

REALIZACIÓN DEL PATRÓN NACIONAL DE FACTOR DE ANTENA

Mariano Botello-Pérez, Victoria Molina-López, Israel García-Ruiz.
División de Mediciones Electromagnéticas, Centro Nacional de Metrología,
Carr. a Los Cués km 4.5, El Marqués, Querétaro, México
Teléfono: (442) 211-05-00 al 04, Ext.:3450, 3460, 3451
mbotello@cenam.mx, vmolina@cenam.mx, igarcia@cenam.mx

Resumen: El propósito de este trabajo es presentar la realización del Patrón Nacional de Factor de Antena (PNFA), el método de medición para determinar experimentalmente su valor, así como la estimación de su incertidumbre [1]. El Factor de Antena (AF) es la función de transferencia de las antenas y es el parámetro principal por el cual es posible proveer de trazabilidad hacia patrones nacionales, a las mediciones de compatibilidad electromagnética de cualquier equipo que emplea energía eléctrica para su funcionamiento.

1. | INTRODUCCIÓN

la Compatibilidad Electromagnética (EMC) es un asunto relevante en la operación de prácticamente cualquier equipo o aparato que para funcionar utilice energía eléctrica. Para que fabricantes de equipo eléctrico, electrónico, telecomunicaciones, automotriz, electrodomésticos, equipo industrial, científico y médico, entre otros, puedan acceder a mercados regulados, tienen el gran reto de cumplir con las normas de EMC existentes.

En el área de la EMC se regulan aspectos tales como la emisión de campos electromagnéticos radiados, los campos electromagnéticos acoplados a la línea de suministro eléctrico, la inmunidad de los equipos ante campos electromagnéticos externos y ante descargas electrostáticas, los efectos de los campos electromagnéticos sobre los seres vivos, entre otros.

En el caso de México, se han desarrollado normas de EMC desde hace una década. En 2007 existían 25 normas voluntarias (NMX) y 19 proyectos de normas en desarrollo [2]. Las normas cubren una gran cantidad de equipos y sistemas eléctricos, electrónicos, de telecomunicaciones, de calidad de la energía, así como de protección de la seguridad humana para los que especifican métodos de medición y límites de cumplimiento tanto en emisiones como en inmunidad. En varios casos, los sistemas de prueba requieren antenas apropiadas, las cuales deben tener características conocidas y con trazabilidad documentada hacia los patrones nacionales correspondientes.

De acuerdo con la Ley [3], en México corresponde al CENAM realizar actividades de investigación y desarrollo en metrología, por ejemplo, para el desarrollo de los patrones nacionales, así como

diseminar sus valores y su exactitud mediante servicios de calibración de patrones y equipos de medición a otros laboratorios. En el campo de la EMC, en el CENAM se han realizado trabajos con el objeto de desarrollar sistemas de calibración de antenas al más alto nivel metrológico, lo cual requiere de instalaciones adecuadas y de personal capacitado. El PNFA es útil para:

- a) Calibración de otras antenas empleadas como patrones de transferencia en el intervalo de frecuencias de 30 MHz a 1000 MHz. A su vez, estos patrones permiten determinar el AF de antenas de banda ancha que en los laboratorios de prueba y de la industria se utilizan en aplicaciones de EMC.
- b) Como parte del sistema de medición para validar sitios de calibración de antenas (CALTS) [4 y 5] y verificar su conformidad con los requerimientos de normas internacionales.
- c) Como parte del sistema de medición para validar sitios para medición de emisiones radiadas provenientes de equipo eléctrico, electrónico o electromecánico y verificar que éstos cumplen con los requerimientos de normas internacionales.
- d) Para realizar comparaciones de atributos metrológicos con CALTS existentes en laboratorios nacionales de metrología de otros países.

2. DESCRIPCIÓN

El PNFA está definido por el valor del Factor de Antena de antenas tipo dipolo resonante de media longitud de onda a frecuencias específicas en el intervalo de frecuencias de 30 MHz a 1000 MHz. La magnitud Factor de Antena, AF, cuantifica la razón de la intensidad de campo eléctrico [en V/m] que incide en una antena, al valor de la tensión eléctrica [en V] que aparece en las terminales de la antena, véase la Figura 1 y la ecuación 1.

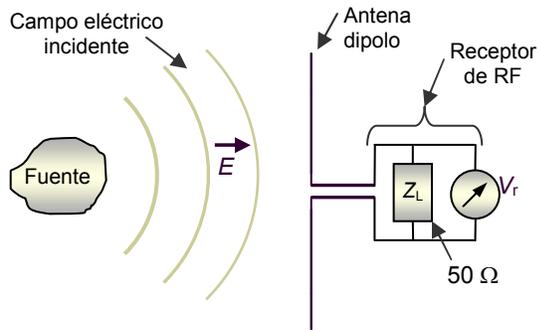


Fig. 1 Concepto de Factor de Antena

$$AF [1/m] = E / V_r \quad (1)$$

Las unidades de esta magnitud son [1/m]. Sin embargo, en el campo de metrología de antenas es muy conveniente expresar esta magnitud en decibeles [dB(1/m)], por el hecho de que es posible simplificar expresiones matemáticas y presentar resultados de manera tal que pueden compararse fácil e independientemente del valor de la magnitud. El decibel (dB) no es una unidad del SI pero es aceptado por la Conferencia Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) [6] siempre que se especifique la naturaleza de la magnitud, ecuación 1.

2.1 Materialización del PNFA

El PNFA está formado por 3 conjuntos, nominalmente idénticos, de 24 antenas del tipo dipolo resonante de media longitud de onda, operados junto con 3 balunes de banda ancha que permiten acoplar la señal al generador o al receptor [1], véase la Figura 2. Cada uno de los 24 dipolos de cada conjunto, está sintonizado a una de las siguientes frecuencias, en MHz: 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000.



a) [30, 35, 40, 45, 50, 60 y 70] MHz



b) [80, 90, 100, 120, 140 y 160] MHz



c) [180, 200, 250, 300 y 400] MHz



d) [500, 600, 700, 800, 900 y 1000] MHz



e) Balunes de banda ancha

Fig. 2 Antenas dipolo resonantes y balunes de banda ancha

Los elementos radiadores tipo dipolo se diseñaron y construyeron en el CENAM de acuerdo con las especificaciones técnicas que se detallan en el punto 4.3.2 de la norma CISPR 16-1-5 [7], véase la sección 1.6 de la referencia [1]. Los balunes son del tipo comercial y cumplen con las características normativas descritas en la norma CISPR 16-1-5.

2.2 Método de medición

Los valores del Factor de Antena de cada conjunto de dipolos (AF_1 , AF_2 , y AF_3) se determinan empleando el Método del Sitio Patrón (SSM) [8], en el cual se realizan tres series de mediciones de atenuación de sitio, SA_1 , SA_2 y SA_3 , en polarización horizontal, utilizando pares de antenas de los 3 conjuntos en una secuencia 1-2, 1-3 y 2-3, la geometría de medición se indica en la Figura 3. De esta forma se establece la trazabilidad de los valores de AF a los patrones nacionales establecidos en el CENAM.

Las ecuaciones 2, 3 y 4 relacionan los AF de las tres antenas con las SA_1 , SA_2 y SA_3 , con la frecuencia de operación f_M en MHz, y con la intensidad de campo eléctrico máxima E_D^{max} calculada para una distancia horizontal R entre

antenas de 10 m y en un intervalo de variación de la altura de la antena receptora de 1 m a 4 m. Los valores de AF obtenidos de esta forma también se conocen como *cercanos al espacio libre* (NFSAF, por su nomenclatura en inglés).

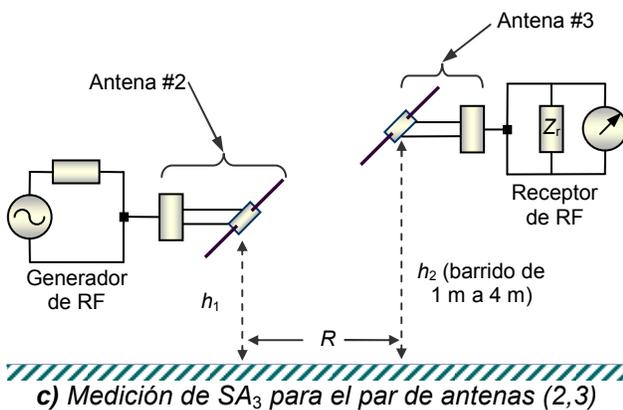
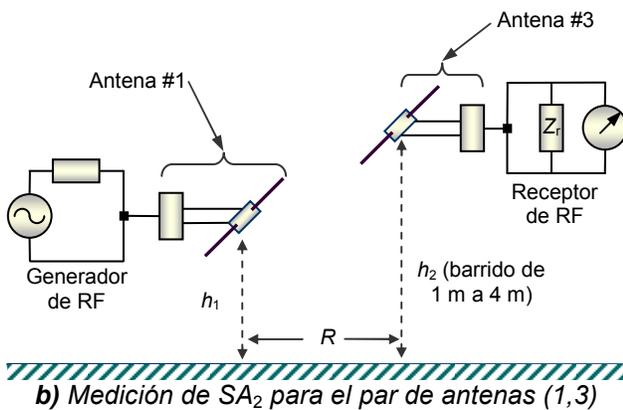
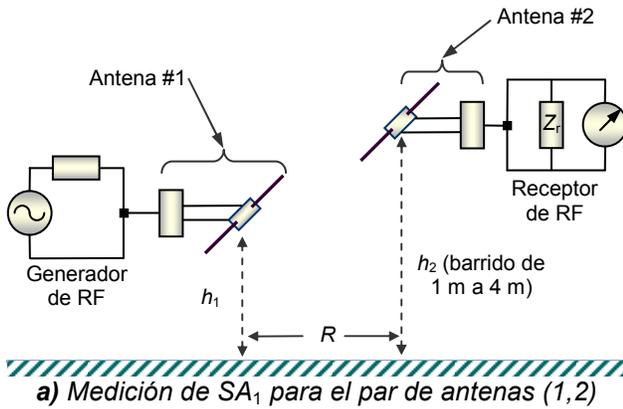


Fig. 3 Geometrías de medición de SA para el SSM

$$AF_1 = 10 \log(f_M) - 24.46 + 0.5 \{ E_D^{\max} + SA_1 + SA_2 - SA_3 \} \quad (2)$$

$$AF_2 = 10 \log(f_M) - 24.46 + 0.5 \{ E_D^{\max} + SA_1 + SA_3 - SA_2 \} \quad (3)$$

$$AF_3 = 10 \log(f_M) - 24.46 + 0.5 \{ E_D^{\max} + SA_2 + SA_3 - SA_1 \} \quad (4)$$

Si todas las cantidades en las ecuaciones 2, 3 y 4 se expresan en decibeles, las unidades resultantes para el AF son [dB(1/m)].

2.2.1 Medición de la SA

La atenuación de sitio es una relación de tensiones o potencias obtenidas a partir de dos condiciones de medición específicas, véase la ecuación 5 [7, 8], y que nos da información de las pérdidas de inserción entre dos antenas colocadas con la misma polarización y a cierta altura sobre el CALTS.

$$SA(f) [W/W] = P_{\text{directa}}(f) / P_{\text{sitio}}(f) \quad (5)$$

Si todas las cantidades en la ecuación 5 se expresan en dB, se obtiene la ecuación 6.

$$SA(f) [dB] = P_{\text{directa}}(f) - P_{\text{sitio}}(f) \quad (6)$$

El valor de P_{sitio} se determina con las antenas dipolo separadas una distancia R de 10 m y colocadas sobre el CALTS del CENAM de acuerdo con la geometría indicada en la Figura 3; la antena transmisora se alimenta con la tensión de salida de un generador de radiofrecuencia, en tanto que la antena receptora se conecta a través de una línea coaxial a un receptor con impedancia característica de 50 Ω. La potencia desarrollada en la impedancia de entrada del receptor bajo estas condiciones determina el valor de P_{sitio} .

El valor de P_{directa} se determina con una conexión directa entre la salida del generador, tomada en el puerto del cable que alimenta a la antena transmisora, y la entrada del receptor, tomada en el puerto del cable que se conecta a la antena receptora. La potencia medida por el receptor bajo estas condiciones determina el valor de P_{directa} .

2.2.2 Sistema de medición de la SA

La medición de la SA se realiza empleando un sistema de medición basado en el uso de un analizador vectorial de redes [1] (VNA, por su nomenclatura en inglés). La condición del sistema para medir P_{sitio} entre pares de antenas del tipo dipolo se presenta en la Figura 4. La condición del sistema de medición para medir P_{directa} en la conexión directa se presenta en la Figura 5.

2.2.3 Condiciones ambientales de medición

Las mediciones se realizan a la intemperie, con los siguientes intervalos de variación de la temperatura y de la humedad relativa:

- Temperatura: (13.6±0.3)°C a (40.6±0.3)°C
- Humedad relativa: (14.7±0.8)% a (81.1±1.6)%

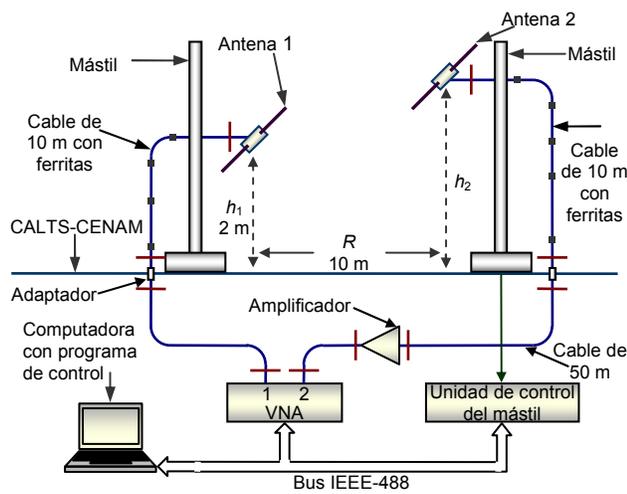


Fig 4. Medición de P_{sitio}

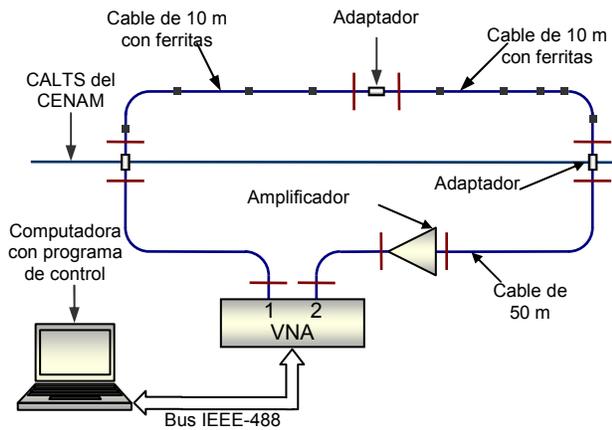


Fig 5. Medición de $P_{directa}$

3. RESULTADOS

Los valores de Atenuación de Sitio de cada conjunto de dipolos (SA_1 , SA_2 , y SA_3) y su incertidumbre expandida con $k = 2.03$ para un nivel de confianza de $\rho \approx 95.45\%$, se indican en la Tabla 1. Los valores del Factor de Antena de cada conjunto de dipolos (AF_1 , AF_2 , y AF_3) y su incertidumbre expandida $U(AF)$ para un nivel de confianza de $\rho \approx 95.45\%$, se indican en la Tabla 2.

4 EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Las ecuaciones 2, 3 y 4 se emplean como modelos para la estimación de incertidumbre en la medición del PNFA, con estos modelos se evalúa la incertidumbre expandida, $U(AF)$, mostrada en la Tabla 2 para un nivel de confianza de aproximadamente 95.45%.

$f = f_M$ [MHz]	SA_1 [dB]	$U(SA_1)$ [dB]	SA_2 [dB]	$U(SA_2)$ [dB]	SA_3 [dB]	$U(SA_3)$ [dB]
30	29.99	0.33	30.05	0.33	30.08	0.33
35	29.21	0.33	29.31	0.33	29.40	0.33
40	29.29	0.33	29.36	0.33	29.44	0.33
45	28.96	0.33	29.02	0.33	29.18	0.33
50	29.40	0.33	29.44	0.33	29.54	0.33
60	30.08	0.33	30.19	0.33	30.26	0.33
70	29.54	0.33	29.86	0.33	29.97	0.33
80	28.82	0.33	28.90	0.33	29.13	0.33
90	29.68	0.33	29.82	0.33	29.98	0.33
100	30.95	0.33	31.05	0.33	31.10	0.33
120	32.74	0.33	32.85	0.33	32.89	0.33
140	33.81	0.33	33.89	0.33	33.95	0.33
160	34.19	0.33	34.24	0.33	34.35	0.33
180	35.33	0.33	35.45	0.33	35.51	0.33
200	36.75	0.33	36.86	0.33	36.90	0.33
250	37.85	0.33	37.91	0.33	37.91	0.33
300	40.01	0.33	40.32	0.33	40.26	0.33
400	42.93	0.33	42.87	0.33	43.01	0.33
500	44.81	0.33	44.85	0.33	45.09	0.33
600	47.08	0.33	47.15	0.33	47.26	0.33
700	47.60	0.33	47.84	0.33	47.93	0.33
800	50.64	0.33	50.69	0.33	50.56	0.33
900	51.30	0.33	51.40	0.33	51.49	0.33
1000	50.73	0.33	51.08	0.33	51.17	0.33

Tabla 1. Valores de SA con que se determinan los valores de AF que realizan el PNFA

$f = f_M$ [MHz]	AF_1 [dB]	$U(AF_1)$ [dB]	AF_2 [dB]	$U(AF_2)$ [dB]	AF_3 [dB]	$U(AF_3)$ [dB]
30	2.91	0.63	2.93	0.63	3.00	0.63
35	3.76	0.56	3.85	0.56	3.95	0.56
40	4.89	0.50	4.97	0.50	5.04	0.50
45	5.63	0.46	5.78	0.46	5.85	0.46
50	6.70	0.44	6.80	0.44	6.84	0.44
60	8.44	0.38	8.51	0.38	8.62	0.38
70	9.25	0.36	9.36	0.36	9.68	0.36
80	9.71	0.34	9.93	0.34	10.02	0.34
90	10.86	0.34	11.03	0.34	11.17	0.34
100	12.10	0.35	12.14	0.35	12.25	0.35
120	13.87	0.37	13.91	0.37	14.03	0.37
140	15.12	0.35	15.18	0.35	15.26	0.35
160	15.90	0.34	16.01	0.34	16.06	0.34
180	17.03	0.32	17.09	0.32	17.21	0.32
200	18.23	0.32	18.26	0.32	18.37	0.32
250	19.78	0.32	19.79	0.32	19.84	0.32
300	21.70	0.31	21.64	0.31	21.95	0.31
400	24.31	0.31	24.45	0.31	24.40	0.31
500	26.10	0.31	26.33	0.31	26.38	0.31
600	28.12	0.33	28.24	0.33	28.30	0.33
700	29.08	0.33	29.17	0.33	29.41	0.33
800	31.30	0.33	31.18	0.33	31.22	0.33
900	32.05	0.33	32.13	0.33	32.23	0.33
1000	32.22	0.33	32.31	0.33	32.66	0.33

Tabla 2. Valores de AF que realizan el PNFA

En las ecuaciones 2, 3 y 4, el factor de antena, $AF(SA_1, SA_2, SA_3, E_D^{max}, f_M)$, es una función de las atenuaciones de sitio SA_1 , SA_2 y SA_3 , de la frecuencia de prueba f_M en MHz y del campo E_D^{max} . Se tiene entonces un modelo de estimación de incertidumbre para cada antena, por lo que en total se tienen 72 presupuestos de incertidumbre; sin

embargo, en todos los casos las fuentes de incertidumbre son las mismas, por lo que sólo se presenta un ejemplo de presupuesto de incertidumbre para una frecuencia particular. La estimación de incertidumbre se realiza siguiendo las recomendaciones de [9]. Las principales fuentes de incertidumbre se describen en las secciones siguientes.

4.1 Incertidumbre de la medición de las atenuaciones de sitio SA₁, SA₂ y SA₃

La estimación de incertidumbre de los valores de AF se hace considerando la incertidumbre de cada valor medido de SA. Por lo que en esta sección se presenta la estimación de incertidumbre de cada valor medido de SA para el sistema de medición que se basa en el uso de un analizador de redes. Las fuentes de incertidumbre que se consideran se describen a continuación [10].

4.1.1 Fuentes de incertidumbre debidas al analizador de redes

Generador de RF: La estabilidad en frecuencia de la señal externa de 10 MHz conectada al analizador de redes es del orden de -6.811×10^{-9} /día y proviene de un oscilador de cuarzo calibrado con trazabilidad al patrón nacional de tiempo y frecuencia; con esta estabilidad se esperarían desviaciones en frecuencia desde -0.204 Hz hasta 6.811 Hz para las frecuencias de medición más baja a 30 MHz y más alta a 1000 MHz, respectivamente; estas variaciones en frecuencia en las señales de prueba durante la medición de la SA_m se consideran despreciables porque, de acuerdo con la Tabla 3 [7], la tolerancia máxima de la variación de frecuencia en las señales de prueba está dada por la expresión: $\pm(0.001) \times f$ (Hz). Esto significa que las tolerancias serían de ± 30 kHz y de ± 1000 kHz para las frecuencias más baja de 30 MHz y más alta de 1000 MHz, respectivamente.

Concerniente a la estabilidad del nivel de señal del generador de RF del analizador de redes, es decir la linealidad de potencia del puerto de prueba del analizador de redes, ésta es suficientemente estable para preservar el nivel de la señal de prueba durante el tiempo de medición. Para asegurar esta condición se deja un periodo de estabilización térmica mayor a 1 hora.

Receptor de RF: De acuerdo al párrafo 4.4.2.9 de CISPR 16-1-5 [7] el receptor de RF debe tener caracterizada la linealidad sobre un intervalo dinámico de al menos 50 dB y en este caso se esperaría un valor de incertidumbre del orden de 0.2 dB. En nuestro caso, se cuenta con un analizador

de redes cuyo receptor de RF tiene un intervalo dinámico total de 101 dB, por lo que se considera que la linealidad es aun mejor en un intervalo reducido de 50 dB. Se considera como aceptable una contribución a la incertidumbre de 0.2 dB. Adicionalmente, con el fin de disminuir los errores por linealidad del instrumento, se selecciona el menor ancho de banda de detección (ancho de banda del sistema), esto es de 15 Hz.

La resolución del analizador de redes es de 0.01 dB y no constituye una fuente de incertidumbre dominante. En el caso del receptor de RF, la linealidad de éste es la fuente de incertidumbre más importante.

4.1.2 Otras fuentes de incertidumbre relacionadas con la medición de SA₁, SA₂ y SA₃

Otras fuentes de incertidumbre presentes en la medición de la SA provienen de la realización física de las antenas, de los errores de posicionamiento al colocar las antenas a la distancia y alturas de medición correspondientes, así como del proceso de alineación de las mismas. De acuerdo con la recomendación de la norma CISPR-16-1-5, si se tiene repetibilidad en el proceso de medición dentro de los márgenes señalados en la Tabla 3, es posible asignar un valor de 0.2 dB para todas estas componentes de incertidumbre, entre las cuales se encuentran las posibles variaciones en frecuencia del generador del analizador de redes, aunque en este caso estas variaciones son despreciables. Esta componente de incertidumbre se identifica como “sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 3”.

Variable	Tolerancia máxima
L _a , longitud entre los extremos de la antena de alambre real	$\pm 0.0025 \times L_a$ o ± 0.001 m si $L_a < 0.400$ m
Z _{AB} , impedancia especificada del puerto balanceado del balún	VSWR ≤ 1.10
A _b , amplitud en balance	± 0.4 dB
φ _b , fase en balance	$\pm 2^\circ$
D = 10 m, distancia horizontal entre los centros de las antenas	± 0.04 m
h _t , altura del centro de la antena Tx sobre el plano reflector	± 0.01 m
h _r = h ₂ , altura del centro de la antena Rx sobre el plano reflector	± 0.01 m
f = f _M , frecuencia del generador de RF que proporciona la señal de prueba para la antena Tx	$\pm(0.001) \times f$ Hz

Tabla 3. Tolerancias máximas, definidas en CISPR 16-1-5, que se cumplen en las mediciones de SA

Para obtener los valores de P_{sitio} , primeramente se realizaron 10 mediciones a la frecuencia de 1 GHz. Se ha observado que la dispersión de estas mediciones es tan baja que no tiene un impacto significativo en la estimación de incertidumbre, por lo que para hacer eficiente el proceso de medición el número de mediciones se ha reducido a 3; con este número de mediciones la contribución de incertidumbre por dispersión de las lecturas es también despreciable. Con respecto a la medición de P_{directa} se hacen 5 mediciones en cada frecuencia, estas se realizan tanto al inicio del proceso de medición de SA como al final del mismo. En la caracterización inicial del PNFA, el proceso se llevó a cabo durante un periodo de 16 días, por lo que se tienen promedios de P_{directa} obtenidos de conjuntos de 160 datos ($n = 5 * 2 * 16 = 160$). En la Tabla 4 se proporciona el ejemplo de estimación de incertidumbre para SA₁ en 1000 MHz.

4.2 Fuentes de incertidumbre principales en la medición del AF

Entre las fuentes de incertidumbre consideradas y que se revisan detalladamente en [1] se tienen las siguientes:

Incertidumbre por resolución en el barrido de altura en la antena receptora, $u_{\text{res}}^{\text{barrido en } h_2}$; Respuesta en frecuencia del amplificador en el lazo de recepción, $u_{\text{amp}}^{\text{resp en frec}}$; Linealidad del amplificador en el lazo de recepción, $u_{\text{amp}}^{\text{linealidad}}$; Incertidumbre debida a las imperfecciones del sitio y a las condiciones del sistema de medición, $u_{\text{sitio y sistema}}$; Atenuación en los cables de RF por cambios de temperatura, $u_{\text{L}}^{\text{cables}}$; Desacoplamiento en el lazo Tx y la antena de prueba, $u_{\text{desacop}}^{\text{Tx}}$; Desacoplamiento en el lazo Rx y la antena de prueba, $u_{\text{desacop}}^{\text{Rx}}$; Directividad de la antena, $u_{\text{directividad}}$. La incertidumbre por el campo, $E_{\text{D}}^{\text{max}}$, no constituye una fuente de incertidumbre. Su valor se considera el resultado de un cálculo exacto. Con respecto a la incertidumbre debido a las variaciones del centro de fase de la antena, $u_{\text{centro de fase}}$, en el caso de los dipolos el centro de fase no se mueve, por eso no existe esta fuente de incertidumbre. Asimismo la incertidumbre debida a las variaciones del patrón de transmisión del dipolo, $u_{\text{Patrón Tx}}$, no constituye una fuente de incertidumbre (Véase I.1.12 de ANSI C63.5-2006 [8]).

4.3 Ejemplos de presupuestos de incertidumbre

En esta sección se proporcionan algunos ejemplos para ilustrar la estimación de incertidumbres para cada uno de los 72 factores de antena calculados. El primer ejemplo se trata del caso de un dipolo del grupo de antenas #1 cuya frecuencia de resonancia es 1000 MHz, ver Tabla 5. El segundo ejemplo corresponde al caso de un dipolo resonante a 500 MHz de las antenas #2, ver Tabla 6, y el tercer ejemplo describe el caso de la estimación de incertidumbres de un dipolo resonante a 30 MHz del grupo de antenas #3, ver Tabla 7.

5. CONCLUSIONES

La realización y establecimiento del PNFA es de gran importancia ya que permite que las mediciones en el campo de la EMC realizadas en el país sean trazables a los patrones nacionales establecidos en el CENAM.

REFERENCIAS

- [1] Mariano Botello Pérez, Victoria Molina López, Israel García Ruiz, "Informe del Patrón Nacional de Factor de Antena (PNFA)". Documento interno. Laboratorio de Antenas y Campos Electromagnéticos, CENAM Qro., México, Agosto 2008.
- [2] V. Molina López, I. García Ruiz, F. Sepúlveda, D. Ávila Jiménez, R. Jiménez López, E. Martínez Martínez, "Perspectivas del desarrollo de las normas para la implantación de la EMC en México", Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica, ENME 2007, Qro., México.
- [3] Ley Federal sobre Metrología y Normalización, disponible en www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130.pdf.
- [4] V. Molina-López, I. García-Ruiz, M. Botello-Pérez, "Informe de Validación del CALTS-CENAM", Documento interno. Laboratorio de Antenas y Campos Electromagnéticos, CENAM. Qro., Diciembre 2006.
- [5] V. Molina-López, M. Botello-Pérez, I. García-Ruiz, "Establishment of the Open Area Antenna Calibration Site at CENAM," CPEM 2008 Proceedings; pp. 510-511. Broomfield, CO, USA, Junio 2008.
- [6] http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter4/4-1.html, consultado por última vez el 27 de Agosto de 2010.
- [7] CISPR 16-1-5:2003, International Electrotechnical Commission, "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," 2003.
- [8] ANSI C63.5-2006, IEEE, "American National Standard Electromagnetic Compatibility-Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control-Calibration of Antennas (9 KHz to 40 GHz)," 2006.

- [9] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* GBIPM/ISO 1995.
- [10] V. Molina-López, I. García-Ruiz, M. Botello-Pérez, "Estimación de incertidumbre en la medición de la atenuación de sitio en la validación del CALTS-CENAM," Simposio de Metrología 2006, Qro, México, Octubre 2006.

SA ₁ a 1000 MHz	Modelo: $SA_1(f)_{dB} = P_{directa}(f)_{dB} - P_{sitio}(f)_{dB}$									
Magnitudes de influencia	Valor estimado [dB]	PDF	$u(x)$ [dB]	c_i	$u(y)$ [dB]	ν	u_c [dB]	ν_{eff}	k $\rho \approx 95.45\%$	U [dB]
$P_{directa}$	5.37	Normal	0.01	1.00	0.01	159	0.16	121	2.03	0.33
Resolución $P_{directa}$ (0.01 dB)	-----	Rectangular	0.00	1.00	0.00	60				
P_{sitio}	-45.36	Normal	0.00	-1.00	0.00	9				
Resolución P_{sitio} (0.01 dB)	-----	Rectangular	0.00	-1.00	0.00	60				
Linealidad del receptor con un intervalo dinámico de 101 dB (0.2 dB)	-----	Rectangular	0.12	1.00	0.12	60				
Sensibilidad a las tolerancias de la Tabla 3 (0.2 dB)	-----	Rectangular	0.12	1.00	0.12	60				
SA ₁ (dB)	50.73									

Tabla 4. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de la medición de la SA₁ en 1000 MHz

AF ₁ a 1000 MHz	Modelo: $AF_1 = 10 \log f_M - 24.46 + 1/2[E_D^{max} + SA_1 + SA_2 - SA_3]$ dB(1/m)									
Magnitudes de influencia	Valor estimado	PDF	$u(x)$ [dB]	c_i	$u(y)$ [dB]	ν	u_c [dB]	ν_{eff}	k $\rho \approx 95.45\%$	U [dB]
SA ₁	50.73 dB	Normal	0.164	0.5	0.081	120	0.16	527	2.00	0.33
SA ₂	51.08 dB	Normal	0.164	0.5	0.081	120				
SA ₃	51.17 dB	Normal	0.164	-0.5	-0.081	120				
$f = f_M$	1000 MHz	No es fuente de incertidumbre								
E_D^{max}	2.72 dB	No es fuente de incertidumbre								
$u_{barrido_{res}}$	----	Rectangular	0.012	1	0.012	60				
$u_{resp \text{ en freq amp}}$	----	Normal	Incluida en la dispersión de SA: $P_{directa} - P_{sitio}$							
$u_{linealidad amp}$	----	Normal	0.051	1	0.051	174				
$u_{sitio y sistema}$	----	Normal	0.051	1	0.051	39				
u_{cables}	----	Rectangular	Incluida en la incertidumbre de SA ₁ , SA ₂ , SA ₃							
$u_{Tx desacop}$	----	Forma U	0.019	1	0.019	60				
$u_{Rx desacop}$	----	Forma U	0.002	1	0.002	60				
$u_{centro de fase}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
$u_{directividad}$	----	Rectangular	0.028	1	0.028	60				
$u_{Patrón Tx}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
AF ₁	32.22 dB (1/m)									

Tabla 5. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de la medición del AF₁ para el dipolo #1 de 1000 MHz

AF_2 a 500 MHz		Modelo: $AF_2 = 10\log f_M - 24.46 + 1/2[E_D^{\max} + SA_1 + SA_3 - SA_2]$ dB(1/m)								
Magnitudes de influencia	Valor estimado	PDF	$u(x)$ [dB]	c_i	$u(y)$ [dB]	ν	u_c [dB]	ν_{eff}	k $\rho \approx 95.45\%$	U [dB]
SA_1	44.81 dB	Normal	0.164	0.5	0.081	120	0.15	438	2.01	0.31
SA_2	44.85 dB	Normal	0.164	-0.5	-0.081	120				
SA_3	45.09 dB	Normal	0.164	0.5	0.081	120				
$f = f_M$	500 MHz	No es fuente de incertidumbre								
E_D^{\max}	2.57 dB	No es fuente de incertidumbre								
$u_{\text{res}}^{\text{barrido en } h_2}$	----	Rectangular	0.012	1	0.012	60				
$u_{\text{amp}}^{\text{resp en frec}}$	----	Normal	Incluida en la dispersión de SA: $P_{\text{directa}} - P_{\text{sitio}}$							
$u_{\text{amp}}^{\text{linealidad}}$	----	Normal	0.017	1	0.017	104				
u_{sistema}	----	Normal	0.051	1	0.051	39				
u_L^{cables}	----	Rectangular	Incluida en la incertidumbre de SA_1, SA_2, SA_3							
$u_{\text{desacop}}^{\text{Tx}}$	----	Forma U	0.003	1	0.003	60				
$u_{\text{desacop}}^{\text{Rx}}$	----	Forma U	0.004	1	0.004	60				
$u_{\text{centro de fase}}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
$u_{\text{directividad}}$	----	Rectangular	0.028	1	0.028	60				
$u_{\text{Patrón Tx}}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
AF_2	26.33 dB (1/m)									

Tabla 6. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de la medición del AF_2 para el dipolo #2 de 500 MHz

AF_3 a 30 MHz		Modelo: $AF_3 = 10\log f_M - 24.46 + 1/2[E_D^{\max} + SA_2 + SA_3 - SA_1]$ dB(1/m)								
Magnitudes de influencia	Valor estimado	PDF	$u(x)$ [dB]	c_i	$u(y)$ [dB]	ν	u_c [dB]	ν_{eff}	k $\rho \approx 95.45\%$	U [dB]
SA_1	29.99 dB	Normal	0.164	-0.5	0.081	120	0.31	103	2.02	0.63
SA_2	30.05 dB	Normal	0.164	0.5	-0.081	120				
SA_3	30.08 dB	Normal	0.164	0.5	0.081	120				
$f = f_M$	30 MHz	No es fuente de incertidumbre								
E_D^{\max}	-4.77 dB	No es fuente de incertidumbre								
$u_{\text{res}}^{\text{barrido}h_2}$	----	Rectangular	0.012	1	0.012	60				
$u_{\text{amp}}^{\text{resp en frec}}$	----	Normal	Incluida en la dispersión de SA: $P_{\text{directa}} - P_{\text{sito}}$							
$u_{\text{amp}}^{\text{linealidad}}$	----	Normal	0.005	1	0.005	349				
$u_{\text{sito y sistema}}$	----	Normal	0.051	1	0.051	39				
u_L^{cables}	----	Normal	Incluida en la incertidumbre de SA_1, SA_2, SA_3							
$u_{\text{desacop}}^{\text{Tx}}$	----	Forma U	0.273	1	0.273	60				
$u_{\text{desacop}}^{\text{Rx}}$	----	Forma U	0.008	1	0.008	60				
$u_{\text{centro de fase}}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
$u_{\text{directividad}}$	----	Rectangular	0.028	1	0.028	60				
$u_{\text{Patrón Tx}}$	----	No es fuente de incertidumbre para antenas dipolo								
AF_3	3.00 dB(1/m)									

Tabla 7. Ejemplo de presupuesto de incertidumbre de la medición del AF_3 para el dipolo #3 de 30 MHz