

Avances en el Desarrollo del Patrón Nacional de Factor de Antena

Mariano Botello-Pérez, Victoria Molina-López, Israel García-Ruiz

Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
mbotello@cenam.mx

RESUMEN

En la evaluación de la conformidad con diversas normas de Compatibilidad Electromagnética (CEM) se utilizan antenas calibradas en la magnitud de Factor de Antena (FA). Actualmente, en el CENAM se trabaja en el establecimiento del Patrón Nacional de FA con el objetivo de dar trazabilidad a las mediciones que se realizan en este campo en nuestro país. El patrón se compone de un conjunto de 24 ternas de dipolos resonantes de media longitud de onda entonados a frecuencias específicas entre 30 MHz y 1 000 MHz. En este trabajo se describen la realización física de este patrón y el cálculo teórico de su FA.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se hacen mediciones de intensidad de campo eléctrico, E , este campo que incide en la estructura de la antena induce una corriente eléctrica, de manera que es posible medir una tensión (V_r) en las terminales de la antena, Fig. 1.

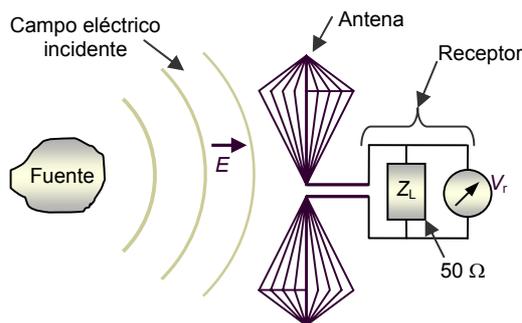


Fig. 1. Concepto de factor de antena.

La función que describe la relación entre la intensidad del campo eléctrico incidente, en V/m, con el valor de la tensión medida en las terminales de la antena, en V; es el FA que puede escribirse como se indica en la Ec. (1) [1]:

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

Existe una ambigüedad cuando se especifica el FA de una antena, ya que el nivel de tensión de salida de una antena es dependiente de la carga que se conecta en sus terminales. Sin embargo, la mayoría de los receptores de radiofrecuencia (RF) tienen impedancia de entrada resistiva de 50 Ω , de manera que la mayoría de los FA publicados consideran que la impedancia de carga que se conecta a la antena es de 50 Ω .

El FA para el campo eléctrico tiene unidades de 1/m. Sin embargo, para utilizarlo en una escala logarítmica, el FA en dB se refiere o normaliza a un FA de 1 V/m por Volt o 1/m. Por lo cual, el FA para el campo eléctrico se expresa en dB (1/m); en tal caso se entiende que está referenciado a un factor de antena de 1/m como se indica en la Ec. (2):

$$FA [dB(1/m)] = 20 * \log_{10} (E / V_r). \quad (2)$$

El FA puede evaluarse en condiciones de espacio libre de reflexiones, sin embargo, las mediciones de CEM se llevan a cabo sobre una superficie conductora (o superficie reflectora de señales de RF) por lo que es necesario conocer el FA a cierta altura sobre el plano conductor.

Las antenas que se emplean como antenas de referencia para la calibración del FA a frecuencias menores a 1 000 MHz son del tipo dipolo y monopolo. Esto se debe a que su desempeño es calculable con un alto grado de exactitud [2] y por esa razón se utilizan como antenas de referencia al nivel de patrones nacionales.

En el CENAM, el patrón nacional de factor de antena se materializó mediante un conjunto de antenas del tipo dipolo resonante de media longitud de onda. En total se construyeron 24 ternas de dipolos entonados a las frecuencias de medición típicas en el área de CEM en el intervalo de 30 MHz a 1 000 MHz. Las frecuencias de medición establecidas en la norma CISPR-16-1-5 [3] son (en MHz): 30, 35, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1 000.

La utilidad del patrón nacional de factor de antena se puede resumir en los puntos siguientes:

1. Calibración de otras antenas empleadas como patrones de transferencia de la magnitud de FA (por ejemplo, antenas de banda ancha). Los patrones de banda ancha calibrados permitirán a su vez determinar el FA de todas aquellas antenas que en los laboratorios e industria se utilizan para medir y generar campos electromagnéticos en aplicaciones de CEM.
2. Como parte del sistema para validar sitios de calibración de antenas (CALTS, por sus siglas en inglés) y verificar su conformidad con los requerimientos de normas internacionales.
3. Como parte del sistema 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. Estos sitios se conocen como sitios de pruebas de conformidad (COMTS, por sus siglas en inglés).
4. Para realizar comparaciones de atributos metrológicos de otros CALTS existentes en laboratorios nacionales de metrología.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS ANTENAS DE REFERENCIA

En el CENAM se desarrollaron tres juegos de dipolos patrón. Cada juego consta de 24 antenas sintonizadas a cada una de las frecuencias de interés en el intervalo de 30 MHz a 1 000 MHz. Los dipolos se diseñaron siguiendo las especificaciones que se detallan en la sección 4.3.2 de la norma CISPR 16-1-5 [3]. Las antenas dipolo se componen de dos partes principales: un elemento de alimentación de banda ancha (balún) y una estructura de radiación cilíndrica de longitud finita, véase Fig. 2.

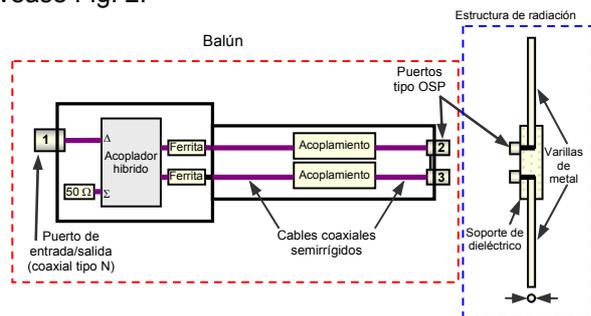


Fig. 2. Estructura de la antena dipolo patrón.

Los balunes comerciales con que dispone el laboratorio cumplen con las características normativas descritas en el punto 4.3.2 de la norma CISPR 16-1-5 [3] y son similares al descrito en el apéndice B de la misma norma. Estos balunes se

utilizan para proveer alimentación simétrica a los elementos radiadores del tipo dipolo en todo el intervalo de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 1 000 MHz, así como para proveer un medio de acoplamiento de impedancias entre la línea de transmisión coaxial que viene del generador/receptor y los elementos radiadores.

La estructura de radiación se compone de dos conductores cilíndricos (elementos radiadores), de un soporte de material dieléctrico y de un par de conectores coaxiales del tipo OSP de presión, Fig. 2. El soporte de material dieléctrico mantiene alineados a los elementos cilíndricos y sirve de base para enroscar a los conectores OSP. Los elementos cilíndricos en el extremo sujeto por el soporte se encuentran separados una distancia muy corta que permite sean soldados al conductor central de los conectores OSP.

Las dimensiones de los elementos radiadores, mostrados en la Fig. 3, dependen completamente de la frecuencia a la cual se quiera entonar el dipolo de media longitud de onda. Por ese motivo en la sección siguiente se describe el procedimiento utilizado para calcular las dimensiones de los 24 dipolos desarrollados.

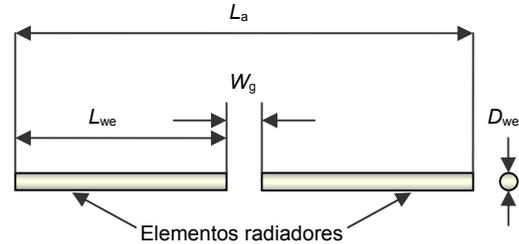


Fig. 3. Esquema de los elementos radiadores.

3. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS RADIADORES

El diseño de los elementos radiadores se basa en resultados derivados de la teoría electromagnética. El detalle de las ecuaciones de diseño de los elementos radiadores se describe en la sección 2 de [4], por lo que únicamente se presentan los resultados útiles para este trabajo.

En la Tabla 1 se presentan las longitudes totales de los elementos radiadores, L_a , del tipo dipolo de media longitud de onda que se obtuvieron con el procedimiento descrito en [4]. Los diámetros de los elementos radiadores se escogieron lo suficientemente delgados para que la razón longitud / radio fuese grande y el modelado con el programa

NEC [5] arrojase resultados con la mayor exactitud posible, tal como se recomienda en [6]. Cabe mencionar que, para seleccionar los diámetros de los elementos radiadores, se consideraron diámetros comerciales de tubos de aluminio y varillas de latón, de manera que fuese posible la construcción de las antenas.

Tabla 1. Características físicas de los dipolos.

Frecuencia de resonancia [MHz]	Diámetro D_{we} [mm]	Longitud L_a [m]	Longitud L_{we} [m]	Material
30	9,525	4,801	2,378	Tubo de aluminio
35	9,525	4,111	2,032	
40	9,525	3,593	1,773	
45	9,525	3,191	1,572	
50	9,525	2,867	1,412	
60	9,525	2,387	1,170	
70	9,525	2,043	0,998	
80	4,7625	1,796	0,893	Varilla de latón
90	4,7625	1,595	0,793	
100	4,7625	1,435	0,713	
120	4,7625	1,193	0,592	
140	4,7625	1,021	0,506	
160	4,7625	0,893	0,442	Varilla de latón
180	3,175	0,796	0,393	
200	3,175	0,715	0,353	
250	3,175	0,571	0,281	
300	3,175	0,475	0,233	
400	3,175	0,355	0,173	
500	3,175	0,283	0,137	
600	3,175	0,235	0,113	
700	3,175	0,201	0,096	
800	3,175	0,175	0,083	
900	3,175	0,156	0,073	
1000	3,175	0,140	0,065	
1000	2,381	0,141	0,066	

La longitud de cada uno de los elementos radiadores, L_{we} , se determinó con:

$$L_{we} = (L_a - W_g) / 2, \tag{3}$$

donde L_a es la longitud total de la antena, L_{we} es la longitud de cada uno de los elementos radiadores y W_g es la separación entre elementos. En la práctica es imposible que la separación W_g sea infinitamente pequeña, para nuestro caso la estructura del balón la limita a 9 mm.

4. CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS RADIADORES

La construcción de los dipolos patrón se realizó en el laboratorio de fabricación del CENAM. La

realización física de éstos requirió que se fabricaran los soportes de material dieléctrico, los elementos radiadores y que se hicieran algunas modificaciones a conectores coaxiales miniatura tipo OSP.

Para los dipolos de 30 MHz a 70 MHz no fue necesario construir soportes de material dieléctrico, ya que se cuenta con soportes de baquelita comerciales (Fig. 4a). Para los dipolos de 80 MHz a 160 MHz se construyeron soportes de teflón cuya forma se muestra en la Fig. 4b. Los soportes para los dipolos de 180 MHz a 400 MHz tienen la misma forma que los mostrados en la Fig. 4b, con la única variante de que el diámetro por donde entran los elementos radiadores es más pequeño. La forma de los soportes para los dipolos comprendidos entre 500 MHz y 1 000 MHz se muestra en la Fig. 4c.



a) Para los elementos de 30 MHz a 70 MHz



b) Para los elementos de 80 MHz a 400 MHz



c) Para los elementos de 500 MHz a 1000 MHz

Fig. 4. Soportes de material dieléctrico.

Se utilizó teflón para construir los soportes porque era el material dieléctrico con la constante dieléctrica más baja disponible, además de tener una estructura molecular que permite maquinarlo con facilidad. Es importante que la constante dieléctrica sea lo más pequeña posible, porque la forma del soporte altera las propiedades electromagnéticas de la antena, principalmente cuando las dimensiones de los dipolos son comparables con las de los soportes [6], tal como sucede en las frecuencias de 900 MHz y 1 000 MHz.

Los elementos cilíndricos radiadores entonados en las frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 70 MHz se construyeron con tubo de aluminio con diámetro de 3/8 de pulgada. Para las frecuencias comprendidas entre 80 MHz y 160 MHz se utilizó varilla de latón de 3/16 de pulgada, para las frecuencias comprendidas entre 180 MHz y 900 MHz se utilizó varilla de latón de 1/8 de pulgada, y para los de 1 000 MHz se utilizó varilla de latón de 3/32 de pulgada.

Se utilizó tubo de aluminio para las frecuencias más bajas porque es más ligero que la varilla de latón, lo cual es un factor crítico en este intervalo de frecuencias donde las longitudes requeridas son muy grandes y los elementos tienden a doblarse por su peso. Antes de ensamblar los elementos radiadores fue necesario adecuar a nuestras necesidades 100 conectores coaxiales miniatura tipo OSP, la cual fue una tarea con cierto grado de dificultad dadas sus dimensiones pequeñas. La Fig. 5 muestra las modificaciones a los conectores OSP.



Fig. 5. Modificaciones a conectores tipo OSP.

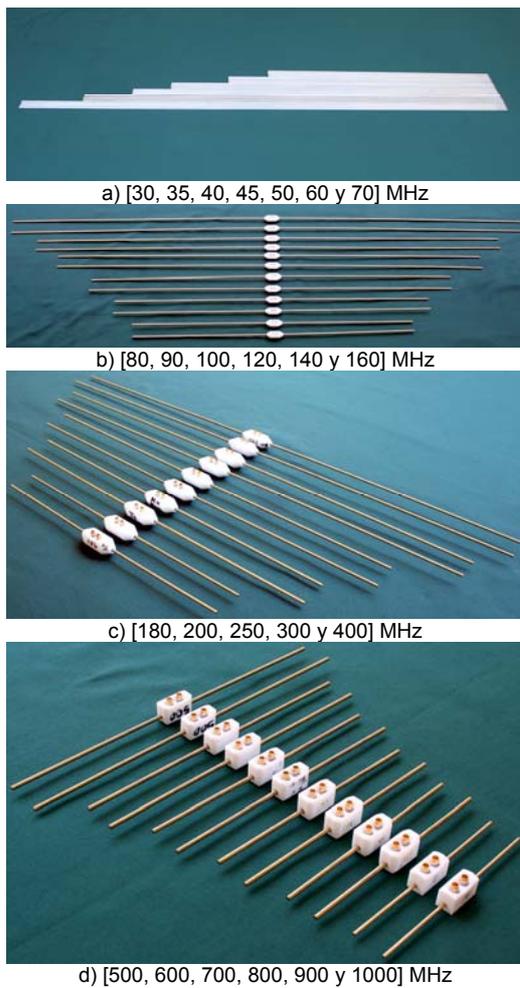


Fig. 6. Estructuras de radiación.

Una vez que se construyeron todas las piezas que forman parte de la estructura de radiación se procedió a ensamblarlas. Para ello, la alineación de los elementos radiadores fue una tarea difícil dadas las dimensiones pequeñas de los soportes y de los conectores OSP.

Algunas fotos de cómo se ensamblaron las antenas con soporte de teflón se presentan en la Fig. 6. Los elementos radiadores para las frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 70 MHz no se soldaron a los soportes de baquelita (Fig. 4a), sino que en uno de sus extremos se les adaptó un perno con rosca de 5/16 de pulgada para que pudiesen atornillarse en los extremos de los soportes.

5. CÁLCULO TEÓRICO DEL FA

El cálculo teórico del FA de los dipolos desarrollados en el CENAM se llevó a cabo para dos ambientes electromagnéticos diferentes, los cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones del cálculo teórico del FA.

Ambiente de cálculo	Herramienta de cálculo	Frecuencia de aplicación	
		Resonancia	Otras
Espacio libre	Método 1: Ec. E.1 de la norma CISPR-16-1-4 [7]	X	
	Método 2: Programa de simulación NEC	X	X
Sobre plano de tierra	Método 3: Dos antenas y el programa de simulación NEC	X	X

5.1. Herramienta Numérica de Cálculo

La herramienta numérica utilizada para calcular valores de FA es el programa llamado *Numerical Electromagnetic Code* (NEC). En este programa las antenas se modelan mediante alambres rectos que se dividen en segmentos para propósitos de análisis (Fig. 7). La geometría que se introduce en el NEC, para los propósitos de cálculo de valores de FA consiste de dos alambres (dipolos) separados una distancia R y situados en un espacio libre de reflexiones o a cierta altura sobre un plano de tierra ideal el cual es infinitamente grande, con conductividad infinita y perfectamente plano, según sea el caso (Fig. 8). El alambre que representa la antena transmisora se alimenta en su segmento central con una tensión de $U = 1$ V, y la antena receptora se carga en su segmento central con una

impedancia, Z_L , cuyo valor puede ser igual con la impedancia de entrada del balún que se le conecta a la antena ó igual a 100Ω . Se utilizaron 31 segmentos para modelar las antenas dipolo, valor elegido siguiendo la sugerencia dada en el punto C.2 de la norma CISPR 16-1-5 [3].

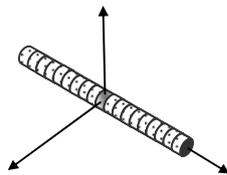


Fig. 7. Modelado de un dipolo a través de segmentos en NEC.

Con la configuración descrita es posible calcular el FA del dipolo mediante la información de salida del simulador. Los parámetros de salida de interés del simulador son: la impedancia de entrada de la antena transmisora Z_A , la impedancia de entrada de la antena receptora Z_C y la corriente I_L que fluye por la impedancia de carga.

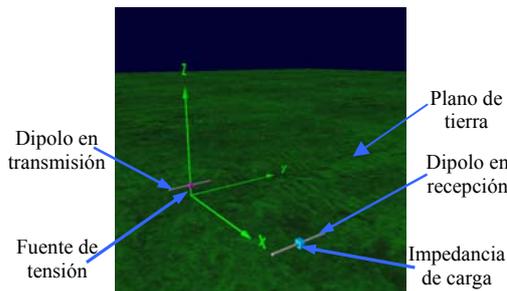


Fig. 8. Configuración empleada en el NEC para el cálculo de valores de FA.

5.2. Cálculo en Espacio Libre de Interacciones

En la condición de espacio libre se utilizaron los dos métodos señalados en la Tabla 2. En el primer método se utilizó la Ec. (E1) del apéndice E de la norma CISPR-16-1-4 [7], la cual sólo requiere de dos parámetros para poder calcular el FA. Estos son la impedancia característica en el puerto de entrada del balún (Z_0) que para nuestro caso es 100Ω , y la frecuencia (f) dada en MHz, Ec. (4):

$$FA[dB(1/m)] = 20 * \log_{10}(2\pi/\lambda) + 10 * \log_{10}(73.2/Z_0)$$

$$FA [dB(1/m)] = 20 * \log_{10}(f) - 31.9 \quad (4)$$

En el segundo método (Tabla 2), basado en el programa NEC, se recurre a la definición de FA, Ec. (1), de manera que a la herramienta de simulación

se le instruye para que la antena en transmisión genere un campo eléctrico, y se le pide que a cierta distancia de la fuente, R , determine la intensidad del campo (Fig. 9a). Posteriormente, en el mismo punto del espacio se coloca el dipolo bajo calibración (DBC) del cual queremos conocer su FA. Al DBC se le conecta una impedancia de carga Z_L , generalmente igual con la impedancia de entrada del balún, y se le solicita al NEC que evalúe la corriente que circula por la carga, I_L , con la cual es posible determinar la tensión en las terminales de entrada del DBC (Fig. 9b). De manera que se cuenta con toda la información necesaria para calcular el FA del DBC mediante la Ec. (5):

$$FA [dB(1/m)] = 20 * \log_{10} \left(\left| \frac{E}{Z_L I_L} \right| \right) \quad (5)$$

Con el propósito de asegurar la validez de los resultados de los dos métodos de cálculo antes descritos, se realizó una comparación de lo obtenido por ambos métodos. Para esto, consideramos que Z_L y Z_0 fuesen iguales con 100Ω , y que en el simulador la distancia de separación entre antena fuente y DBC fuese de $R = 10 \lambda$. Las dimensiones de los dipolos utilizados son las que se indican en la Tabla 1. En la Tabla 3 se observa que los valores de FA obtenidos con ambos métodos son muy similares, las diferencias encontradas no son mayores a 0,13 dB. Por lo tanto se consideran validados los resultados entregados por el NEC.

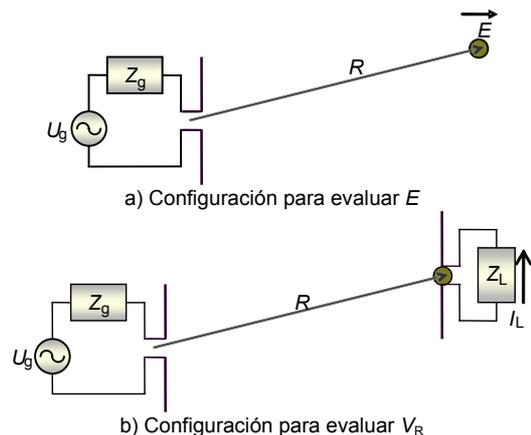


Fig. 9. Simulación de FA en espacio libre.

5.3. Cálculo Sobre un Plano de Tierra

En la condición sobre un plano de tierra se utilizaron los métodos 2 y 3 señalados en la Tabla 2. En el método 2, el FA del DBC sobre un plano de tierra se

obtuvo con el NEC mediante un procedimiento de cálculo análogo al del caso sin plano de tierra. Primero se genera un campo eléctrico y se determina su intensidad a la distancia R de la fuente y a una altura h sobre el plano (Fig. 10a), después se coloca el DBC en ese mismo punto y puesto que se conoce la corriente que circula por la carga, se determina la tensión en sus terminales de entrada (Fig. 10b), se aplica la Ec. (5) y se obtiene el FA.

Tabla 3. Comparación de FA en espacio libre.

Frecuencia de resonancia [MHz]	FA NEC $R = 10 \lambda$ [dB(1/m)]	FA Norma [dB(1/m)]	Diferencia [dB]
30	-5,27	-5,40	0,13
35	-3,93	-4,06	0,13
40	-2,77	-2,90	0,13
45	-1,75	-1,88	0,13
50	-0,83	-0,97	0,13
60	0,75	0,62	0,13
70	2,09	1,96	0,13
80	3,25	3,12	0,13
90	4,27	4,14	0,13
100	5,19	5,05	0,13
120	6,77	6,64	0,13
140	8,11	7,98	0,13
160	9,27	9,14	0,13
180	10,29	10,16	0,13
200	11,21	11,08	0,13
250	13,14	13,01	0,13
300	14,72	14,60	0,13
400	17,22	17,10	0,12
500	19,15	19,03	0,12
600	20,74	20,62	0,12
700	22,07	21,96	0,11
800	23,23	23,12	0,11
900	24,25	24,14	0,11
1000	25,16	25,05	0,11
1000	25,17	25,05	0,11

Por otro lado, para obtener el FA del DBC con el método de las dos antenas (método 3 de la Tabla 2) se calculó la atenuación de sitio (AS) considerando dos antenas iguales. De esta manera, determinar el FA de ambas antenas a una distancia R y a una altura h sobre el plano de tierra, requiere que en la Ec. (6) se conozca el valor de AS cuando las dos antenas están precisamente separadas una distancia R y a una altura h sobre el plano de tierra, Fig. (11). Esta AS se calcula con la ayuda del simulador y el proceso de cálculo descrito en [4].

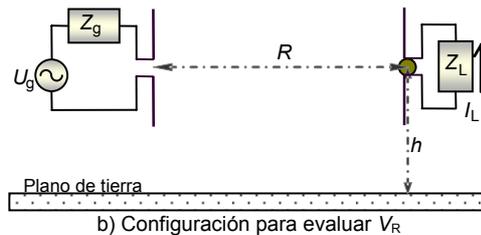
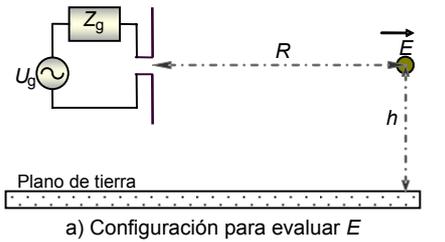


Fig. 10. Simulación de FA sobre plano de tierra.

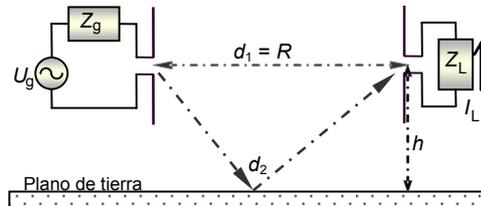


Fig. 11. Configuración para determinar la AS.

$$FA_{dB} = 10 * \log_{10} f_M + \frac{1}{2} \left\{ AS_{dB} + 20 \log_{10} E_D \right\} - 20 \log_{10} (5Z_0/2\pi), \quad (6)$$

donde $E_D = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos(k[d_2 - d_1])} / d_1d_2$,
 $d_2 = \sqrt{R^2 + 4h^2}$, $d_1 = R$, y $k = 2\pi/\lambda$.

Una vez más, para validar los valores de FA obtenidos con ambos métodos se hizo una comparación entre los dos conjuntos de resultados. Las dimensiones de los dipolos que se utilizaron son las que se presentan en la Tabla 1, la distancia de separación entre antenas se consideró de 10 m, y las impedancias de carga e impedancia característica de 100 Ω .

En la Tabla 4 se observa que los valores de FA obtenidos con ambos métodos son muy similares, las diferencias encontradas en la mayoría de las frecuencias son menores a 0,07 dB, salvo en cuatro casos donde las diferencias van de 0,20 dB a 0,36 dB. Las diferencias se atribuyen a que la Ec. (6) no considera los efectos de acoplamiento mutuo entre antenas, lo cual sí lo considera el simulador. De

esta manera los resultados entregados por ambos métodos se consideran validados.

Tabla 4. Comparación de FA sobre plano ideal.

Frecuencia de resonancia [MHz]	Altura h [m]	FA NEC $R = 10$ m [dB(1/m)]	FA 2 antenas $R = 10$ m [dB(1/m)]	Diferencia [dB]
30	4,00	-4,03	-4,07	0,04
35	4,00	-3,49	-3,51	0,02
40	4,00	-3,56	-3,21	0,36
45	4,00	-2,06	-2,37	0,31
50	4,00	-1,58	-1,34	0,25
60	4,00	1,30	1,23	0,07
70	4,00	2,48	2,44	0,05
80	4,00	2,83	2,87	0,03
90	4,00	4,07	4,05	0,01
100	4,00	5,49	5,45	0,05
120	4,00	6,50	6,53	0,02
140	2,00	8,44	8,45	0,00
160	2,00	8,87	8,90	0,02
180	2,00	10,13	10,11	0,02
200	2,00	11,51	11,53	0,01
250	1,50	13,18	13,19	0,01
300	1,50	14,70	14,70	0,01
400	1,20	16,91	16,92	0,00
500	2,30	19,26	19,27	0,01
600	2,00	20,73	20,73	0,00
700	1,70	22,11	22,10	0,00
800	1,50	23,22	23,20	0,02
900	1,30	24,36	24,55	0,20
1000	1,20	25,15	25,20	0,05

6. UTILIDAD DE VALORES TEORICOS DE FA

Los valores de FA estimados teóricamente o por simulación en computadora son de utilidad para determinar si los valores medidos de FA de los dipolos que materializan el patrón nacional son correctos y qué tan cercanos están de los valores ideales. Los valores estimados de FA en espacio libre se emplearán para calcular valores de AS normalizada requeridos por la norma CISPR 16-1-4 [7] para la validación de COMTS.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se determinaron y validaron los valores teóricos de FA del patrón nacional de FA en dos ambientes electromagnéticos diferentes. Uno de ellos es el espacio libre de interacciones, y el otro es sobre un plano de tierra conductor que asemeja mucho el ambiente electromagnético que se tiene

durante las mediciones típicas de emisiones radiadas en aplicaciones de CEM. También se informa de la materialización del patrón nacional de FA mediante ternas de antenas del tipo dipolo resonante de media longitud de onda en 24 frecuencias de medición típicas para el área de CEM en el intervalo de 30 MHz a 1 000 MHz. Algunas de las antenas desarrolladas se han utilizado para medir la AS durante la validación del CALTS-CENAM con muy buenos resultados [8, 9]. Esto nos da la confianza de que los valores de FA del patrón nacional que resulten de su caracterización serán muy próximos a los valores estimados.

REFERENCIAS

- [1] 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)*, April, (2006).
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Harper & Row, New York, (1982).
- [3] CISPR 16-1-5, International Electrotechnical Commission, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-5*, (2003).
- [4] M. Botello-Pérez, V. Molina-López, I. García-Ruiz, Desarrollo de antenas patrón tipo dipolo resonante de media longitud de onda para validación del CALTS-CENAM, Simposio de Metrología 2006, Querétaro, México, Octubre (2006). Artículo E3-2.pdf disponible en: <http://cenam.mx/memsimp06/index.htm>
- [5] G. J. Burke and A. J. Poggio, *Numerical Electromagnetic Code (NEC)*, (1985).
- [6] M. Alexander, M. Salter, B. Loader, and D. Knight, *Broadband Calculable Dipole Reference Antennas*, IEEE Transaction on EMC, Volume 44, No. 1, February, (2002).
- [7] CISPR 16-1-4, International Electrotechnical Commission, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4*, (2003).
- [8] V. Molina-López, I. García-Ruiz, M. Botello-Pérez, Informe de Validación del CALTS-CENAM, Documento Interno del CENAM, Diciembre, (2006).
- [9] 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, Colorado, June, (2008).