

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SITIO DE CALIBRACIÓN A CAMPO ABIERTO DEL CENAM (CALTS-CENAM)

Victoria Molina L., Israel García R.

Laboratorios de Campos Electromagnéticos y de Antenas, Centro Nacional de Metrología,
km 4.5 carr.a los Cués, El Marqués, Qro.

Tel: 01 442 2110500, Fax: 01 442 2110548, E-mail: vmolina@cenam.mx

Resumen. En este artículo se describen los criterios de diseño y las características de construcción del sitio de calibración de antenas del CENAM, CALTS-CENAM, el cual servirá para proporcionar en el país la trazabilidad a patrones nacionales en diferentes áreas de medición, tales como las telecomunicaciones y la compatibilidad electromagnética entre las más importantes.

1. INTRODUCCIÓN

El sitio de calibración a campo abierto del CENAM, de aquí en adelante denotado como CALTS-CENAM (por sus siglas en inglés, *Calibration Test Site*), es una de las instalaciones más importantes con las que se cuenta en el CENAM. Este CALTS-CENAM también puede emplearse como sitio de pruebas a campo abierto (OATS, *Open Area Test Site*) para mediciones de perturbaciones radiadas en el área de Compatibilidad Electromagnética (EMC, *Electromagnetic Compatibility*). Con un presupuesto aproximado de 5 millones de pesos y en un tiempo estimado de 5 años, el CALTS-CENAM se construyó en el lado sudoeste de las instalaciones del CENAM, en el municipio del Marqués en el estado de Querétaro. En este artículo se describen sus características de diseño y construcción, las cuales están basadas en las recomendaciones de la norma internacional CISPR16-1 [1]. La obra civil de las instalaciones de los laboratorios de antenas y campos electromagnéticos se declararon funcionales en el primer trimestre del 2003 (Figura 1), a partir de entonces y hasta el momento, basados en la

normalización internacional existente, se trabaja en la caracterización del CALTS-CENAM, para su empleo como sitio de referencia.

2. CONSTRUCCIÓN DEL CALTS-CENAM

2.1 “Zona libre de obstrucción” del CALTS-CENAM

Se llama “zona libre de obstrucción” al área sobre el plano metálico que rodea el equipo bajo prueba (EBC) y de acuerdo con [1], para un CALTS con tornamesa, como en el caso del CALTS-CENAM, la zona libre de obstrucción se define por una elipse [2, 3], en cuyos focos se colocan la antena receptora y el equipo bajo calibración; el eje mayor de esta elipse es igual al doble de la distancia de medición, R , y el eje menor es igual a producto de la distancia de medición por la raíz cuadrada de 3 (Figura 2). Esta área es lo suficientemente grande, tal que se espera que los dispersores fuera de ella tengan poco efecto en la medición de los campos electromagnéticos de interés.



Figura 1. CALTS-CENAM. (a) Plano de antenas, (b) Laboratorios de antenas y campos electromagnéticos y (c) Ubicación de los laboratorios con respecto al plano de tierra.

CENAM consta de cinco secciones independientes, incluyendo espacios entre secciones adyacentes a los cuales se hará referencia como "entrecalles". Cada sección se fija a una losa de concreto armado mediante tornillos deslizables, lo cual permite absorber los efectos de dilatación mediante el desplazamiento de cada sección a través de las entrecalles. La división en cinco secciones, numerados de 1 al 5, se muestra en la Figura 3. A lo largo del eje central se instalaron registros que permiten hacer conexiones subterráneas para realizar mediciones en distancias de prueba desde 1 m hasta 30 m. En la parte central se deja un hueco de 1,20 m de diámetro para alojar el tornamesa.

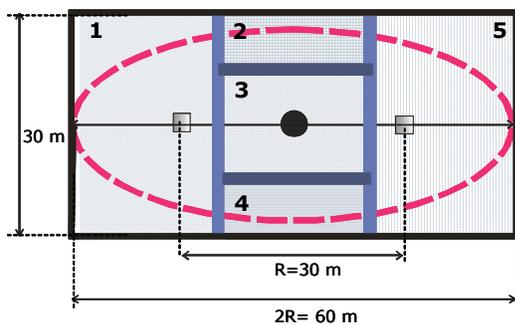


Figura 3. Diseño y dimensiones del CALTS-CENAM

2.5 Rugosidad del CALTS-CENAM

El proceso de construcción seguido para la construcción del CALTS-CENAM ha considerado principalmente el hecho de que se trata de instalaciones muy especiales, que a pesar de estar permanentemente expuestas a las condiciones ambientales, deben mantener sus características a largo plazo. Una de las principales características, es la rugosidad del plano de tierra metálico, ya que dependiendo de esta característica será posible obtener la condición de reflexión especular, lo cual permite conservar los frentes de onda de las señales que rebotan en el CALTS [2].

El grado de rugosidad permisible de la superficie del plano de tierra metálico, depende de las frecuencias y los ángulos de incidencia que serán empleados durante las mediciones. El criterio de Rayleigh provee una estimación útil de la rugosidad del plano de tierra y es el criterio que se recomienda en [1]. Para los OATS, especialmente cuando la distancia de medición considerada es de 3 m, se puede tener una rugosidad de hasta 4,5 cm; y para las distancias de medición de 10 m y 30 m este límite se

incrementa. En el caso de un CALTS, de acuerdo con el Apéndice R de [1], una rugosidad de ± 10 mm se considera suficiente para mediciones de hasta 1 GHz.

Pruebas preliminares de rugosidad realizadas en el CALTS-CENAM mostraron que la diferencia máxima de la altura entre dos puntos del campo de antenas es del orden de $7 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ en un área central de $30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (sección 3 de la Figura 3); y del orden de $10,1 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ entre dos puntos en el resto del plano. Estos valores permiten cumplir de manera satisfactoria con el criterio de Rayleigh [1]. Obtener estos valores de rugosidad ha sido resultado del cuidadoso proceso de construcción del CALTS-CENAM, el cual inició desde la preparación del terreno hasta la colocación de las láminas de material, como se verá a continuación.

2.5.1 Acondicionamiento del terreno para la construcción del CALTS-CENAM

El terreno donde se construya un CALTS debe ser plano y se pueden tolerar pequeñas pendientes para el drenaje de agua [1]. Con esta consideración, la construcción del CALTS-CENAM se realizó en un terreno de $30 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ en el cual fue necesario realizar varias actividades previas con la finalidad de obtener la condición de planicidad requerida y garantizar esta característica a largo plazo. La construcción de una plataforma de concreto armado es una de las partes principales en la construcción del CALTS-CENAM, ya que sobre está se fijará el plano de tierra metálico. La construcción de esta plataforma se hizo en varias etapas. A partir de los resultados de un estudio de mecánica de suelos, se determinó la necesidad excavar para remover la arcilla expansiva hasta encontrar terreno firme. Una vez encontrado el terreno firme se depositaron y compactaron varias capas de tepetate, realizando pruebas de compactación a cada capa. Para proteger el trabajo de compactación realizado en el tepetate, es necesario que éste conserve la humedad especificada, para lo cual fue necesario realizar un riego de impregnación; así mismo para proteger el riego de impregnación fue necesario realizar un proceso de poreo, que consiste en esparcir arenilla sobre el riego de impregnación. Después se realizó el proceso de excavación para alojar los elementos estructurales de cimentación, se armaron las trabes, se colocó la parrilla principal de la losa de concreto y se realizó el colado. El proceso de colado se llevó a cabo de manera continua, utilizando aditivos para unir el concreto. Se dejó al centro un espacio de

1,20 m de diámetro para colocar el tornamesa cuyo uso será explicado con detalle posteriormente. De esta manera, la plataforma de concreto sobre la cual se fijará el plano de tierra metálico, posee una excelente resistencia que le permitirá al CALTS-CENAM conservar sus propiedades de rugosidad a largo plazo [2].

2.5.2 La rejilla irving

Una vez terminada la plataforma de concreto se fijaron a ésta, mediante tornillos deslizables, secciones de rejilla de acero galvanizado, conocidas comúnmente como secciones de rejilla Irving. Este tipo de rejilla fue empleada como base sobre la cual se soldaron secciones laminares de acero negro, dando así forma a cada una de las cinco secciones del CALTS-CENAM (Figura 3) [2].

2.5.3 Características de la lámina de acero al carbón

De acuerdo con [1], el material recomendado para la construcción de un plano de tierra que sirva para la medición de campos electromagnéticos es el metal. Los planos de tierra metálicos pueden construirse con láminas de metal sólido, malla metálica, metal perforado, metal expandido, rejillas de metal, malla de alambre. Sin embargo, en los materiales y en la colocación de éstos, deben evitarse los huecos cuyas dimensiones lineales sean fracciones comparables a la longitud de onda de la frecuencia más alta de medición para la que está diseñado el plano de antenas. Para la malla metálica, el metal perforado, mallas de alambre, rejillas de metal y metal expandido, la máxima abertura permisible es 1/10 de una longitud de onda de la frecuencia más alta de medición. Esto es alrededor de 3 cm a 1000 MHz. En el caso del CALTS-CENAM se emplearon secciones de lámina de acero al carbón (Tabla 1) con dimensiones aproximadas de 91 cm × 2,40 m × 3,6 mm. La resistividad eléctrica de estas láminas es del orden de $1,7 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ [5].

Componente		% en Peso
Carbono	C	0.03 – 1.25
Hierro	Fe	80 – 98
Manganeso	Mn	0.2 – 16
Fósforo	P	Máximo 0.05
Azufre	S	Máximo 0.05
Silicio	Si	0 – 0.5

Tabla 1 Tolerancias en la composición de los aceros negros

La instalación de las secciones laminares sobre el campo de antenas de 1800 m² fue realizada fijando, a través de más de cuarenta puntos de soldadura, cada sección a la rejilla Irving y a los segmentos laminares adyacentes. En algunos casos, quedaron entre láminas pequeños espacios que en ningún caso sobrepasan los 3 cm [2].

3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CALTS-CENAM

Un CALTS debe construirse empleando un material conductor y su conductividad eléctrica debe ser aproximadamente igual que la que se indica para el material empleado [1]. El caso particular del CALTS-CENAM se trata con detalle en otro artículo presentado en este simposio de metrología [6].

4. SISTEMA DE TIERRA FÍSICA DEL CALTS-CENAM

El sistema de tierra que se instaló en el CALTS-CENAM fue construido en base a los artículos 921 y 250 de la norma NOM-001-SEDE-1999. Son 22 varillas de cobre alrededor del CALTS-CENAM, enterradas a una profundidad de 3 m, las que conforman el sistema de tierra. Para determinar la calidad de este sistema, los instaladores emplearon un medidor electrónico de resistencia de terreno, conocido comúnmente como *vibroground*, el cual emplea una técnica de medición a 4 hilos, reportando un valor de una resistencia de 6 Ω [2]. Este es un valor aceptable, sin embargo es importante tener en cuenta que este valor es sensible a la resistividad del terreno, característica que puede cambiar dependiendo de la estación del año.

5. TORNAMESA

El propósito de contar con un tornamesa es poder girar el EBC 360° para realizar un barrido angular del campo eléctrico que radía un equipo bajo medición. El material del que debe estar hecha la cubierta del tornamesa depende del propósito de la medición.

En el caso del CALTS-CENAM se realizarán mediciones de emisiones electromagnéticas radiadas por equipos que usualmente se emplean sobre el piso, y para este caso la cubierta del tornamesa debe ser metálica, debe estar al mismo nivel que el plano de tierra y debe estar conectada eléctricamente a éste (Figura 4). También el CALTS-CENAM podrá emplearse para realizar

estas pruebas a equipos que usualmente se colocan sobre escritorios, en estos casos sobre el plato metálico deberá colocarse una torreta y sobre ésta una cubierta de madera, en la cual se instalarán los equipos bajo medición. También es posible, de acuerdo con [1], que en las mediciones de emisiones a equipos que se colocan usualmente sobre el piso, se emplee la plataforma de madera ligeramente por arriba del nivel del plano de tierra.



Figura 4. Plato metálico sobre el tornamesa ubicado en la zona central de plano de tierra

Con respecto a la conductividad eléctrica entre el plato metálico y el resto de la plataforma metálica, ésta se obtiene a través del empleo de las escobillas y los baleros sobre los cuales gira el plato metálico (Figura 5) [2].



Figura 5. Tornamesa, escobillas y baleros

6. PROTECCIÓN DEL CALTS-CENAM CONTRA LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN

De acuerdo con el Apéndice R de [1], el plano reflector no debe cubrirse con capas protectoras con espesores grandes puesto que se puede alterar la fase de la onda reflejada en él y causar así atenuación del frente de onda especular [1]. Sin embargo, en el CALTS-CENAM, conformado por láminas de acero negro que son fácilmente afectadas por la corrosión, fue preciso encontrar los productos químicos más adecuados que permitieran la protección del CALTS sin modificar su desempeño de manera que no se afecte

significativamente la atenuación de sitio normalizada (NSA). De la búsqueda realizada se seleccionaron los siguientes productos, para los cuales se esperan permitividades eléctricas menores a 5, de acuerdo con las tablas encontradas para plásticos como polivinilos, poliésteres, entre otros. Como recubrimiento primario, se aplicó el “122 epoxi-fenólico”, y como acabado se aplicó el “2087 de poliuretano”, actualmente llamado “carbotahne 134” [2]. Para la aplicación de estos productos, fue necesario primero remover, mediante inyección de arena a presión, la pintura colocada como protección inicialmente. Los trabajos de aplicación, tanto del recubrimiento primario como del acabado final, fueron realizados a la intemperie y manualmente por aspersión con pistola; de acuerdo con el contratista, en el plano se aplicaron 175 μm de primario y 50 μm de acabado, aunque dada la técnica de aplicación empleada, es posible que el espesor final de ambos recubrimientos se duplique en las zonas donde se traslaparon los abanicos de pintura formados por la pistola durante la aplicación. A pesar de lo anterior, se consideran despreciables los efectos que éstas finas capas de recubrimientos puedan ocasionar a la señal reflejada en el plano de tierra; esto podrá verificarse posteriormente cuando se mida experimentalmente la NSA [1].

7. PROPÓSITO DEL CALTS-CENAM

Una vez que los laboratorios entren en su fase de operación, los servicios que se presten, estarán destinados a cubrir necesidades de trazabilidad de mediciones en el área de compatibilidad electromagnética de varios sectores nacionales, públicos y privados. Inicialmente, el intervalo de frecuencias de operación de los laboratorios en servicios de calibración de antenas y medidores de intensidad campo, así como en medición de emisiones radiadas y conducidas, será de 10 kHz a 1300 MHz. La distancia de pruebas podrá estar en el intervalo de 1 m a 30 m.

Las magnitudes más importantes comprendidas dentro de los alcances de medición de estos laboratorios son las siguientes: factor de antena; ganancia y patrón de radiación de antenas; intensidad de campo eléctrico; y funciones de transferencia de transductores de campo tales como sondas, redes artificiales de alimentación y abrazaderas absorbentes. La carta de trazabilidad para estos laboratorios se muestra en la Figura 6 [3].

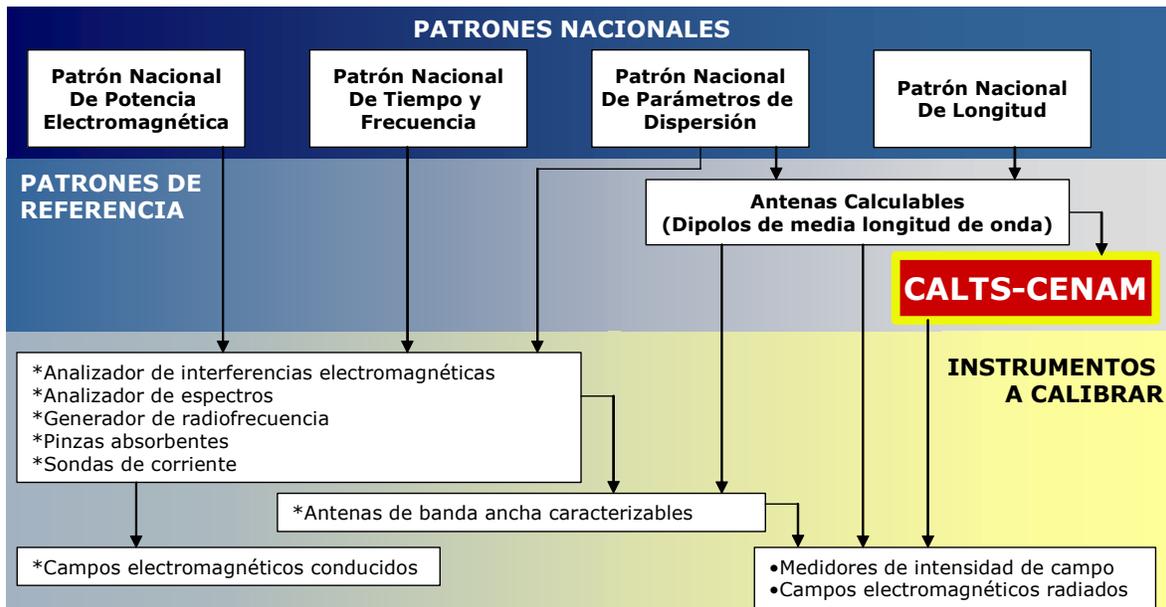


Figura 6. Carta de trazabilidad de los laboratorios de antenas y campos electromagnéticos del CENAM para servicios de medición en el intervalo 10 kHz a 1300 MHz

RECONOCIMIENTOS

Por la colaboración recibida durante la planeación, obtención de los presupuestos y seguimiento de las obras, en todas y cada una de las diferentes etapas de construcción del CALTS-CENAM, expresamos nuestro reconocimiento y agradecimiento al personal del CENAM: Israel García, Martha H. López, Sergio Torres, Pedro Martínez, David Avilés, Felipe Hernández, René Carranza, Héctor Nava y a los tesisistas de licenciatura del Instituto Tecnológico de Querétaro: Juan Guerra y Ariel Cantera.

REFERENCIAS

[1] IEC, Commission Electrotechnical Commission, CISPR 16-1, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus", Edition October 2002, Sections 5.6, Annex G, Annex K & Annex L.

[2] Victoria Molina López e Israel García Ruiz, "Informe técnico: Resistividad eléctrica del sitio de calibración de antenas del CENAM (CALTS-CENAM)". Informe Interno. Laboratorio de Campos Electromagnéticos de la División de Mediciones

Electromagnéticas, Área de Metrología Eléctrica, Centro Nacional de Metrología, CENAM. Abril 2004. Próximo a publicarse.

[3] I. García-Ruiz, V. Molina-López, M. H. López-Sánchez. "Avances del establecimiento del laboratorio de calibración de antenas y campos electromagnéticos en el CENAM", Memorias en disco compacto del SOMI XVII Congreso Nacional de Instrumentación, Mérida, Yuc. Octubre 2002. Clave del documento 17IGR5, Pp. 1-10.

[4] Michael J. Windler, "Site Qualifications above 1 GHz", <http://www.ul.com/emc/emcdef.html> Junio 2004.

[5] Mat-Web.com, The online materials data base, "Steel, general properties", <http://www.matweb.com>, Septiembre 2003.

[6] Victoria Molina-López, "Resistividad eléctrica del Sitio de Calibración de Antenas del CENAM (CALTS-CENAM)", enviado al Simposio de Metrología 2004, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, México. Octubre 2004.