eléctrica y la resistencia. En cambio, en radiofrecuencias las magnitudes de base son la potencia y la impedancia.

De la misma forma que en c.c. existen factores a tomar en cuenta por su impacto en la exactitud de las mediciones, en radiofrecuencias también existen cuidados que deben observarse en el trabajo metrológico, estos no necesariamente existen en c.c. y que por lo tanto pueden ser desconocidos para el metrólogo. Ejemplo de estos son la respuesta en frecuencia de los accesorios, componentes y equipos, las pérdidas en líneas de transmisión o cables de interconexión, las reflexiones por discontinuidades y cambios de impedancias en las conexiones, la repetibilidad de conexiones, etc.

En realidad, las leyes que gobiernan los fenómenos en c.c. y los de c.a. en radiofrecuencias son las mismas, siendo los de c.c. casos particulares de los de c.a. a radiofrecuencias. Por ejemplo, la Ley de Ohm, cuya forma más conocida es  $V = IR$  donde  $V$  es tensión eléctrica,  $I$  es corriente eléctrica y  $R$  es resistencia eléctrica, en c.a. se expresa como  $\vec{V} = \vec{I} \cdot \vec{Z}$ . Nótese que ahora  $\vec{V}$  e  $\vec{I}$  son fasores de

tensión y de corriente, respectivamente, es decir son cantidades complejas que tienen un módulo y una fase. De la misma forma  $Z$  es la impedancia compleja a la frecuencia de interés. Si se tiene una línea de transmisión, esta forma fasorial de la ley de Ohm se viene abajo debido a los fenómenos de reflexión de señal. Cuando una señal penetra a una línea de transmisión o a cualquier otro componente de radiofrecuencia, la señal aplicada se descompone en porciones que viajan hacia adelante y hacia atrás, esto es, se dispersa. Estos fenómenos de reflexión y transmisión, esto es, de dispersión, son de suma importancia en radiofrecuencia y son generalmente desconocidos por personal técnico acostumbrado sólo a trabajar en c.c.

### 3. Instrumentación para RF

Existe una gran variedad de instrumentos y equipos que operan en radiofrecuencias, los cuales pueden clasificarse de manera general como: generadores de señal, medidores de señal, acopladores y transductores. Muchos instrumentos modernos incorporan uno o más de estos elementos. Ejemplos de generadores de señal son los generadores de onda continua sinusoidal (CW), generadores de señales analógicas moduladas ya sea en amplitud, fase o frecuencia, generadores de señales digitales, generadores de pulsos, etc. Ejemplos de medidores de señal son los medidores de potencia con detector de diodo, termopar o termistor, los analizadores de espectro, los wáttmetros analógicos, etc. Los acopladores permiten llevar la señal guiada de un punto del circuito a otro, por ejemplo, las líneas de transmisión coaxial, las guías de onda huecas, los conectores coaxiales, los adaptadores coaxiales de una misma familia o de una familia a otra, los acopladores direccionales, etc. Los transductores tienen como función transformar señales de RF de un tipo a otro, por ejemplo, las antenas transforman las señales guiadas por una línea de transmisión a señales radiadas en el espacio y viceversa.

El trabajo de metrología en radiofrecuencias está enfocado principalmente a la calibración de instrumentos y equipos de medición y generación, así como a la caracterización de las propiedades de acopladores y de los transductores.

a) Calibración de generadores de señal. Existen para muy diversos intervalos de frecuencia y amplitud. Actualmente, por ejemplo, están incorporados en calibradores multifunción para producir señales de CW de frecuencias de hasta unos 600 MHz. Otros generadores de baja frecuencia cubren el intervalo desde unos cuantos kHz hasta alrededor de los 1000 MHz. Los generadores y sintetizadores de microondas cubren frecuencias que

van desde los 10 MHz hasta 18 GHz, 26.5 GHz o más. Los generadores hasta 18 GHz generalmente tienen un conector de salida tipo N de precisión, los que cubren hasta 26.5 GHz poseen conector GPC3.5 y los de más alta frecuencia emplean conectores aun más pequeños.

Los patrones de potencia que se emplean en la calibración de generadores cubren un intervalo de frecuencias a partir de los 10 MHz. Por debajo de esta frecuencia, la trazabilidad de estas mediciones es hacia patrones de tensión en c.a. y tensión de RF tales como los termoconvertidores. Debido a que la indicación de la señal de salida de un generador puede darse en watts o en volts, puede ser necesario realizar conversiones entre estas magnitudes. La relación que se emplea es  $P = V^2/R$  donde  $P$  es potencia,  $V$  es la tensión y  $R$  la parte real de la impedancia. Generalmente el valor de  $R$  que se asume es de 50 ohms; sin embargo, esta suposición puede ocasionar errores muy grandes ya que el valor depende de la calidad de los instrumentos y de la frecuencia. La forma más segura es determinar experimentalmente el valor y usar el valor obtenido, de otra forma es necesario incorporar una componente de incertidumbre por el desconocimiento de la impedancia, cuya contribución puede ser grande.

Una cuestión fundamental en la calibración de generadores es que existe una potencia máxima disponible en el generador la cual es diferente de la potencia transferida del generador al medidor. Esta potencia transferida puede cambiar de un medidor a otro aun cuando estos se conecten al mismo generador. Esto se debe a que el generador puede interactuar de manera diferente con un generador y con otro, esta interacción se conoce como desacoplamiento y es un factor de corrección que debe aplicarse en las calibraciones de potencia. El factor de corrección por desacoplamiento depende básicamente de los coeficientes de reflexión de salida de los generadores y del coeficiente de reflexión de entrada del sensor. Es un término complejo ya que los coeficientes de reflexión lo son. De ahí la importancia de que en la calibración de un medidor de potencia y su sensor, se determine también el coeficiente de reflexión de entrada. Si no se dispone del valor calibrado de coeficiente de reflexión, pueden emplearse las especificaciones del fabricante, generalmente dadas en términos de VSWR máximo, pero esto sólo permite hacer una estimación de los errores máximos esperados que deben traducirse en componentes de incertidumbre. Por otra parte, generalmente las especificaciones son muy holgadas, lo cual lleva a una sobrestimación de dichas componentes de incertidumbre.

Es importante destacar que aun cuando se requiere del coeficiente de reflexión de salida del generador, en la práctica no es sencillo evaluarlo ya que se trata de un componente activo que saca señal por el mismo puerto de prueba. Deben aplicarse otros métodos tales como el empleo de acopladores direccionales, si es que se desea tener una estimación muy cercana del coeficiente de reflexión del generador.

b) Calibración de medidores de potencia.

Las mismas consideraciones del párrafo anterior aplican cuando se tiene un generador calibrado y se emplea como patrón para calibrar medidores de potencia.

Si se requiere calibrar un medidor de potencia por comparación contra otro medidor de potencia calibrado, debe tenerse cuidado de evitar la práctica común en c.c. del empleo de adaptadores tipo "T". Los adaptadores tipo "T" son componentes mecánicos que se emplean en c.c. por ejemplo, para derivar una señal en dos salidas, o para hacer que dos instrumentos estén "viendo" al mismo tiempo la misma salida. Esto no funciona en radiofrecuencia ya que, como se ha señalado, las consideraciones de impedancia y los desacoplamientos son fundamentales y de no observarse, provocan errores inaceptablemente grandes. El equivalente a una "T" de c.c. puede lograrse en RF a través del empleo de divisores de potencia del tipo "*power splitter*" (no *power divider*), acopladores direccionales o componentes similares. Un divisor de potencia colocado a la salida de un generador permite conservar en buena medida los acoplamientos de impedancia con los medidores conectados a sus salidas. Un asunto importante de resaltar es que en componentes de RF con multipuertos, las salidas no utilizadas siempre deben terminarse en la impedancia característica del sistema (generalmente 50 ohms), de lo contrario, las reflexiones que se producen provocan variaciones en el comportamiento del resto de los puertos por desacoplamiento de impedancias.

c) Componentes acopladores.

En metrología de RF pocas veces es posible realizar una conexión directa entre el instrumento de referencia o patrón y el equipo bajo calibración. Generalmente es necesario el empleo de líneas de transmisión o cables de conexión, adaptadores coaxiales, adaptadores de impedancia, filtros, atenuadores, etc. Todos estos elementos tienen un determinado comportamiento que varía con la frecuencia, el cual se manifiesta en cambios en la amplitud de las señales de prueba y en el grado de reflexiones o desacoplamientos que pueden producir. Por ejemplo, las líneas de transmisión coaxiales son elementos que pueden tener altas pérdidas, mismas que varían con la frecuencia, con la calidad de los

materiales y con la longitud. Para metrología de RF deben emplearse cables preferentemente cortos, de alta calidad, y dentro del intervalo de frecuencias para el cual están especificados. Generalmente, conforme aumenta la frecuencia se requieren de diámetros más delgados ya que con ello se evita la aparición de modos de orden superior y se incrementa la frecuencia de corte. Otras características importantes pueden ser la capacidad del blindaje del cable y su velocidad de propagación.

Los conectores que se empleen en estos cables, o en cualquier otro componente o equipo de radiofrecuencia, deben ser los adecuados para la aplicación en particular. Existen conectores que, si bien permiten un apareamiento mecánico entre dos componentes, no necesariamente producen un buen acoplamiento eléctrico. La calidad del conector está asociada a su costo, por lo que si un conector coaxial cuesta unos cuantos pesos, lo más seguro es que sea de muy mala calidad, un buen conector tiene un costo de alrededor de los 100 dólares. Dentro de una misma familia de conectores, por ejemplo Tipo N, existen varias calidades que dependen de la aplicación en particular. De esta forma, existen conectores N que escasamente funcionan hasta unos 3 o 4 GHz, otros hasta alrededor de los 10 u 11 GHz y los de alto desempeño pueden llegar hasta los 18 GHz. La calidad de los materiales y las tolerancias mecánicas pueden variar significativamente, un conector de alta calidad tiene tolerancias muy estrictas en tanto que en el de baja calidad son muy holgadas. Por lo tanto, debe evitarse aparear dos conectores de diferentes calidades aunque sean de la misma familia ya que lo más probable es que el de alta calidad sufra un daño irreversible que empobrecerá su desempeño en frecuencia.

Existen algunas familias de conectores de microondas en los que algunas de sus dimensiones son similares, tales como el SMA; GPC3.5, 2.92 mm, etc. y hay una tentación natural de aparear estos conectores, por ejemplo SMA con GPC3.5 mm. De hecho es una práctica muy común, producto de la ignorancia. Esto debe evitarse rotundamente, ya que la calidad de un conector como el GPC 3.5 mm es infinitamente superior al SMA que es de propósito general. Las tolerancias mecánicas del GPC3.5 mm son muy estrictas y si se aparea con un SMA lo más probable es que sufra un daño irreversible en la primera conexión. Un buen instrumento o equipo de radiofrecuencia puede verse degradado significativamente en su calidad metrológica por el simple hecho de haber realizado una conexión inadecuada.

La única forma de conocer de una forma cuantitativa y realista sobre las características de un componente acoplador, ya se trate de un cable, un conector,

adaptador, etc. es midiendo estas características en un laboratorio de metrología. Este campo de la metrología de radiofrecuencias es muy interesante y de mucha utilidad. Para describir el comportamiento de cualquiera de estos elementos se requieren conocer fundamentalmente sus propiedades de reflexión y transmisión. A este campo se le conoce como análisis de redes. Una red es un dispositivo o componente que puede tener uno, dos o más puertos de entrada o de salida. Por ejemplo, un cable tiene dos puertos, un divisor de potencia simple tiene tres, etc. Las propiedades de reflexión y transmisión indican cual es la respuesta, en función de la frecuencia, que tiene un componente; esto es, si se le aplica una señal de prueba en uno de sus puertos de entrada, se puede conocer cuanto de esta señal se va a transferir hacia el o los puertos de salida y cuanto de esta señal se va a regresar o reflejar hacia el mismo puerto de entrada. Las propiedades de transmisión están asociadas a la atenuación, pérdidas por inserción o a la amplificación de un componente en tanto que las propiedades de reflexión están asociadas a su impedancia.

En mediciones en radiofrecuencias siempre se habla de una impedancia de referencia, la cual generalmente es de 50 ohms. Otros valores de impedancia característica son 75 ohms, 125 ohms, 150 ohms y 600 ohms, que se emplean en frecuencias relativamente bajas y son propios de algunos sistemas de comunicaciones. Por ejemplo, 75 ohms es la impedancia que se emplea en sistemas de distribución de televisión por cable. La impedancia característica es una propiedad de las líneas de transmisión. Una línea de transmisión tiene una impedancia de entrada que es la relación entre la tensión y la corriente eléctrica que aparecerían en su puerto de entrada  $Z_i = \bar{V}_i / \bar{I}_i$ , así como una impedancia de salida que sería la relación entre la tensión y la corriente en el puerto de salida:  $Z_o = \bar{V}_o / \bar{I}_o$ . La impedancia característica  $Z_0$  es la que se tendría para una línea infinitamente larga. Es un valor que se emplea como referencia en los componentes, equipos y sistemas de radiofrecuencia. Algunos parámetros tales como el acoplamiento de impedancias dependen de ello; en radiofrecuencia el concepto de acoplamiento más utilizado es el de acoplamiento a impedancia característica, los sistemas se diseñan para tener impedancias de entrada o salida lo más parecidos a la impedancia característica. El acoplamiento a impedancia característica es no reflectivo, lo cual significa que si se conectan entre si dos componentes con impedancia de entrada y salida, respectivamente, igual a impedancia característica, no existe reflexión de energía.

Cuando se evalúa el coeficiente de reflexión de entrada o salida de un componente o equipo, se

determina qué tan diferente es este valor con respecto al valor de referencia, esto es, a la impedancia característica. La impedancia característica es un escalar, por lo tanto un componente será menos reflectivo mientras su valor de impedancia se parezca más a la impedancia característica y con parte imaginaria cercana a cero.

La calidad y estado físico de componentes y equipos de radiofrecuencia están asociados al coeficiente de reflexión. Un componente de alta calidad y en buen estado tiene coeficiente de reflexión pequeño, en tanto que componentes de baja calidad o en un estado físico inadecuado, produce coeficientes de reflexión grandes, por lo tanto desacoplamientos de impedancia grandes, que se traducen en errores de medición grandes. El mantenimiento y cuidados que deben observarse en componentes y equipos de radiofrecuencia implican, entre otras cosas, mantener los coeficientes de reflexión de entrada y salida lo más bajos posibles.

#### 4. Conclusiones

Las mediciones en radiofrecuencia y microondas son un campo amplio e interesante de la metrología eléctrica. Pocos laboratorios en nuestro país han incursionado en este ámbito. Existe mucho desconocimiento en cuanto a los principios físicos y consideraciones prácticas que deberían entenderse antes de involucrarse en esta área de la metrología. Una gran cantidad de equipos de medición de radiofrecuencias carece de servicios de inspección, verificación y calibración adecuados; los usuarios en muchos casos tienen que recurrir a laboratorios de calibración en el extranjero. Las mediciones en radiofrecuencia representan un reto y una oportunidad de desarrollo de la metrología en nuestro país.