

# ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN DE SITIO EN LA VALIDACIÓN DEL CALTS-CENAM

Victoria Molina López, Israel García Ruiz, Mariano Botello Pérez  
Laboratorio de Antenas y Campos Electromagnéticos, Centro Nacional de Metrología Eléctrica, CENAM,  
E-mail: [vmolina@cenam.mx](mailto:vmolina@cenam.mx), [igarcia@cenam.mx](mailto:igarcia@cenam.mx), [mbotello@cenam.mx](mailto:mbotello@cenam.mx)

## Resumen

De acuerdo con la normalización internacional, un sitio de pruebas se declara como un sitio para calibración de antenas, esto es un CALTS (Calibration Test Site), cuando la atenuación de sitio teórica ( $AS_c$ ) se compara con la atenuación de sitio experimental ( $AS_m$ ) y el valor absoluto de la diferencia entre ellas se conserva menor a 1 dB en todas las frecuencias de prueba dentro del intervalo de 30 MHz a 1 GHz. Para declarar si el sitio de pruebas cumple con este criterio, conocido como criterio de la atenuación de sitio (AS), se debe estimar la incertidumbre en cada valor de la  $AS_m$ . Durante el proceso de validación del CALTS-CENAM la  $AS_m$  se midió empleando dos métodos con el objeto de asegurar la validez de los resultados obtenidos. Uno de los métodos se basa en el uso de un analizador de redes y otro se basa en el uso de un analizador de espectros. En este artículo se presentan los resultados del cálculo de incertidumbre en la medición de la  $AS_m$  para estos dos casos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para algunas clases de servicios de calibración de antenas que se realizarán en el sitio de pruebas del CENAM se requiere la validación de éste como CALTS de acuerdo con [1] y [2].

El desempeño del sitio del CENAM se considerará satisfactorio y conforme a la norma [1] cuando en las frecuencias de prueba (columna 2 de la Tabla 1) se cumpla con el criterio de AS dado por la ecuación (1). Este criterio establece que la  $AS_m$  debe estar dentro de un margen,  $T_{AS}$ , respecto de la  $AS_c$ . En este margen se deben considerar las tolerancias en la configuración del sistema para la medición de la  $AS_m$  (Tabla 2) y su incertidumbre,  $\Delta AS_m$ , la cual debe estimarse para un nivel de confianza del 95%. La tolerancia  $T_{AS}$  es de 1,0 dB para todas las frecuencias en el intervalo de 30 MHz a 1 GHz [1].

$$|AS_c[\text{dB}] - AS_m[\text{dB}]| < T_{AS}[\text{dB}] - \Delta AS_m[\text{dB}] \quad (1)$$

En este artículo se exponen el proceso de medición de la  $AS_m$  y su estimación de incertidumbre. Los detalles de la validación del CALTS-CENAM y la obtención de los valores de la  $AS_c$  se pueden revisar en [2].

Frecuencia de resonancia del dipolo [MHz]	Frecuencias de prueba [MHz]	Altura Antena $h_r$ [m]
700	600	2
	700	1,7
	800	1,5
	900	1,3
	1000	1,2
400	300	1,5
	400	1,2
	500	2,3
180	120	4
	130, 140, 160, 180, 200	2
	250	1,5
60	30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100	4

Tabla 1 Dipolos resonantes

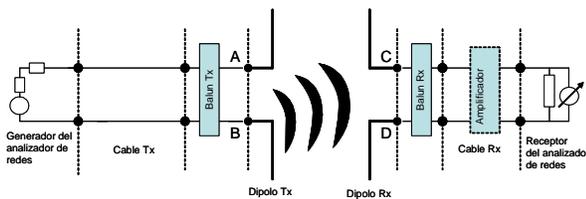
Variable	Tolerancia Máxima
$L_a$ , longitud entre los extremos de los elementos de la antena	$\pm 0,0025 L_a$ ó $\pm 0,001$ m si $L_a < 0,400$ m
$Z_{AB}$ , impedancia especificada del puerto balanceado del balun	VSWR $\leq 1,10$
$A_b$ , amplitud en balance	$\pm 0,4$ dB
$\phi_b$ , fase en balance	$\pm 2^\circ$
$d$ , distancia horizontal entre los centros de las antenas	$\pm 0,04$ m
$h_t$ , altura de la antena transmisora	$\pm 0,01$ m
$h_r$ , altura de la antena receptora	$\pm 0,01$ m
$f$ , frecuencia de prueba	$(\pm 0,001)f$ [Hz]

Tabla 2 Tolerancias consideradas durante los trabajos de validación del CALTS-CENAM

## 2. SISTEMAS DE MEDICIÓN

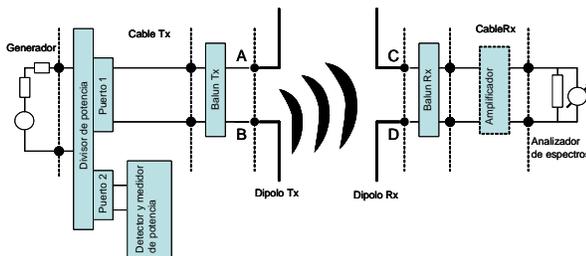
La medición de la  $AS_m$  del sitio de pruebas del CENAM se realizó utilizando dos sistemas de medición [2]:

1) Con un sistema automatizado en el que se utiliza un analizador vectorial de redes de radio frecuencia (RF) y un amplificador de señal en la trayectoria de recepción (véase Figura 1). El software de adquisición de datos que se desarrolló para este propósito se validó antes de emplearse en el proceso de medición.



**Figura 1** Sistema de medición basado en el uso de un analizador de redes

2) Empleando en modo manual un generador de señal, un analizador de espectros, un divisor de potencia y un medidor de potencia, con un amplificador en la trayectoria de recepción (véase Figura 2).



**Figura 2** Sistema de medición basado en el uso de un analizador de espectros

En los dos sistemas de medición la impedancia característica fue de  $50 \Omega$ . Las impedancias de radiación de las antenas transmisora y receptora están balanceadas y acopladas a  $50 \Omega$  a través de cada balun. Los lazos de transmisión y recepción se formaron utilizando un cable coaxial de RF subterráneo de 50 m, unido a un cable coaxial de RF de 10 m colocado sobre el plano metálico; la unión entre los cables ellos se hizo mediante un conector coaxial aterrizado en el plano de tierra. Dado que los cables de RF de 10 m quedan sobre el plano de tierra reflector y expuestos al ambiente electromagnético presente en el CALTS-CENAM, fue necesario colocarles ferritas alrededor; las ferritas absorben las corrientes en modo común

inducidas en los cables debido a los campos electromagnéticos presentes en el CALTS-CENAM. Todos los cables de RF empleados son del tipo de bajas pérdidas.

Se emplearon 4 conjuntos de antenas dipolo patrón calculables con las cuales se realiza la medición de  $AS_m$  en el intervalo de 30 MHz a 1 GHz (véase Tabla 1).

## 3. MÉTODO DE MEDICIÓN

Para obtener el valor de  $AS_m$ , con cada sistema de medición se realizó la siguiente secuencia de mediciones sobre el CALTS-CENAM.

1. Medición inicial de referencia. Esta se conoce también como conexión directa o *through*, consiste de la unión del lazo de transmisión (Tx) y del lazo de recepción (Rx). Se realiza antes de la inserción de las antenas en el sistema de medición para conocer las pérdidas del mismo y poder cancelarlas posteriormente.

En esta fase de medición se tienen dos opciones: a) realizar la conexión directa incluyendo los balunes y b) sin incluir los balunes. En el primer caso los balunes se conectan entre sí por medio de un adaptador; de esta manera se conectan los puntos A y C, así como los puntos B y D, mostrados en los sistemas de medición de las Figuras 1 y 2. En el segundo caso se unen los cables de Tx y Rx directamente.

Una vez realizadas las conexiones se genera una señal de una determinada potencia en el lazo Tx y se mide el nivel de tensión que llega al lazo de Rx, este valor de tensión se conoce como tensión de referencia  $U_{r1}(f)$  y se realiza para cada frecuencia de prueba de la Tabla 1.

2. Medición con antenas. Después del paso 1 se inserta cada juego de dipolos en el sistema de medición; se posicionan ambas antenas (en Tx y Rx) sobre el CALTS-CENAM, y se mide el nivel de tensión para cada frecuencia de la Tabla 1, este valor se denota como  $U_s(f)$ .

3. Medición en conexión directa final. Terminado el paso anterior se repite el paso 1 para evaluar la estabilidad de las mediciones. La tensión medida en este etapa se denota por  $U_{r2}(f)$  y no debe diferir de  $U_{r1}(f)$  por más de 0,2 dB.

4. Cálculo de la  $AS_m$ . Para este fin se emplea la siguiente ecuación:

$$AS_m(f) = 20 \log_{10} \left( \frac{U_{ra}(f)}{U_s(f)} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

Donde  $U_{ra}(f)$  es el promedio de  $U_{r1}(f)$  y  $U_{r2}(f)$ . La ecuación (2) se aplica en forma directa cuando  $U_s(f)$  y  $U_{ra}(f)$  son lecturas de tensión. Si se utiliza instrumentación que proporciona lecturas de potencia, el factor de multiplicación del logaritmo es de 10. Si la instrumentación empleada entrega valores directamente en forma logarítmica, como es nuestro caso, la ecuación (2) se reduce a una resta de valores.

**4. ASEGURAMIENTO DE LA VALIDEZ DE LOS RESULTADOS**

Para asegurar la validez del trabajo realizado, los valores experimentales  $AS_m$  se obtuvieron utilizando cada sistema de medición en dos configuraciones diferentes de conexión directa: 1.

Conexión directa incluyendo los balunes y 2. Conexión directa sin balunes.

**5. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES**

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con el sistema de medición basado en el uso del analizador de redes para las conexiones sin balun y con balun. De manera análoga, en la Tabla 4 se muestran los resultados correspondientes al sistema de medición basado en el uso del analizador de espectros. Los resultados obtenidos por los dos sistemas de medición deben compararse entre si observando que el analizador de redes proporciona resultados en dB de la relación entre la potencia de salida y la potencia de recepción. En cambio, con el analizador de espectros se mide la potencia de recepción en dBm; para convertir estos resultados a dB se deben realizar las operaciones necesarias teniendo presente que la potencia de salida en este sistema de medición fue de  $-20 \text{ dBm} \pm 0,06 \text{ dBm}$ .

En nuestro caso la diferencia entre  $U_{r1}(f)$  y  $U_{r2}(f)$  nunca fue mayor a 0,2 dB.

f [Hz]	h <sub>r</sub> m	Conexión directa sin balunes		Conexión directa con balunes		Medición con dipolos			AS <sub>m</sub> Sin balunes	AS <sub>m</sub> Con balunes
		U <sub>ra</sub> dB	σ dB	U <sub>ra</sub> dB	σ dB	Dipolo resonante	U <sub>s</sub> dB	σ dB	U <sub>ra</sub> - U <sub>s</sub> dB	U <sub>ra</sub> - U <sub>s</sub> dB
600	2	13,45	0,07	4,94	0,02	700 MHz	-36,15	0,18	49,60	41,09
700	1,7	11,86	0,06	3,06	0,02		-36,45	0,18	48,31	39,52
800	1,5	10,16	0,05	0,98	0,01		-41,61	0,21	51,77	42,60
900	1,3	8,41	0,04	-0,94	0,01		-46,98	0,24	55,39	46,04
1000	1,2	7,36	0,04	-2,18	0,01		-47,29	0,24	54,65	45,11
300	1,5	18,02	0,09	9,99	0,05	400 MHz	-35,29	0,17	53,31	45,28
400	1,2	16,32	0,08	8,18	0,04		-26,75	0,13	43,07	34,93
500	2,3	14,90	0,07	6,57	0,03		-33,91	0,17	48,81	40,48
120	4	21,17	0,10	13,24	0,07	180 MHz	-33,39	0,16	54,56	46,63
140	2	20,80	0,10	12,59	0,06		-27,72	0,14	48,52	40,31
160	2	20,33	0,10	12,53	0,06		-18,62	0,09	38,94	31,14
180	2	20,05	0,10	11,98	0,06		-15,68	0,08	35,72	27,65
200	2	19,73	0,10	11,74	0,06		-19,05	0,09	38,77	30,79
250	1,5	18,71	0,09	10,62	0,05		-28,17	0,14	46,89	38,80
30	4	23,88	0,12	15,47	0,08	60 MHz	-39,99	0,20	63,86	55,46
35	4	23,66	0,12	15,71	0,08		-32,72	0,16	56,38	48,43
40	4	23,45	0,12	14,95	0,07		-27,48	0,14	50,93	42,42
45	4	23,27	0,11	14,91	0,07		-20,99	0,10	44,26	35,90
50	4	23,07	0,11	14,82	0,07		-15,05	0,07	38,13	29,87
60	4	22,73	0,11	14,66	0,07		-7,52	0,04	30,25	22,17
70	4	22,39	0,11	14,20	0,07		-9,86	0,05	32,25	24,05
80	4	22,12	0,11	13,66	0,07		-14,05	0,07	36,17	27,71
90	4	21,87	0,11	13,45	0,07		-17,51	0,09	39,38	30,97
100	4	21,59	0,11	13,47	0,07		-19,48	0,10	41,07	32,94

Tabla 3 AS<sub>m</sub> obtenida con el analizador de redes

$f$ [Hz]	$h_r$ m	Conexión directa sin balunes		Conexión directa con balunes		Medición con dipolos			$AS_m$ Sin balunes	$AS_m$ Con balunes
		$U_{ra}$ dBm	$\sigma$ dBm	$U_{ra}$ dBm	$\sigma$ dBm	Dipolo resonante	$U_s$ dBm	$\sigma$ dBm	$U_{ra}-U_s$ dB	$U_{ra}-U_s$ dB
600	2	-6,687	0,05	-15,20	0,06	700 MHz	-57,57	0,05	50,88	42,37
700	1,7	-8,08	0,00	-16,98	0,00		-56,91	0,00	48,82	39,93
800	1,5	-9,91	0,00	-18,94	0,05		-62,56	0,00	52,65	43,61
900	1,3	-11,80	0,08	-20,91	0,00		-68,37	0,05	56,57	47,46
1000	1,2	-12,82	0,05	-22,05	0,05		-68,75	0,05	55,94	46,70
300	1,5	-2,24	0,04	-10,09	0,05	400 MHz	-55,44	0,05	53,20	45,35
400	1,2	-3,79	0,00	-11,81	0,05		-46,91	0,00	43,12	35,09
500	2,3	-5,30	0,00	-13,49	0,04		-54,33	0,05	49,03	40,84
120	4	1,17	0,05	-6,58	0,04	180 MHz	-53,72	0,00	54,89	47,14
140	2	0,70	0,00	-7,40	0,04		-48,02	0,00	48,72	40,61
160	2	0,34	0,00	-7,43	0,00		-38,78	0,05	39,12	31,35
180	2	0,02	0,00	-7,96	0,00		-35,82	0,00	35,84	27,86
200	2	-0,33	0,00	-8,25	0,04		-39,13	0,00	38,80	30,89
250	1,5	-1,34	0,04	-9,36	0,05		-48,49	0,00	47,15	39,13
30	4	3,91	0,04	-4,39	0,05	60 MHz	-60,48	0,00	64,40	56,09
35	4	3,55	0,07	-4,03	0,05		-52,97	0,05	56,52	48,94
40	4	3,45	0,00	-4,85	0,08		-48,04	0,00	51,49	43,19
45	4	3,07	0,08	-4,84	0,00		-41,18	0,00	44,25	36,34
50	4	2,82	0,04	-5,01	0,00		-35,17	0,00	37,99	30,16
60	4	2,57	0,04	-5,20	0,00		-27,71	0,00	30,28	22,51
70	4	2,30	0,04	-5,69	0,04		-30,03	0,00	32,33	24,34
80	4	1,98	0,04	-6,36	0,00		-34,21	0,00	36,19	27,85
90	4	1,78	0,04	-6,43	0,05		-37,68	0,00	39,46	31,25
100	4	1,58	0,00	-6,40	0,00		-39,66	0,00	41,24	33,26

Tabla 4  $AS_m$  obtenida con el analizador de espectros

**6. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE**

En la medición de la  $AS_m$  las principales componentes de incertidumbre son la resolución y linealidad de los medidores en el lazo Rx, la dispersión de las mediciones, así como el cuidado con el que se llevó a cabo el proceso de medición para asegurar las tolerancias de la Tabla 2; a esta última componente de incertidumbre se le llama la sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2 y en nuestro caso se le asignó un valor de 0,2 dB dado que se tuvieron en consideración los siguientes aspectos durante la medición recomendados en [1].

1. Los centros de las antenas, los mástiles y los cables de RF se colocaron perpendiculares al plano reflector, al centro del plano y fuera de los ejes de simetría del plano.

2. Los elementos de las antenas se colocaron colineales y paralelos al plano de tierra, es decir en polarización horizontal.

3. Los centros de las antenas en Tx y Rx se colocaron a una distancia de prueba,  $d$ , con un incertidumbre de  $\pm 4$  cm. Las antenas se colocaron en línea de vista y se alinearon antes de ponerlas en la altura de correspondiente.

4. El centro de la antena Tx sobre el plano reflector,  $h_t$ , se colocó a 2 m con una incertidumbre de  $\pm 1$  cm.

5. La altura del centro de la antena Rx sobre el plano,  $h_r$ , se varió según se muestra en la Tabla 1 y la incertidumbre en este posicionamiento es de  $\pm 1$  cm.

6. Se aseguró que los cables coaxiales conectados a cada balun de las antenas en Tx y Rx, vayan hacia atrás de cada antena y perpendiculares a los elementos de la misma. Los cables corrían paralelamente respecto al plano reflector al menos 2 m, luego caían verticalmente hacia el plano. Esto evita que parte de la señal que generamos en Tx

sea captada por el cable de RF en Rx ocasionando resultados erróneos.

7. Todo el equipo de medición estuvo siempre dentro del laboratorio que se encuentra a 15 m del centro del plano y unos 2 m por debajo del nivel del plano de tierra.

8. La estabilidad en frecuencia del generador de RF del analizador de redes es de  $5 \times 10^{-6}$ /día y la del generador de potencia es de  $1 \times 10^{-7}$ /día, por lo cual las variaciones en frecuencia de las señales de prueba durante la medición de  $AS_m$  se consideraron despreciables.

9. La estabilidad en el nivel de potencia del generador del analizador de redes y del generador de potencia también son suficientes para conservar el nivel de la señal de prueba durante el tiempo de medición. La resolución en ambos generadores es de 0,01 dB. La resolución en el analizador de espectros es de 0,1 dB.

10. El receptor de RF del analizador de redes tiene un intervalo dinámico de 101 dB. Los errores por linealidad del receptor se reducen considerablemente al seleccionar el ancho de banda de resolución más fino, de 15 Hz. Este ancho de banda de medición permite realizar las mediciones más exactas, aunque el tiempo de barrido se incrementa considerablemente.

11. El divisor de potencia y el medidor de potencia constituyen un sistema de referencia en amplitud con trazabilidad al Patrón Nacional de Potencia Electromagnética en Alta Frecuencia, cuya incertidumbre no contribuye significativamente al presupuesto de incertidumbre en la medición de  $AS_m$ . Con este sistema de referencia se midió de manera exacta y en tiempo real la amplitud de la señal de prueba en Tx. También con estos instrumentos se realizó la calibración en amplitud del analizador de espectros, con lo se corrigieron los errores por la linealidad del analizador de espectros al momento de medir  $U_{r1}(f)$ ,  $U_{r2}(f)$  y  $U_s(f)$ . Con estas acciones fue posible superar la baja exactitud propia de un analizador de espectros.

12. Con el sistema de medición automatizado se tomaron 20 lecturas en cada frecuencia de prueba; con el sistema de medición manual se tomaron 7 mediciones. Por lo que la dispersión en el sistema

automatizado es menor con respecto al sistema no automatizado.

Hasta el momento cada prueba realizada se ha repetido dos veces en diferentes días y por lo tanto, en diferentes condiciones climáticas, por lo cual las variables de influencia por condiciones ambientales están incluidas en la dispersión de los resultados.

13. El software de adquisición de datos que se desarrolló para emplearlo en el sistema de medición basado en el analizador de redes, fue validado al realizar una prueba empleando el analizador de redes en modo de onda continua y en modo de barrido de frecuencias.

14. Las mediciones se realizaron para las frecuencias marcadas en la Tabla 1.

15. Otras acciones se realizaron para mejorar los sistemas de medición, entre ellas destacan las siguientes: el uso del amplificador de 27 dB de ganancia en el lazo de Rx; el uso de ferritas alrededor de los cables de RF que quedaron sobre el plano reflector; se aterrizó el conductor exterior de los cables de RF en el punto en que éstos penetran el plano reflector.

De acuerdo con [1] aún se investiga sobre las contribuciones de incertidumbre debidas a las tolerancias en el radio de los elementos de alambre de las antenas así como aquellas debidas a la alineación de las antenas de prueba. Por lo que en este artículo estas fuentes de incertidumbre no se cuantifican por separado sino que se consideran implícitas en la dispersión de los resultados de las mediciones.

### **6.1 Presupuesto de incertidumbre para sistema de medición basado en el analizador de redes**

El cálculo de incertidumbre se realizó en base a la Guía BIPM/ISO1995 [3]. El presupuesto de incertidumbre para  $AS_m$  utilizando el analizador de redes se muestran en la Tabla 5. Esta tabla corresponde a la frecuencia de prueba de 600 MHz, y en ella se puede apreciar el modelo empleado para la estimación de incertidumbre, las fuentes de incertidumbre (FI), el valor estimado (VE) para cada variable del modelo, la función de distribución de probabilidad (FDP), la incertidumbre estándar  $u(x)$ , los coeficientes de sensibilidad (c.s.), la contribución de incertidumbre  $u(y)$ , los grados de libertad  $\nu$ , la incertidumbre combinada  $U_c$ , los grados de libertad

efectivos,  $v_{\text{eff}}$ , el factor de cobertura,  $k$ , para un nivel de confianza,  $\rho$  del 95% y la incertidumbre expandida  $U$ . De manera análoga, para el mismo sistema de medición pero realizando la conexión directa incluyendo los balunes los resultados se

muestran en la Tabla 6. En la Tabla 7 se pueden observar los resultados completos.

AS <sub>m</sub> a 600 MHz	Modelo: $AS_m(f)_{\text{dB}} = 20\log_{10}\left(\frac{U_{ra}(f)}{U_s(f)}\right) = U_{ra}(f)_{\text{dB}} - U_s(f)_{\text{dB}}$									
	FI	VE	FDP	$u(x)$	c.s.	$u(y)$	$v$	$U_c$	$v_{\text{eff}}$	$k$
	dB		dB	[ ]	dB		dB		$\rho = 95,0\%$	dB
$U_{ra}$	13,45	Normal	0,02	1,00	0,02	19	0,17	134	1,96	0,33
Resolución $U_{ra}$ (0,01 dB)	-----	Rectangular	0,00	1,00	0,00	60				
$U_s$	-36,15	Normal	0,04	-1,00	-0,04	19				
Resolución $U_s$ (0,01 dB)	-----	Rectangular	0,00	-1,00	0,00	60				
Linealidad del receptor a un intervalo dinámico de 50 dB (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1,00	0,12	60				
Sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2, (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1,00	0,12	60				
AS <sub>m</sub> [dB]	49,60									

**Tabla 5** Incertidumbre de AS<sub>m</sub> obtenida con el analizador de redes y conexión directa sin balunes

AS <sub>m</sub> a 600 MHz	Modelo: $AS_m(f)_{\text{dB}} = 20\log_{10}\left(\frac{U_{ra}(f)}{U_s(f)}\right) = U_{ra}(f)_{\text{dB}} - U_s(f)_{\text{dB}}$									
	FI	VE	FDP	$u(x)$	c.s.	$u(y)$	$v$	$U_c$	$v_{\text{eff}}$	$k$
	dB		dB	[ ]	dB		dB		$\rho = 95,0\%$	dB
$U_{ra}$	4,94	Normal	0,00	1,00	0,00	19	0,17	132	1,96	0,33
Resolución $U_{ra}$ (0,01 dB)	-----	Rectangular	0,00	1,00	0,00	60				
$U_s$	36,15	Normal	0,04	-1,00	-0,04	19				
Resolución $U_s$ (0,01 dB)	-----	Rectangular	0,00	-1,00	0,00	60				
Linealidad del receptor a un intervalo dinámico de 50 dB (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1,00	0,12	60				
Sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2, (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1,00	0,12	60				
AS <sub>m</sub> [dB]	41,09									

**Tabla 6** Incertidumbre de AS<sub>m</sub> obtenida con el analizador de redes y conexión directa con balunes

f	h <sub>r</sub>	Frecuencia de los dipolos resonantes utilizados	AS <sub>m</sub> sin balunes		AS <sub>m</sub> con balunes	
			U <sub>ra</sub> -U <sub>s</sub>	U (k=1,96, ρ=95%)	U <sub>ra</sub> -U <sub>s</sub>	U (k=1,96, ρ= 5%)
Hz	M		dB	dB	dB	dB
600	2	700 MHz	49,60	0,33	41,09	0,33
700	1,7		48,31	0,33	39,52	0,33
800	1,5		51,77	0,33	42,60	0,33
900	1,3		55,39	0,34	46,04	0,34
1000	1,2		54,65	0,34	45,11	0,34
300	1,5	400 MHz	53,31	0,33	45,28	0,33
400	1,2		43,07	0,33	34,93	0,33
500	2,3		48,81	0,33	40,48	0,33
120	4	180 MHz	54,56	0,33	46,63	0,33
140	2		48,52	0,33	40,31	0,33
160	2		38,94	0,33	31,14	0,32
180	2		35,72	0,32	27,65	0,32
200	2		38,77	0,33	30,79	0,32
250	1,5		46,89	0,33	38,80	0,33
30	4	60 MHz	63,86	0,34	55,46	0,33
35	4		56,38	0,33	48,43	0,33
40	4		50,93	0,33	42,42	0,33
45	4		44,26	0,33	35,90	0,32
50	4		38,13	0,33	29,87	0,32
60	4		30,25	0,32	22,17	0,32
70	4		32,25	0,32	24,05	0,32
80	4		36,17	0,33	27,71	0,32
90	4		39,38	0,33	30,97	0,32
100	4		41,07	0,33	32,94	0,32

**Tabla 7** Incertidumbre de AS<sub>m</sub> en todas las frecuencias de prueba usando el analizador de redes en conexión directa sin balunes y con balunes

**6.2 Presupuesto de incertidumbre para sistema de medición basado en el analizador de espectros**

El presupuesto de incertidumbre se muestra en la Tabla 8 para el caso sin balunes, en la Tabla 9 para el caso con balunes y en la Tabla 10 los resultados completos. El modelo empleado proviene de la ecuación (2) pero incluye los errores del analizador de espectros en los niveles de señal medidos. Vale la pena aclarar que las lecturas se tomaron directamente en dBm, y que las fuentes de incertidumbre de cada variable en el modelo están dadas en dB.

$$AS_m(f) = U_{ra}(f) + e_1(f) - [(U_s(f) + e_2(f))] \quad [dB] \quad (3)$$

Es importante señalar que para lograr la más alta exactitud empleando el analizador de espectros, se

realizó la calibración de los errores absolutos en amplitud, e<sub>1</sub> y e<sub>2</sub>, para cada nivel medido de U<sub>a</sub>(f) y U<sub>s</sub>(f) respectivamente. Esto, además de la exactitud, tiene la ventaja de lograr que las mediciones de nivel sean directamente trazables al Patrón Nacional de Potencia a través de la calibración del detector. Otras ventajas son que no fue necesario considerar en el presupuesto de incertidumbres otros factores dados por el fabricante tales como [4]: el error de amplitud de la señal del calibrador interno, la conmutación del ancho de banda de resolución, la conmutación a la escala logarítmica, la fidelidad de la escala logarítmica, entre otros. La única fuente considerada, ya que permanece en el uso del analizador de espectros, fue la digitalización logarítmica.

Tampoco se consideraron factores de incertidumbre por la respuesta en frecuencia y la linealidad del instrumento, dado que la medición de nivel se

realizó puntualmente en una frecuencia a la vez. El analizador de espectros se trabajó con un ancho de banda de resolución de 10 Hz, en un intervalo de 100 Hz, en una escala logarítmica de 10 dB/

división, con un nivel de referencia de 0 dBm para los niveles negativos y 5 dBm para los niveles positivos.

AS <sub>m</sub> a 600 MHz	Modelo: $AS_m(f) = U_{ra}(f) - e_1(f)_{dBm} - [(U_s(f) - e_2(f))]_{dBm}$ [dB]										
	FI	VE	FDP	$u(x)$	c.s.	$u(y)$	$\nu$	$U_c$	$\nu_{eff}$	$k$	$U$
	dBm		dB	[ ]		dB		dB		$\rho = 95,0\%$	dB
$U_{ra}$	-6,60	Normal	0,02	1	0,02	6	0,17	149	1,96	0,3	
$e_1$	-0,087	Normal	0,02	1	0,02	6					
Resolución $U_{ra}$ (0,1 dB)	-----	Rectangular	0,03	1	0,03	60					
$U_s$	-56,83	Normal	0,02	-1	-0,02	6					
$e_2$	-0,74	Normal	0,02	-1	-0,02	6					
Resolución $U_s$ (0,1 dB)	-----	Rectangular	0,03	-1	-0,03	60					
Digitalización escala logarítmica con "Log Scale=10 dB"= $\pm 0,2$ dB	-----	Rectangular	0,12	1	0,12	60					
Sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2, (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1	0,12	60					
AS <sub>m</sub> [dB]	50,9										

**Tabla 8** Presupuesto de incertidumbre para resultados de AS<sub>m</sub> con el analizador de espectros y conexión directa sin balunes en la frecuencia de prueba de 600 MHz

AS <sub>m</sub> a 600 MHz	Modelo: $AS_m(f) = U_{ra}(f) - e_1(f)_{dBm} - [(U_s(f) - e_2(f))]_{dBm}$ [dB]										
	FI	VE	FDP	$u(x)$	c.s.	$u(y)$	$\nu$	$U_c$	$\nu_{eff}$	$k$	$U$
	dBm		dB	[ ]		dB		dB		$\rho = 95,0\%$	dB
$U_{ra}$	-15,20	Normal	0,02	1	0,02	6	0,17	150	1,96	0,3	
$e_1$	0,000	Normal	0,02	1	0,02	6					
Resolución $U_{ra}$ (0,1 dB)	-----	Rectangular	0,03	1	0,03	60					
$U_s$	-56,83	Normal	0,02	-1	-0,02	6					
$e_2$	-0,74	Normal	0,02	-1	-0,02	6					
Resolución $U_s$ (0,1 dB)	-----	Rectangular	0,03	-1	-0,03	60					
Digitalización escala logarítmica con "Log Scale=10 dB"= $\pm 0,2$ dB	-----	Rectangular	0,12	1	0,12	60					
Sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2, (0,2 dB)	-----	Rectangular	0,12	1	0,12	60					
AS <sub>m</sub> [dB]	42,4										

**Tabla 9** Presupuesto de incertidumbre para resultados de AS<sub>m</sub> con el analizador de espectros y conexión directa con balunes en la frecuencia de prueba de 600 MHz

f	h <sub>r</sub>	Frecuencia de los dipolos resonantes utilizados	AS <sub>m</sub> sin balunes		AS <sub>m</sub> con balunes	
			U <sub>ra</sub> - U <sub>s</sub>	U (k=1,96, ρ=95%)	U <sub>ra</sub> - U <sub>s</sub>	U (k=1,96, ρ=95%)
Hz	m		dB	dB	dB	dB
600	2	700 MHz	50,9	0,3	42,4	0,3
700	1,7		48,8	0,3	39,9	0,3
800	1,5		52,7	0,3	43,6	0,3
900	1,3		56,6	0,3	47,5	0,3
1000	1,2		55,9	0,3	46,7	0,3
300	1,5	400 MHz	53,2	0,3	45,4	0,3
400	1,2		43,1	0,3	35,1	0,3
500	2,3		49,0	0,3	40,8	0,3
120	4	180 MHz	54,9	0,3	47,1	0,3
140	2		48,7	0,3	40,6	0,3
160	2		39,1	0,3	31,4	0,3
180	2		35,8	0,3	27,9	0,3
200	2		38,8	0,3	30,9	0,3
250	1,5		47,2	0,3	39,1	0,3
30	4	60 MHz	64,4	0,3	56,1	0,3
35	4		56,5	0,3	48,9	0,3
40	4		51,5	0,3	43,2	0,3
45	4		44,3	0,3	36,3	0,3
50	4		38,0	0,3	30,2	0,3
60	4		30,3	0,3	22,5	0,3
70	4		32,3	0,3	24,3	0,3
80	4		36,2	0,3	27,9	0,3
90	4		39,5	0,3	31,3	0,3
100	4		41,2	0,3	33,3	0,3

**Tabla 10** Incertidumbre de AS<sub>m</sub> en todas las frecuencias de prueba usando el analizador de espectros con conexión directa sin balunes y con balunes

**7. CONCLUSIONES**

Empleando dos sistemas de medición fue posible obtener cuatro conjuntos de resultados para la AS<sub>m</sub>: 1. Con analizador de redes y configuración directa con balunes; 2. Con analizador de redes y configuración directa sin balunes; 3. Con analizador de espectros y configuración directa con balunes; y 4. Con analizador de espectros y configuración directa sin balunes. En todos estos resultados la incertidumbre expandida obtenida es muy similar y menor a 0,35 dB, para un nivel de confianza del 95%. Esto se debe a que las principales fuentes de incertidumbre en los dos sistemas de medición empleados son del mismo orden; en el caso del sistema basado en el analizador de redes se trata de la sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 2 y la linealidad del receptor del analizador de redes; en el caso del sistema basado en el analizador de espectros se trata también de la sensibilidad a las

tolerancias de la Tabla 2 y la digitalización de la escala logarítmica.

El sistema de medición basado en el analizador de espectros incluye un sistema de referencia formado por un medidor de potencia y un detector. Con este sistema de referencia también fue posible calibrar los errores del analizador de espectros. Estas acciones permitieron obtener resultados exactos a pesar de que un analizador de espectros es un instrumento de baja exactitud. La incertidumbre lograda con este sistema de medición es así equiparable a la incertidumbre obtenida para el sistema de medición basado en el analizador de redes.

Los resultados obtenidos para la AS<sub>m</sub> son congruentes entre si y es posible utilizar estos resultados en la comparación con los valores

$AS_c$  como parte fundamental del proceso de validación del CALTS-CENAM.

## REFERENCIAS

[1] CISPR16-1-5:2003-11, first edition, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-Antenna Calibration test sites for 30 MHz to 1000 MHz".

[2] Victoria Molina López, Israel García Ruiz, "Significado de la atenuación de sitio y de la atenuación de sitio normalizada en la validación del sitio de referencia para la calibración de antenas del CENAM, a presentarse durante el Simposio de Metrología 2006, Qro. Méx. Octubre 2006.

[3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement GBIPM/ISO 1995. <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/>.

[4] Installation and Verification Manual, HP 8566B Spectrum Analyzer. HP Part No. 08566-90169. Printed in USA, September 1993.