

ESTABLECIMIENTO DEL SERVICIO DE CALIBRACIÓN DE GENERADORES Y MEDIDORES DE AM EN EL CENAM

V. Molina-López, I. García-Ruíz

División de Mediciones Electromagnéticas, Centro Nacional de Metrología, (CENAM)

km 4,5 Carr. a los Cués, El Marqués, Qro. CP 76241, Querétaro, México

Tel: 01 442 2110500 ext. 3450 Fax: 01442 2110548 Email: vmolina@cenam.mx

Resumen: En este artículo se describen los sistemas de medición establecidos en el CENAM para la calibración de equipo que genera y mide señales de amplitud modulada (AM). En estos sistemas, la calibración puede realizarse en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o empleando la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). Este trabajo pretende difundir los conocimientos adquiridos en la especialidad, tanto a laboratorios involucrados en la calibración de este tipo de instrumentos, como a usuarios. Las características de AM, la descripción de los sistemas y métodos de medición, así como la comparación entre ellos, son presentadas en el artículo.

SOLICITUD DE SERVICIOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO QUE GENERA Y MIDE MODULACIÓN

Un porcentaje considerable de los servicios de calibración solicitados en los últimos años al Laboratorio de Alta Frecuencia del CENAM, se refiere a la calibración de instrumentos que miden o generan modulación analógica (modulación en amplitud, en frecuencia y fase) o algunos tipos de modulación digital, como por ejemplo, FSK (*Frequency Shift Keying*) y QPSK (*Quadri-Phase Shift Keying*). Entre éstos se pueden numerar generadores de señales de RF, generadores universales de video, generadores de microondas, equipos de monitoreo de servicio de comunicaciones, analizadores de modulación, analizadores de señales y receptores de telecomunicaciones. Si bien es cierto que estos servicios implican la medición de magnitudes derivadas y no básicas, en México no existe algún laboratorio secundario acreditado que pueda brindar esta clase de servicios al público. En este artículo se presentan los sistemas y métodos de medición propuestos para la calibración de equipos que generan y miden AM.

CARACTERÍSTICAS DE UNA SEÑAL DE AM

El empleo de la modulación para transmisión de información es muy útil ya que permite acoplar la información al canal de comunicación [1]. En particular, la técnica de AM es el proceso de cambiar la amplitud de una señal portadora de radio frecuencia (RF) de acuerdo con una señal moduladora. La técnica de AM es relativamente

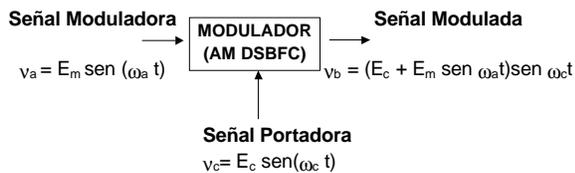
barata y de calidad aceptable, por lo que se emplea con fines comerciales tanto para audio como para video. La banda comercial de radiodifusión de AM se extiende desde 535-1605 kHz para radio y para TV se divide en tres bandas: 1) canales 2 a 6 de 54MHz a 88 MHz; 2) canales 7 a 13 de 174 MHz a 216 MHz y 3) canales 14 a 68 de 470 MHz a 806 MHz. Además la técnica de AM se utiliza también para radio comunicación móvil bidireccional [2].

En la Figura 1-a se muestra el esquema de un generador o modulador de AM de Doble Banda Lateral con Portadora (DSBFC, *Double Side Band Full Carrier*). Este es un dispositivo no lineal con dos entradas: la frecuencia portadora de amplitud constante, E_c , y la señal moduladora. Cuando ésta se aplica, la forma de onda de salida es la portadora cuya amplitud varía de acuerdo con la forma de onda de la señal moduladora. La relación entre la portadora v_c , la señal moduladora v_a y la señal modulada v_b pueden apreciarse en esta figura. La Figura 1.b muestra, en el dominio del tiempo, cómo la señal de AM se produce a partir de una señal moduladora de frecuencia única. En esta figura se puede observar que la envolvente de AM, tiene la misma forma que la señal moduladora.

La expresión matemática que corresponde a la forma de onda observada en la Figura 1-b muestra que está compuesta de tres senoides de diferente frecuencia. Ésto puede apreciarse en la Figura 2, en donde se muestra, en el dominio de la frecuencia, la portadora y las bandas laterales superior (USB, *Upper Side Band*) e inferior (LSB, *Lower Side Band*). Las bandas laterales tienen

amplitudes idénticas y en cualquiera de ellas está contenida toda la información de interés, por lo que algunos tipos especiales de AM, como [1]: AM de doble banda lateral con portadora suprimida (DSB-SC, *Double Side Band Supressed Carrier*) y AM de banda lateral única y portadora suprimida (SSB, *Single Side Band*), son tipos especiales de AM que mejoran la eficiencia en potencia y en ancho de banda al suprimir la portadora y/o alguna de las bandas laterales.

Las principales características que se deben medir en cualquier tipo de AM son la razón e índice de modulación y en algunos casos resulta importante medir la distorsión armónica [2]. La razón de modulación, R, es la frecuencia de la envolvente en la señal modulada [3]. El índice de profundidad o coeficiente de modulación, m, es la relación de amplitudes entre la señal moduladora (E_m), y la señal portadora (E_c). El porcentaje de modulación, M, es simplemente m multiplicado por 100 [3].



Donde:
 $E_m = m E_c$ = amplitud de la señal moduladora
 E_c = amplitud de la señal portadora
 $A(t) = E_c + E_m \text{ sen } \omega_a t$ es la envolvente de la señal AM DSBFC
 $m = E_m / E_c$ = índice de modulación

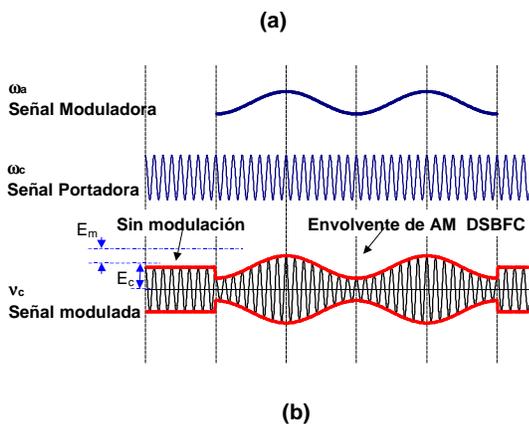


Fig. 1 AM DSBFC:
 (a) Modulador;
 (b) Análisis en el dominio del tiempo

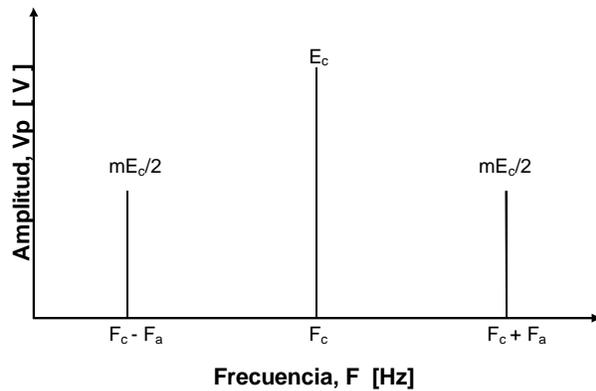


Fig. 2 Espectro de Amplitud de una Señal AM DSBFC

Distorsión armónica en AM

Distorsión armónica es la generación de múltiplos no deseados de una señal senoidal de frecuencia única cuando la onda senoidal se hace pasar a través de un dispositivo no lineal. La frecuencia de la señal original es el primer armónico y se le llama frecuencia fundamental. En el caso de una señal de AM, la distorsión armónica de orden mayor se mide con respecto a la amplitud del primer armónico.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE AM

Los sistemas de medición implementados para la calibración de generadores y medidores de AM, presentados en las Figuras 3 y 4 respectivamente, están basados en la infraestructura actual del CENAM, por lo que no existe ningún compromiso con la marca y modelo de los equipos que actualmente forman parte de éstos. En ambos casos, la parte central está constituida por un analizador de espectros, cuya respuesta en frecuencia, así como la fidelidad de sus escalas logarítmica y lineal ha sido calibrada respecto al patrón nacional de potencia electromagnética.

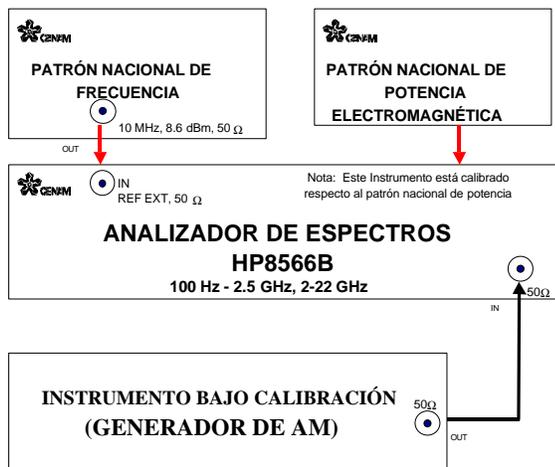


Fig. 3 Sistema de calibración para generadores de AM

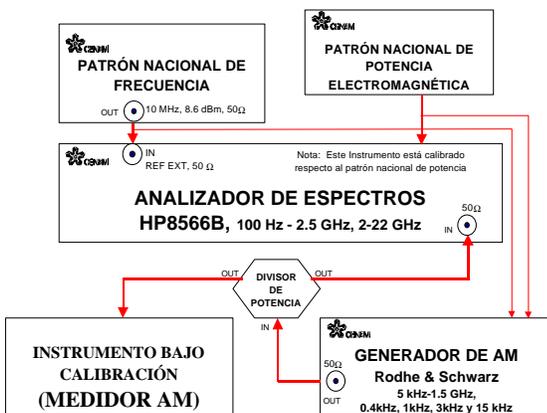


Fig. 4 Sistema de calibración para medidores de AM

Adicionalmente el oscilador interno del analizador de espectros es sustituido por la señal proveniente del patrón nacional de frecuencia. En el caso de la Figura 3, el equipo bajo prueba es un generador de AM. En el caso de la Figura 4, el equipo bajo prueba es un medidor de AM y para calibrarlo se emplea el método de comparación utilizando como sistema de referencia el esquema básico presentado en la Figura 3. En este caso el generador de AM de referencia también es calibrado respecto al patrón nacional de potencia electromagnética en AF y se opera sustituyendo su oscilador interno por el patrón nacional de frecuencia. En ambos sistemas de medición las impedancias de todos los equipos en las entradas y salidas es de 50 Ω.

DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE AM

Dominio del tiempo

Para realizar mediciones en el dominio del tiempo el analizador de espectros se utiliza en el modo llamado “ZERO-SPAN” [4], esto significa que el analizador trabajará como un receptor de sintonía fija, demodulando la señal de entrada empleando un detector de envolvente; de esta manera la señal moduladora puede ser analizada en el dominio del tiempo como si ésta se observara en un osciloscopio [3].

Dominio de la Frecuencia

En el dominio de la frecuencia, el analizador de espectros funciona como un receptor superheterodino y básicamente hace un barrido en frecuencia, desplegando todas las componentes de frecuencia presentes en la terminal de entrada.

Empleando la Transformada de Fourier

La forma más sencilla y automática de hacer mediciones de AM con un analizador de espectros es utilizando la FFT, opción que se incluye en la mayoría de los analizadores de espectros modernos. En este caso el analizador demodula y digitaliza la señal de AM para luego obtener su FFT [5].

Fuentes de Incertidumbre

En la Tabla 1 se presentan las principales fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de calibración, tanto en la medición de M como de R. Las condiciones ambientales en las que se obtuvieron estos datos fueron de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ y $(45 \pm 10)\%$ Humedad Relativa (HR). Con respecto a la estimación de incertidumbre en la medición de M, la calibración de la respuesta en frecuencia y de la fidelidad de la escala logarítmica del analizador de espectros ha sido sumamente importante para poder reducir al mínimo los niveles de incertidumbre en los tres métodos de medición.

Así mismo, realizar mediciones de amplitud relativas, en lugar de mediciones absolutas, ha sido sumamente importante para reducir las fuentes de incertidumbre que intervienen en el

proceso de medición [4]. Para el caso de la medición de R, utilizando cualquiera de los métodos de medición, la contribución de la referencia en frecuencia es prácticamente despreciable; la principal fuente de incertidumbre en todos los casos es la electrónica asociada del analizador de espectros. La estimación de incertidumbre se ha realizado conforme se sugiere en [6]. En la Tabla 1, la incertidumbre debida a la dispersión de las mediciones realizadas está indicada y no ha sido incluida en

el estimado de U, excepto en el caso de la FFT. Cabe hacer notar que cuando sea necesario medir distorsión armónica, se debe tener presente además la distorsión interna y el ruido de fondo del analizador de espectros [4]. Con respecto a la calibración de un medidor de AM, las fuentes de incertidumbre principales son el medidor de referencia, el EBC, el desacoplamiento entre las terminales de salida y entrada de los equipos y la dispersión de las mediciones.

CALIBRACIÓN DE: GENERADORES DE AM	Dominio del tiempo		Dominio de la frecuencia		FFT	
	R	M	R	M	R	M
Estabilidad de frecuencia de la referencia	4,26×10 ⁻¹³ /día					
Estabilidad de Temperatura de la referencia	±3,00×10 ⁻¹³					
Marcador digital Δ SPAN<5MHz	±2,50%		±0,5%			
Algoritmo de FFT					±1,25%	
Dispersión de las mediciones	$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾		$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾		$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾	
Respuesta en frecuencia, 10-500 MHz		±0,12dB= ±1,35%		±0,12dB= ±1,35%		
Fidelidad escala lineal		±1,73%				
Fidelidad de la escala logarítmica (error acumulativo)				0,003 dBm/dBm		
Desacoplamiento		±0,90%		±0,90%		±0,90%
Algoritmo FFT						±1,35%
Dispersión de las mediciones		$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾		$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾		±0,29% ⁽²⁾
TOTAL, U, (k=2,0)	±5,00%	±4,74%	±1,0%	±3,24%	±2,50%	±3,3% ⁽³⁾
CALIBRACIÓN DE: MEDIDORES DE AM						
U _c del Analizador de Espectros	±2,50%	±2,37%	±0,5%	±1,62%	±1,25%	±1,65%
Desacoplamiento		±0,90%		±0,90%		±0,90%
Equipo Bajo Calibración, EBC	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾
Dispersión de las mediciones	$\frac{s}{\sqrt{n}}$ ⁽¹⁾	±0,29% ⁽²⁾				

Notas: (1) Depende del número de mediciones, n. (2) Se ha considerado n=16. (3) Depende de las características del EBC.

Tabla 1. Fuentes de Incertidumbre

Alcances de los servicios

En la Tabla 2 se detallan los alcances en los servicios de calibración que se ofrecen para los niveles de incertidumbre estimados en la Tabla 1. Si existiera la necesidad de modificar los alcances en la Tabla 2 para atender otros servicios de calibración, los niveles de incertidumbre presentados en la Tabla 1 deberían ser evaluados nuevamente.

	Dominio t	Dominio f	FFT
ω _c E _c	10 – 500 MHz -10dBm<E _c <10 dBm	10-500 MHz -10dBm<E _c <10 dBm	10 - 500 MHz -10dBm<E _c <10 dBm
M	10-90%	1-100%	1-100%
R	0,4-1 kHz	0,4-100 kHz	0,0005-100 kHz

Tabla 2. Alcances de los servicios

Ejemplos de Calibraciones

Empleando las configuraciones de la Figuras 3 y 4, se ha procedido a calibrar, un generador de funciones y un analizador de espectros, respectivamente. Parte de los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Los niveles de incertidumbre obtenidos de la calibración del medidor de AM (Tabla 3), podrían reducirse al calibrar la respuesta en frecuencia y la fidelidad de la escala antes de realizar la calibración de AM.

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

Cada uno de los tres métodos de medición presentados, tiene características propias que los hacen especialmente útiles en algunos casos. Por ejemplo, cuando el tipo de calibración se hace para AM-DSBSC o AM-SSB, no se tiene disponible la señal portadora, por lo que la calibración debería realizarse en el dominio del tiempo o empleando la FFT. Sin embargo, realizar una calibración en el dominio del tiempo implica que se tendrán incertidumbres más altas.

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE AM								
GENERADOR DE AM BAJO CALIBRACIÓN (VALORES MEDIDOS)								
ω_c [MHz] @ -10dBm	R [kHz]	M [%]	Dominio del tiempo		Dominio de la frecuencia		FFT	
			R [Hz]	M[%]	R [Hz]	M[%]	R [Hz]	M[%]
10,00	0,40	10,00	409,84	10,31	403,00	9,89	405,00	10,13
	1,00	30,00	1020,41	29,95	1008,00	29,85	1025,00	29,58
	3,00	90,00	3125,00	83,93	3003,00	88,10	3025,00	88,31
30,00	0,40	10,00	413,22	10,38	402,00	10,12	405,00	10,25
	1,00	30,00	1002,00	30,12	1008,00	30,55	1025,00	30,27
	3,00	90,00	2941,18	87,46	3010,00	90,16	3025,00	90,37
100,00	0,40	10,00	400,00	10,38	402,00	10,00	405,00	10,25
	1,00	30,00	1000,00	29,97	1005,00	29,85	1025,00	30,27
	3,00	90,00	3125,00	85,61	3010,00	90,16	3025,00	90,37
TOTAL, U [%], (k=2,0)			$\pm 5,00$	$\pm 4,74$	$\pm 1,00$	$\pm 3,24$	$\pm 2,50$	$\pm 3,30$
MEDIDOR DE AM BAJO CALIBRACIÓN (VALORES MEDIDOS)								
10,00	0,40	10,00	427,35	10,00	400,00	10,09	403,00	9,24
	1,00	30,00	961,54	29,70	1010,00	30,20	1006,00	30,51
	3,00	90,00	No disponible	No disponible	3003,00	89,54	3000,00	88,61
30,00	0,40	10,00	400,00	10,50	405,00	10,23	403,00	9,98
	1,00	30,00	980,39	30,49	1010,00	30,69	1012,00	29,96
	3,00	90,00	No disponible	No disponible	3000,00	91,20	3000,00	92,36
100,00	0,40	10,00	416,67	10,09	405,00	10,14	400,00	10,26
	1,00	30,00	1000,00	30,16	1010,00	30,41	1000,00	27,23
	3,00	90,00	No disponible	No disponible	3000,00	90,57	3025,00	94,30
TOTAL, U [%], (k=2,0)			$\leq \pm 13,46$	$\leq \pm 11,02$	$\leq \pm 2,65$	$\leq \pm 8,23$	$\leq \pm 2,88$	$\leq \pm 17,82$

Tabla 3. Ejemplos de calibración en AM

Por otro lado, no se podría realizar una calibración en el dominio del tiempo, cuando el equipo bajo calibración presente distorsión armónica [3]. En este caso será más apropiado emplear el dominio de la frecuencia o la FFT. Aunque la medición en el dominio de la frecuencia se ve limitado cuando la señal de AM está contaminada con modulación angular, lo cual puede afectar la medición de M.

Con respecto al empleo de la FFT, parece que este es el método más versátil, más rápido, que permite además tener mayor resolución, rechazo de modulación angular presente en la señal de AM, así como la realización de número mayor de mediciones en un tiempo muy corto. Una limitación importante en el uso de la FFT es la limitada exactitud en la medición de R debido a que ésta es función directa del tiempo de barrido del analizador; otra limitación en el uso de la FFT es la frecuencia de modulación máxima (frecuencia de Nyquist, $F_{m\acute{a}x}$) que puede ser medida con un equipo particular, la cual está relacionada con el tiempo de barrido y el número de muestras digitalizadas obtenidas de la conversión analógico a digital de la señal demodulada de AM. Adicionalmente, con el propósito de evitar errores en la medición debidos al fenómeno conocido como "aliasing" [5], ninguna componente de la señal moduladora debe tener frecuencias mayores a $F_{m\acute{a}x}$. Otra consideración que debe tenerse presente cuando se emplea la FFT es el tipo de ventana empleado para delimitar la señal bajo medición a la cual será aplicado el algoritmo de FFT[5]. Como se podrá observar, la preferencia de emplear un método u otro dependerá sobre todo de las características propias del equipo a calibrar y del intervalo para el cual se solicita el servicio.

CONCLUSIONES

Basados en la infraestructura actual del CENAM, en este artículo se han presentado tres métodos diferentes para la calibración de equipos generadores y medidores de todo tipo de AM: AM DSBFC, AM DSBSC Y AM SSBSC. Con estos sistemas será posible atender parte de la demanda de los servicios de calibración que se atendían parcialmente en el CENAM o que eran rechazados por no contar con este servicio. La capacidad de medición actual, para los niveles de incertidumbre reportados en la Tabla 1, se encuentra definida en la Tabla 2.

REFERENCIAS

- [1] K. Sam Shanmugam, "Digital and Analog Communications Systems", John Wiley & Sons 1985, Ch, 6, pp. 251-278.
- [2] Wayne Tomasi, "Fundamentals of Electronic Communications Systems", Prentice Hall, 1988, Ch. 3, pp. 81-92.
- [3] Agilent, Spectrum Analysis Amplitude and Frequency Modulation, Application Note 150-1.
- [4] Agilent, Spectrum Analysis Basics, Application Note 150.
- [5] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, "Digital Signal Processing, Principles, Algorithms and Applications", Maxwell Macmillan International, 1992, Ch. 6 & 9, pp. 395, 684.
- [6] Reporte Técnico CNM-MED-PT-0002, Guía BIPM-ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones, Querétaro, México, 1994.