

Noviembre 2004

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida

Ensayos de emisión y de inmunidad en las guías de onda electromagnéticas transversales (TEM)

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-20: Testing and measurement techniques. Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides.

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-20: Techniques d'essai et de mesure. Essais d'émission et d'immunité dans les guides d'onde TEM.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 61000-4-20 de abril de 2003, que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 61000-4-20:2003.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 208 *Compatibilidad Electromagnética* cuya Secretaría desempeña UNESA.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 48388:2004

© AENOR 2004
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

64 Páginas

Grupo 37

ICS 33.100.10; 33.100.20

Versión en español

**Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida
Ensayos de emisión y de inmunidad en las guías
de onda electromagnéticas transversales (TEM)
(IEC 61000-4-20:2003)**

Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 4-20: Testing and measurement
techniques. Emission and immunity testing
in transverse electromagnetic (TEM)
waveguides.
(IEC 61000-4-20:2003).

Compatibilité électromagnétique (CEM).
Partie 4-20: Techniques d'essai et de
mesure. Essais d'émission et d'immunité
dans les guides d'onde TEM.
(CEI 61000-4-20:2003).

Elektromagnetische Verträglichkeit
(EMV). Teil 4-20: Prüf- und
Messverfahren. Messung der
Störaussendung und Störfestigkeit in
transversal- elektromagnetischen (TEM-)
Wellenleitern.
(IEC 61000-4-20:2003).

Esta norma europea ha sido aprobada por CENELEC el 2003-04-01. Los miembros de CENELEC están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CENELEC, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CENELEC en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CENELEC son los comités electrotécnicos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

CENELEC
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN ELECTROTÉCNICA
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 35 B-1050 Bruxelles

PRÓLOGO

El texto del documento CIS/A/419/FDIS, futura edición 1 de la Norma Internacional IEC 61000-4-20, preparado por el Subcomité SC A, *Medida de las perturbaciones radioeléctricas y métodos estadísticos*, de CISPR, en cooperación con el Subcomité SC 77B, *Fenómenos de alta frecuencia*, del Comité Técnico TC 77, *Compatibilidad electromagnética*, de IEC, fue sometido a voto paralelo IEC-CENELEC y fue aprobado por CENELEC como Norma Europea EN 61000-4-20 el 2003-04-01.

Se fijaron las siguientes fechas:

- | | | |
|---|-------|------------|
| – Fecha límite en la que la norma europea debe adoptarse a nivel nacional por publicación de una norma nacional idéntica o por ratificación | (dop) | 2004-01-01 |
| – Fecha límite en la que deben retirarse las normas nacionales divergentes con esta norma | (dow) | 2006-04-01 |

Los anexos denominados “normativos” forman parte del cuerpo de la norma.

Los anexos denominados “informativos” se dan sólo para información.

En esta norma, los anexos A, B, C y ZA son normativos y los anexos D y E son informativos.

El anexo ZA ha sido añadido por CENELEC.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional IEC 61000-4-20:2003 fue aprobado por CENELEC como norma europea sin ninguna modificación.

En la versión oficial, para la bibliografía, debe añadirse la siguiente nota para la norma indicada*:

CISPR 14	NOTA – Armonizada como Norma EN 55014, serie (sin ninguna modificación).
CISPR 20	NOTA – Armonizada como Norma EN 55020:2002 (sin ninguna modificación).
IEC 61000-2-9	NOTA – Armonizada como Norma EN 61000-2-9:1996 (sin ninguna modificación).

* Introducida en la norma indicándose con una línea vertical en el margen izquierdo del texto.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	7
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	8
2 NORMAS PARA CONSULTA	8
3 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	9
3.1 Definiciones	9
3.2 Abreviaturas.....	11
4 GENERALIDADES.....	11
5 REQUISITOS DE LAS GUÍAS DE ONDA TEM	12
5.1 Requisitos generales para la utilización de guías de onda TEM.....	12
5.2 Requisitos especiales para ciertos tipos de guías de onda TEM.....	14
5.3 Consideraciones sobre la incertidumbre de medida	14
6 VISIÓN GENERAL DE LOS TIPOS DE ESE	15
6.1 ESE pequeño	15
6.2 ESE grande.....	15
ANEXO A (Normativo) ENSAYOS DE EMISIÓN DE LAS GUÍAS DE ONDA TEM	16
ANEXO B (Normativo) ENSAYOS DE INMUNIDAD EN LAS GUÍAS DE ONDA TEM ...	37
ANEXO C (Normativo) ENSAYOS DE TRANSITORIOS IEMN-GA EN LAS GUÍAS DE ONDA TEM	44
ANEXO D (Informativo) CARACTERÍSTICAS DE LAS GUÍAS DE ONDA TEM	51
ANEXO E (Informativo) NORMAS QUE CONTIENEN GUÍAS DE ONDA TEM	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60
Figura A.1 Disposición del cable de salida en la esquina del orto-ángulo y en el borde inferior del volumen de ensayo	27
Figura A.2 Posicionador del orto-eje o manipulador.....	28
Figura A.3 Tres posiciones de rotación del eje ortogonal para las medidas de emisión	29
Figura A.4 Orientaciones canónicas de 12 caras/ejes para un ESE típico	30

Figura A.5	Geometría de emplazamiento de ensayo en espacio libre	31
Figura A.6	Celda TEM de dos puertos (septum simétrico).....	32
Figura A.7	Celda TEM de un puerto (septum asimétrico).....	33
Figura A.8	Línea abierta (dos placas)	34
Figura A.9	Línea abierta (cuatro placas, alimentación equilibrada)	36
Figura B.1	Ejemplo de montaje de ensayo para guías de ondas TEM de polarización única	42
Figura B.2	Puntos de calibración de la zona uniforme en una guía de onda TEM.....	43
Figura C.1	Amplitud espectral en el dominio de la frecuencia entre 100 kHz y 300 MHz.....	50
Figura D.1	Guías de onda más sencilla (¡sin onda TEM!).....	57
Figura D.2	Guías de onda para propagación TEM	57
Figura D.3	Vector polarización	57
Figura D.4	Modelo de línea de transmisión para propagación TE.....	57
Figura D.5	Guías de ondas TEM de uno y dos puertos	57
Tabla B.1	Puntos de calibración de la zona uniforme.....	39
Tabla B.2	Niveles de ensayo	40
Tabla C.1	Niveles de ensayo de inmunidad a las perturbaciones radiadas definidos en esta norma.....	50

INTRODUCCIÓN

La serie de la Norma IEC 61000 está publicada en varias partes según la siguiente estructura:

Parte 1: Generalidades

Consideraciones generales (introducción, principios básicos)

Definiciones, terminología

Parte 2: Entorno

Descripción del entorno

Clasificación del entorno

Niveles de compatibilidad

Parte 3: Límites

Límites de emisión

Límites de inmunidad (en la medida en que estos límites no están bajo la responsabilidad de los comités de producto)

Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida

Técnicas de medida

Técnicas de ensayo

Parte 5: Guías de instalación y de atenuación

Guías de instalación

Métodos y dispositivos de atenuación

Parte 6: Normas genéricas

Parte 9: Varios

Cada parte está a su vez subdividida en varias secciones, publicadas bien como normas internacionales, bien como especificaciones técnicas o informes técnicos, algunas de las cuales ya han sido publicadas como secciones. Otras se publicarán con el número de la parte seguido de un guión y de un segundo número que identifique la subdivisión (ejemplo: 61000-6-1).

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida
Ensayos de emisión y de inmunidad en las guías
de onda electromagnéticas transversales (TEM)

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta parte de la Norma IEC 61000 concierne a los métodos de ensayo de emisión y de inmunidad para los equipos eléctricos y electrónicos que utilizan diferentes tipos de guías de onda electromagnética transversal (TEM). Estos tipos comprenden estructuras abiertas (por ejemplo, líneas TEM con placas y simuladores de impulsos electromagnéticos), y estructuras cerradas (por ejemplo, celdas TEM), que pueden ser a su vez clasificadas en guías de onda TEM de un puerto o de puertos múltiples. La gama de frecuencias depende de los requisitos de ensayo especificados y del tipo especificado de guía de onda TEM.

El objeto de esta norma es describir

- las características de la guía de onda TEM, incluyendo las gamas de frecuencia típicas y los límites de las dimensiones del equipo sometido a ensayo, ESE;
- los métodos de validación de las guías de onda TEM para las medidas de CEM;
- la definición del ESE (es decir, la carcasa y el cableado del ESE);
- los montajes de ensayo, los procedimientos y los requisitos para los ensayos de emisiones radiadas en las guías de onda TEM, y
- los montajes de ensayo, los procedimientos y los requisitos para los ensayos de inmunidad radiada en las guías de onda TEM.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se indican son indispensables para la aplicación de esta norma. Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

IEC 60050-161 – *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética.*

IEC 60068-1 – *Ensayos ambientales. Parte 1: Generalidades y guía.*

IEC 61000-2-11 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-11: Entorno. Clasificación de entornos IEMN-GA. Norma básica de CEM.*

IEC 61000-4-3 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-3: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos, radiados y de radiofrecuencia. Norma básica de CEM.*

IEC 61000-4-23 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-23: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de ensayo para los dispositivos de protección para perturbaciones IEMN-GA y otras perturbaciones radiadas. Norma básica de CEM.*

IEC/TR 61000-4-32 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-32: Técnicas de ensayo y de medida. Compendio de simuladores IEMN-GA.*

IEC/TR 61000-5-3 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 5-3: Guías de instalación y de atenuación. Conceptos de protección IEMN-GA. Norma básica de CEM.*

CISPR 16-1 – *Especificaciones de los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas. Parte 1: Aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas.*

CISPR 16-2 – *Especificaciones de los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas. Parte 2: Métodos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad.*

CISPR 22 – *Equipos de tecnología de la información. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medida.*

3 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

3.1 Definiciones

Para los fines de esta parte de la Norma IEC 61000, se aplican las definiciones dadas en la Norma IEC 60050-161 (VEI), así como las siguientes.

3.1.1 modo electromagnético transversal (TEM): Modo de una guía de onda en el que las componentes de los campos eléctrico y magnético en la dirección de propagación son muy inferiores a las componentes primarias de campo en cualquier sección transversal.

3.1.2 guía de onda TEM: Sistema de línea de transmisión abierta o cerrada, en el cual una onda se propaga en modo electromagnético transversal para producir un campo específico para la realización de ensayos.

3.1.3 celda TEM: Guía de onda TEM cerrada, a menudo una línea coaxial rectangular, en la cual una onda se propaga en modo electromagnético transversal para producir un campo específico para la realización de ensayos. El conductor exterior envuelve completamente al conductor interior.

3.1.4 guía de onda TEM de dos puertos: Guía de onda TEM con puertos de medida de entrada/salida en ambos extremos.

3.1.5 guía de onda TEM de un puerto: Guía de onda TEM con un puerto de medida único de entrada/salida. Dichas guías de onda TEM presentan generalmente una terminación de línea en banda ancha en el extremo de puerto no útil para la medida.

3.1.6 línea TEM con placas: Línea de transmisión cargada que consta al menos de dos placas paralelas entre las cuales una onda se propaga en modo electromagnético transversal para producir un campo específico para la realización de ensayos. Generalmente, las caras están abiertas para el acceso y supervisión del ESE.

3.1.7 conductor interior o septum: Conductor interior de un sistema de línea de transmisión coaxial, comúnmente plano en el caso de una sección rectangular. El conductor interior se puede posicionar de forma simétrica o asimétrica con relación al conductor exterior.

3.1.8 conductor exterior o cubierta: Conductor exterior de un sistema de línea de transmisión coaxial, comúnmente de sección rectangular

3.1.9 impedancia característica: Para cualquier frente de onda de fase constante, la amplitud de la relación entre la tensión entre el conductor interior y el conductor exterior, y la corriente en cualquiera de los conductores. La impedancia característica es independiente de las magnitudes tensión/corriente y sólo depende de la geometría de la sección de la línea de transmisión. Las guías de onda TEM normalmente están diseñadas para tener una impedancia característica de 50 Ω . Las guías de onda TEM con una impedancia característica de 100 Ω se utilizan a menudo para los ensayos de transitorios.

3.1.10 material anecoico: Material que presenta la propiedad de absorber, o de reducir, el nivel de energía electromagnética reflejada por este material.

3.1.11 terminación de línea de banda ancha: Terminación que combina una carga discreta de baja frecuencia, para adaptar la impedancia característica de las guías de onda TEM (normalmente $50\ \Omega$), y un volumen de material anecoico de alta frecuencia.

3.1.12 algoritmo de correlación: Rutina matemática para convertir las medidas de tensión de las guías de onda TEM a niveles de intensidad de campo en emplazamiento de ensayo en zonas abiertas (OATS - Open Area Test Sites), en cámara semianecoica o en espacio libre.

3.1.13 tipo de equipo sometido a ensayo: Grupo de productos que presentan características electromagnéticas suficientemente similares para permitir ensayos con la misma instalación de ensayo y el mismo protocolo de ensayo.

3.1.14 cable de salida: Cable que conecta el ESE a los equipos externos a la guía de onda TEM o que sale del volumen de ensayo utilizable definido en el apartado 5.1.2.

3.1.15 cable de interconexión: Cable que conecta subcomponentes del ESE en el interior del volumen de ensayo pero que no sale del volumen de ensayo.

3.1.16 soporte del montaje de ensayo: Soporte no reflectante, no conductor, de baja permitividad y referencia de posicionamiento que permite las rotaciones precisas del ESE tal como las requeridas por un algoritmo de correlación o un protocolo de ensayo.

NOTA 1 – Un material típico es la espuma de poliestireno. No se recomienda el uso de soportes de madera (véase [7]¹⁾).

3.1.17 orto-ángulo: Ángulo formado por la diagonal de un cubo con cada cara en las esquinas triedros del cubo. Suponiendo que el cubo está alineado con el sistema de coordenadas cartesianas de la guía de onda TEM, los ángulos azimut y elevación de la proyección de la diagonal del cubo son de 45° y los ángulos con los bordes de la cara de $54,7^\circ$ (véase la figura A.2a).

NOTA 2 – Cuando está asociado con el equipo sometido a ensayo, este ángulo se denomina generalmente el orto-eje.

3.1.18 componente primaria (de campo): componente de campo eléctrico alineada con la polarización de ensayo prevista.

NOTA 3 – Por ejemplo, en las celdas TEM de dos puertos convencionales, el septum es paralelo al suelo horizontal y el vector de campo eléctrico de modo primario es vertical al centro transversal de la celda TEM.

3.1.19 componente secundaria (de campo): En un sistema de coordenadas cartesianas, cualquiera de las dos componentes de campo eléctrico ortogonales a la componente primaria de campo y ortogonales entre sí.

3.1.20 campo resultante (amplitud): Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, expresada en V/m, de la componente primaria y de las dos componentes secundarias de campo.

3.1.21 manipulador: Cualquier tipo de dispositivo no metálico, manual o automático, similar a una mesa giratoria y capaz de soportar, en múltiples posiciones requeridas por un algoritmo de correlación o un protocolo de ensayo, un ESE fijado. El material tiene que responder a los requisitos definidos por el soporte del montaje de ensayo (véase el apartado 3.1.16). Por ejemplo, véase la figura A.2.

3.1.22 guía de onda TEM hiper-rotada: Guía de onda TEM que ha sido reorientada de tal manera que su orto-eje se encuentra perpendicular a la superficie de la Tierra (véase [6]).

1) Las cifras entre corchetes remiten a la bibliografía.

3.1.23 dependencia/independencia de la gravedad: La fuerza de gravitación de la Tierra tiene una dirección fijada. El ESE puede rotar alrededor de sus tres ejes. Debido a las diferentes posiciones de rotación, el ESE está afectado por la fuerza de gravitación en direcciones diferentes. El ESE es independiente de la gravedad si funciona correctamente en todas las posiciones, esto es, funciona correctamente independientemente de la dirección del vector de gravedad con relación al equipo sometido a ensayo. El ESE es dependiente de la gravedad si no funciona correctamente en una o varias posiciones de ensayo.

3.2 Abreviaturas

BALUN	Simetrizador
DFT	Transformada discreta de Fourier
ESE	Equipo sometido a ensayo
FFT	Transformada rápida de Fourier
GTEM	Modo transversal electromagnético de gigahercios
IEMN-GA	Impulso electromagnético de gran altitud ¹⁾
OATS	Emplazamiento de ensayo en zona abierta
PdE	Puntos de entrada
RF	Radiofrecuencia
SAC	Cámara semianecoica
SPD	Dispositivo de protección contra las sobretensiones
TDR	Reflectómetro en el dominio del tiempo
TE	Transversal Eléctrico (modo)
TEM	Modo Electromagnético Transversal
TM	Transversal Magnético (modo), (modo E)
ROE	Relación de Onda Estacionaria ²⁾

4 GENERALIDADES

Esta norma describe las características fundamentales y limitaciones de las guías de onda TEM, esencialmente el volumen de ensayo, la uniformidad de campo, la pureza del modo TEM y la gama de frecuencia. Una introducción y ciertas características fundamentales de las guías de onda TEM se dan en el anexo D.

Las medidas de las emisiones radiadas en una guía de onda TEM generalmente están en correlación con los métodos de emplazamiento de ensayo en zona abierta (OATS) y de la cámara semianecoica (SAC), que producen resultados de medida válidos y reproducibles de la intensidad del campo perturbador producido por los equipos. En este caso, los algoritmos denominados de correlación se utilizan para convertir los resultados de las medidas en las guías de onda TEM en datos equivalentes OATS, como se describe en el anexo A. Los comités de producto deberían demostrar que existe una buena correlación entre los resultados de las medidas utilizando productos de los tipos generalmente utilizados.

1) En inglés, High-altitude electromagnetic pulse (HEMP).

2) En inglés, Voltage-Standing-Wave-Ratio (VSWR).

Las guías de onda TEM se pueden utilizar igualmente como generadores de campo para los ensayos de inmunidad de los equipos a los campos electromagnéticos. Los detalles se dan en el anexo B. El ensayo de inmunidad en guías de onda TEM se cita en varias normas distintas cuya relación se da en el anexo E.

Las medidas con las guías de onda TEM no están restringidas a la medida de perturbaciones radiadas sobre los equipos ensamblados; ellas se pueden aplicar igualmente a los ensayos de componentes, circuitos integrados y de eficacia del blindaje de los materiales de las juntas y los cables.

5 REQUISITOS DE LAS GUÍAS DE ONDA TEM

Las guías de onda TEM se pueden utilizar para las medidas de emisión e inmunidad cuando se satisfagan ciertos requisitos. Los siguientes métodos se deben aplicar.

NOTA – Este capítulo se concentra en los aspectos generales de validación tales como el modo TEM fundamental y la homogeneidad de campo. Los requisitos específicos de validación para los ensayos de emisión, de inmunidad y de transitorios se dan en los anexos.

5.1 Requisitos generales para la utilización de guías de onda TEM

5.1.1 Verificación del modo TEM. Las guías de onda TEM pueden presentar resonancias alrededor de una cierta frecuencia de corte determinada por las dimensiones de la sección transversal y/o la longitud de la guía de onda. Por razones prácticas, se considera que el campo en el interior de una guía de onda TEM se propaga en un modo TEM cuando se satisfacen los siguientes requisitos. Generalmente, un fabricante de guías de onda TEM tiene que verificar y documentar el comportamiento en modo TEM sobre la gama de frecuencias deseada, e incluir los datos de verificación en la documentación del sistema.

NOTA 1 – El comportamiento en modo TEM se tiene que confirmar a intervalos regulares (véase el apartado B.2.2).

Utilizando un procedimiento de calibración en zona uniforme del tipo de los utilizados para la inmunidad (conforme al apartado B.2.2), las amplitudes de las componentes de los campos eléctricos secundarios (no previstas) deben ser al menos 6 dB inferiores a la componente primaria del campo eléctrico, al menos en el 75% de los puntos medidos sobre una sección definida de guía de onda TEM (perpendicular a la dirección de propagación). Para dicho 75% de los puntos de medida, se permite una tolerancia sobre la componente de campo eléctrico primaria superior a -0_{+6} dB hasta -0_{+10} dB, o un nivel de componente de campo eléctrico secundario hasta -2 dB de la componente de campo primario, para un máximo del 3% de las frecuencias de ensayo (al menos una frecuencia), siempre que la tolerancia y las frecuencias reales de ensayo se indiquen en los informes de ensayo. Para las guías de onda TEM de gran tamaño, se recomienda un máximo del 3% de las frecuencias de ensayo, estando permitido hasta el 5% si se indica en el informe de ensayo. La gama de frecuencias está comprendida entre 30 MHz y la frecuencia más elevada de utilización prevista de la guía de onda TEM. El primer paso de frecuencia no debe exceder del 1% de la frecuencia fundamental y en lo sucesivo 1% de la frecuencia precedente de 80 MHz a 1 000 MHz, 5% por debajo de 80 MHz y por encima de 1 000 MHz. Una restricción de la velocidad de barrido es el tiempo de respuesta de la sonda de campo. Esta verificación del modo TEM se aplica a las guías de onda utilizadas bien para ensayos de inmunidad, bien para los ensayos de emisión.

NOTA 2 – Para las medidas de transitorios, la frecuencia de inicio debería ser de 100 kHz.

NOTA 3 – El criterio de 6 dB del apartado 5.1.1 especifica el modo TEM fundamental y no la uniformidad de campo. Un campo se considera uniforme si se satisfacen los requisitos del apartado B.2.2. En [17] se indica información adicional relativa a la uniformidad de campo.

5.1.2 Volumen de ensayo y tamaño máximo del ESE. El tamaño máximo de un ESE está relacionado con el tamaño del “volumen de ensayo utilizable” en la guía de onda TEM. El “volumen de ensayo utilizable” de la guía de onda TEM depende del tamaño, de la geometría y de la distribución espacial de los campos electromagnéticos.

El “volumen de ensayo utilizable” de una guía de onda TEM (véanse las figuras A.6 a A.9) depende de la “zona uniforme” según se define en el apartado B.2.2. La dirección de propagación del modo TEM de la guía de onda (normalmente el eje z) es perpendicular a una zona uniforme (plano transversal, normalmente plano xy). En el plano xy , la sección entera del volumen de ensayo utilizable tiene que satisfacer los requisitos de la zona uniforme definida en el apartado B.2.2. El valor mínimo para la distancia h_{ESE} entre el ESE y cada conductor o absorbente de la guía de onda (véanse las figuras A.6 a A.9) se da por la distancia entre el límite de la zona uniforme (véase el apartado B.2.2) y el conductor. Sin embargo, la distancia h_{ESE} no debería ser nula para evitar la eventual modificación de la condición de funcionamiento del ESE por el acoplamiento estrecho del ESE y los conductores de la guía de onda (recomendación: h_{ESE} debería ser superior a $0,05 h$). A lo largo del eje z (dirección de propagación), el volumen de ensayo utilizable está limitado por $z_{\text{min.}} \leq z \leq z_{\text{máx.}}$. La longitud del volumen de ensayo es $L = z_{\text{máx.}} - z_{\text{min.}}$. Los requisitos de una zona uniforme se tienen que satisfacer por las secciones para cada z donde $z_{\text{min.}} \leq z \leq z_{\text{máx.}}$. Se puede estimar que los requisitos del modo TEM se satisfacen para $z_{\text{min.}} \leq z \leq z_{\text{máx.}}$ en las siguientes condiciones:

- si los requisitos del modo TEM se satisfacen en la posición $z_{\text{máx.}}$ y la geometría de la guía de onda es similar a la de uno de los tipos indicados en las figuras A.6 a A.9 con una relación de aspecto constante de h a w (forma inherente) para $0 < z \leq z_{\text{máx.}}$; o
- si los requisitos del modo TEM se satisfacen en las posiciones $z_{\text{min.}}$ y $z_{\text{máx.}}$ y la sección de guía de onda es constante o reducida de manera uniforme para $z_{\text{min.}} < z < z_{\text{máx.}}$ y las derivadas dh/dz y dw/dz constituyen una función suave para $z_{\text{min.}} < z < z_{\text{máx.}}$ (sin pliegues o saltos en las geometrías de los conductores).

El tamaño máximo del ESE está relacionado con el tamaño del “volumen de ensayo utilizable”. El ESE no debe ser de un tamaño superior a $0,6 w$ veces $0,6 L$ (véanse las figuras A.6 a A.9).

NOTA 1 – La serie de la Norma ISO 11452 recomienda un tamaño del ESE de $0,33 w \times 0,6 L$ y la Norma MIL-STD 462D recomienda $0,5 w \times 0,5 L$.

Se recomienda que la altura máxima utilizable del ESE sea de $0,33h$, siendo h igual a la distancia entre los conductores interior y exterior (espaciado del conductor) en el centro del ESE en el volumen de ensayo (por ejemplo, entre el septum y el suelo en una celda TEM). Para todas las guías de onda TEM, el ESE debe caber en el interior del volumen de ensayo utilizable en todas las posiciones de rotación.

NOTA 2 – La mayoría de las normas restringen el tamaño del ESE a $0,33 h$. La mayoría de los documentos entregados por los proveedores de celdas TEM limitan la altura del ESE a un máximo de $0,5 h$. Salvo para las calibraciones de alta precisión, como para las sondas y los captadores de campo, la altura del ESE puede sobrepasar $0,33 h$, pero no tienen que sobrepasarse las recomendaciones del fabricante. La altura máxima utilizable del ESE puede ser superior a $0,33 h$ si el fabricante suministra información relativa a la incertidumbre de medida para los ESE de mayor tamaño. La incertidumbre de medida se tiene que indicar en el informe de ensayo. Información adicional relativa a los efectos de las guías de onda cargadas se da en [25].

5.1.3 Efectos de las guías de onda cargadas. En estudio.

NOTA 1 – Para medir los efectos de una guía de onda cargada, se han propuesto los procedimientos siguientes:

- medidas de corriente de superficie sobre el ESE situado en el espacio libre (OATS es también una opción) o en una guía de onda TEM;
- medidas de campo con un sensor isotrópico;
- medidas con reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR) en puerto de entrada o medidas de la relación de onda estacionaria (ROE);
- pérdida de inserción para guías de onda TEM de dos puertos;
- monopolo insertado a través del conductor exterior de la guía de onda TEM.

NOTA 2 – Para las emisiones radiadas, las correlaciones con grandes ESEs han mostrado una mejora promedio de 1 dB en intensidad de campo correlacionada (véase [20]).

NOTA 3 – Se debería verificar igualmente la influencia del soporte del montaje de ensayo o del manipulador (véase [4]).

5.2 Requisitos especiales para ciertos tipos de guías de onda TEM

5.2.1 Montaje de guías de onda TEM abiertas. Para minimizar los efectos ambientales, se deberían instalar las guías de onda TEM en el interior de una cámara apantallada.

NOTA 1 – La señal ambiental permitida está definida en los anexos A, B, C y depende fuertemente de los objetivos del ensayo.

Una distancia mínima h correspondiente a un espaciado de una placa se requiere entre la guía de onda TEM abierta y el suelo, los muros y las paredes de la cámara apantallada. Un material anecoico complementario puede instalarse de manera apropiada en dicha cámara apantallada para minimizar las reflexiones.

Las distancias anteriores se dan a título indicativo. La reflexión (y la transmisión en las celdas de dos puertos) es la medida final para un desacoplo suficiente entre la guía de onda TEM y la cámara apantallada. Nótese que es posible construir una guía de onda TEM abierta donde una placa está constituida por el suelo de la cámara apantallada y la otra es un septum instalado.

NOTA 2 – La Norma MIL-STD 462 requiere que las guías de onda TEM abiertas estén situadas en una cámara apantallada. La distancia mínima requerida con relación a los muros se debería fijar en función del tamaño de la guía de onda. La Norma MIL-STD 462D RS 105 requiere una distancia igual a 2 veces h entre el plano metálico más cercano incluyendo el techo, las paredes de la cámara apantallada, etc., donde h es la separación vertical máxima de las placas. La Norma CISPR 20 requiere una distancia mínima de 800 mm con las paredes, el suelo y el techo, correspondiente a una h .

5.2.2 Verificación alternativa del modo TEM para una guía de onda TEM de dos puertos. Como una alternativa al apartado 5.1.1, la gama de frecuencias útil de una guía de onda TEM de dos puertos se puede establecer utilizando el método de medida siguiente.

Antes de someter el ESE a los ensayos, se deben determinar las resonancias de la línea TEM para los dispositivos TEM de dos puertos con el montaje de ensayo y el ESE instalados, con el ESE sin alimentación. En este caso, la pérdida de transmisión de la guía de onda TEM en la gama de frecuencias útil debe ser

$$A_{\text{tpérd}} = \left| 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{trans}}} + \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{trans}}} \right) \right| \leq 1 \text{ dB} \quad (1)$$

donde

$A_{\text{tpérd}}$ es la pérdida en transmisión de la guía de onda cargada, en dB;

P_{refl} es la potencia reflejada medida en el puerto de entrada, en W;

P_{trans} es la potencia transmitida medida en el puerto de entrada, en W;

P_{salida} es la potencia de salida medida en el segundo puerto (salida), en W.

NOTA 1 – La potencia reflejada (a la entrada), transmitida y reflejada (a la salida) se mide con relación a la impedancia característica de la guía de onda TEM. No se utiliza un transformador de impedancia. Dicha impedancia únicamente se mide “en línea”. La ecuación (1) es válida para una impedancia característica de 50 Ω .

NOTA 2 – Éste es un método de verificación alternativo para una guía de onda TEM de dos puertos del tipo indicado en la Norma ISO 11452-3. Dicha norma se basa en la hipótesis según la cual los modos resonantes de orden elevado extraerán la energía del modo TEM.

5.3 Consideraciones sobre la incertidumbre de medida

Los procedimientos generales para evaluar las incertidumbres de medida están en estudio. Se recomiendan los procedimientos que siguen al apartado A.4.2.1 para estimar las incertidumbres.

NOTA – Los métodos de estimación de la incertidumbre para las guías de onda TEM se discuten entre otras en [3], [22] y [30].

6 VISIÓN GENERAL DE LOS TIPOS DE ESE

Un tipo de ESE es un grupo de productos que presentan características electromagnéticas o dimensiones mecánicas suficientemente similares para permitir los ensayos con la misma instalación y el mismo protocolo de ensayo. El tipo de ESE y su configuración son válidos para los ensayos de inmunidad y la medida de emisión para permitir un montaje uniforme en el volumen de ensayo.

6.1 ESE pequeño

Un ESE se define como un ESE pequeño si la dimensión mayor del chasis es menor que una longitud de onda a la frecuencia de ensayo más elevada (por ejemplo, a 1 GHz, $\lambda = 300$ mm), y no hay cables conectados al ESE. El resto de ESEs son definidos como ESEs grandes.

6.2 ESE grande

Un ESE se define como un ESE grande si es

- un ESE pequeño con uno o varios cables de salida;
- un ESE pequeño con uno o varios cables conectados distintos a los de salida;
- un ESE con o sin cables que tiene una dimensión mayor que una longitud de onda a la frecuencia de ensayo más elevada;
- un grupo de ESEs pequeños dispuestos en un montaje de ensayo con cables de interconexión distintos a los de salida y con o sin cables de salida.

ANEXO A (Normativo)**ENSAYOS DE EMISIÓN EN LAS GUÍAS DE ONDA TEM****A.1 Introducción**

Este anexo describe los ensayos de emisión en las guías de onda TEM. La validación de la guía de onda TEM y los datos de correlación normalmente los debería suministrar el fabricante de la guía de onda TEM (capítulos A.3 y A.4). Esto permite al usuario concentrar su atención en los capítulos A.5 y A.6.

Hay dos métodos posibles para determinar la conformidad de los resultados de los ensayos de emisión de las guías de onda TEM con un límite.

- Sin correlación con el método OATS

Este enfoque se ha aplicado a familias de producto específicas (por ejemplo, procedimientos para circuitos integrados, dispositivos militares, componentes y módulos para vehículos, etc., como los descritos en las referencias del anexo E). En este caso, los valores leídos para las guías de onda TEM se utilizan para compararse directamente con un límite independiente de perturbación, generalmente desarrollado específicamente para un tipo de guía de onda TEM. En ciertos casos, los límites en las guías de onda TEM se pueden deducir de los valores límite utilizados en otras instalaciones de ensayo (véase [36]).

- Con correlación con el método OATS
- Este enfoque se aplica a los ESEs que tienen que cumplir con los límites de perturbación dados en términos de intensidad de campo OATS a una distancia específica.

Sólo el segundo método de ensayo está descrito en detalle en esta anexo. Los ensayos de emisión que utilizan las guías de onda TEM requieren una validación en guía de onda TEM para los ESEs a fin de demostrar la buena adaptación de la guía de onda TEM que se utiliza. Para cada tipo de ESE se debe realizar un procedimiento de validación como el descrito en el capítulo A.4. En los casos donde sólo una comparación relativa se realiza en el interior de la misma familia de producto de ESE, no se requiere la correlación con el OATS o con otros emplazamientos de ensayo. En este caso, los comités de producto deben suministrar los límites específicos para determinar la conformidad de los datos de medida.

Los algoritmos de correlación o de conversión se describen en el capítulo A.3. Los algoritmos de correlación utilizan medidas de tensión en guía de onda TEM para estimar las intensidades de campo OATS equivalentes. También se pueden estimar las intensidades de campo en espacio libre. Estas intensidades de campo, así como los resultados de ensayo del procedimiento de validación del tipo de ESE, pueden compararse seguidamente con los requisitos de las normas. Los procedimientos de ensayo requieren generalmente que el ESE se rote alrededor de los tres ejes. Es por ello que el ESE necesita ser mecánicamente estable e independiente de la gravedad (véase el apartado 3.1.23).

NOTA – Si se utiliza una guía de onda TEM hiper-rotada (véase [6]), la guía de onda TEM se reorienta de manera que su orto-eje sea perpendicular a la superficie de la Tierra. El ESE sufre una rotación de $\pm 120^\circ$ alrededor de su eje vertical (que es su orto-eje). El ESE no necesita rotarse alrededor de su eje horizontal. El ESE puede ser dependiente de la gravedad.

Todos los requisitos de este anexo que se dan para ESEs pequeños tienen carácter normativo. Los ESEs grandes y las consideraciones específicas relativas al montaje y cableado de los ESE, se dejan para la elaboración de la próxima edición de esta norma.

A.2 Equipo de ensayo

El equipo de ensayo debe cumplir los requisitos aplicables de la Norma CISPR 16-1.

NOTA – Un sensor de campo isotrópico puede verse como una antena (véase la Norma CISPR 16-1 para los requisitos de las antenas). Los procedimientos de calibración de las sondas de campo isotrópicas y sus especificaciones se describen en [24].

A.3 Correlación de las tensiones de las guías de onda TEM con los datos de campo E

A.3.1 Observaciones generales

Este procedimiento se destina a establecer una alternativa a los métodos de ensayo de emisión en OATS. Los resultados de las guías de onda TEM se convierten en datos equivalentes de campo E OATS. Este capítulo describe un algoritmo basado en la hipótesis según la cual una potencia radiada tal como la medida por una guía de onda TEM, será radiada por un dipolo situado sobre un plano de suelo perfectamente conductor. En caso de litigio, el método utilizado en origen, OATS o guía de onda TEM, tiene preferencia.

Las rutinas de correlación incluyen la distancia entre el ESE y cada conductor, h_{ESE} , y el espacio entre conductores h (o separación de placas) (véanse las figuras A.6b y A.7b) en el cálculo. Estos parámetros son análogos a la altura del ESE sobre el suelo h_g , y a la separación de la antena s (figura A.5) en una medida OATS. Las tensiones medidas con el ESE situado en la guía de onda TEM se generan por las emisiones del ESE. Tras la rotación (reposicionamiento) del ESE según los requisitos de la rutina de correlación, las medidas de tensión suplementarias se realizan hasta que las posiciones requeridas se hayan medido. La rutina de correlación utiliza seguidamente estos datos para simular una medida tipo OATS.

NOTA — Se puede encontrar información relativa a la correlación y los datos de correlación para la medida de emisiones en [5], [8], [17], [22], [34], [36], [40] y [41].

El siguiente apartado describe únicamente un algoritmo basado en una medida en tres posiciones. Se han propuesto y pueden utilizarse otros algoritmos para ciertos ESEs (véanse [31] y [41]).

A.3.2 Algoritmos de correlación

Los dos apartados A.3.2.1 y A.3.2.2 muestran aproximaciones de correlación diferentes e independientes. El apartado A.3.2.1 describe la aproximación básica de las rutinas de correlación para el “modelo multipolo”. Este utiliza un juego de medidas en guías de onda para determinar los momentos de los multipolos equivalentes. El apartado A.3.2.2 describe otra rutina de correlación que utiliza tres medidas de tensión. Este procedimiento a menudo se designa bajo el término de “método de la potencia radiada total”.

A.3.2.1 Modelo multipolo. Toda fuente de radiación de tamaño finito se puede reemplazar por el desarrollo de multipolo equivalente que dé el mismo diagrama de radiación en el exterior de un volumen rodeando la fuente. Si la fuente es eléctricamente pequeña (dimensiones características inferiores 0,1 veces la longitud de onda) entonces los primeros coeficientes del desarrollo de los multipolos, en realidad dipolos eléctricos y magnéticos, aportarán una simulación precisa de la fuente. La indicación anterior es válida para una fuente arbitraria. Si la fuente consta únicamente de elementos tales como un dipolo eléctrico o magnético, entonces la restricción del tamaño con respecto a la longitud de onda se puede relajar.

La aproximación de base de las rutinas de correlación entre las guías de onda TEM y el emplazamiento de ensayo en espacio libre o datos en espacio libre, consiste en utilizar un conjunto de medidas en guías de onda TEM para determinar los momentos multipolares. Generalmente se utilizan tres momentos dipolares ortogonales de valor complejo, requiriendo seis o más medidas. Con el método de base de tres medidas, la potencia radiada está disponible pero no los momentos multipolares. Una vez conocidos los momentos multipolares, se puede simular la radiación en espacio libre o sobre un plano de suelo infinito de forma numérica. De esta manera, es posible simular las diferentes configuraciones de antena de fuente a receptor requeridas por las normas de emisión en OATS.

Para las guías de onda TEM de dos puertos, las medidas en ambos puertos producen a la vez informaciones de amplitud y de fase relativa (véanse [14], [29], [30], [35] y [38]). De esta manera, es posible determinar a la vez la amplitud y la fase de los momentos multipolares, y simular de forma precisa el diagrama de radiación, incluyendo eventuales valores nulos debidos a la anulación de fase. Para guías de onda TEM de un puerto, no se dispone de ninguna información de fase relativa; por consiguiente, sólo es posible determinar las amplitudes de los momentos multipolares (véanse [36], [40] y [41]). Porque la información de fase relativa no es conocida, las rutinas de correlación de guía de onda TEM de un puerto parten de la hipótesis según la cual todos los momentos multipolares radian en fase. Esto da una estimación de límite superior (véanse [10], [28] y [39]). No se pueden simular diagramas de radiación detallados. La estimación del límite superior es válida para la comparación con los límites normales. En [31] y [32] se muestra que se produce un acoplamiento por polarización transversal en las guías de onda TEM. Las influencias sobre las medidas de emisiones se han mostrado en dichos documentos.

A.3.2.2 Rutina de correlación de guía de onda TEM de un puerto. La rutina de correlación para un puerto se basa en las tres medidas de tensión realizadas en una guía de onda TEM, a partir de las cuales se puede calcular la potencia total radiada del ESE. Los momentos dipolares individuales no se determinan separadamente. La potencia total radiada se utiliza seguidamente para simular los campos máximos del ESE sobre un plano de suelo basado en un modelo de dipolos paralelos (dipolo fuente y de recepción) transmitiendo la misma potencia total, estando los dos dipolos en horizontal o en vertical.

A.3.2.2.1 Medidas de tensión en celda TEM: tres posiciones. Las emisiones de los ESEs se miden en tres posiciones determinadas como sigue. Un sistema de ejes (x, y, z) se asigna a la celda TEM. Una elección normal consiste en alinear el eje z en la dirección de propagación, El eje y paralelamente al campo E (vertical) y el eje x paralelo al campo H . El centro del ESE está situado en $(x = 0, y, z)$, con $x = 0$ en el medio del septum. Un sistema local de coordenadas “primas” (x', y', z') se asigna al ESE. La posición a alinea x' con x , y' con y y z' con z como se indica en la figura A.3. La posición b se obtiene simplemente permutando los ejes “primos” del ESE. La posición c se obtiene por una permutación suplementaria: x' con z , y' con x , z' con y . Designando las tres medidas de tensión por V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} , se puede mostrar (véanse [31] y [41]) que la potencia total radiada P_0 , debida al ESE viene dada por

$$P_0 = \frac{\eta_0}{3\pi} \cdot \frac{k_0^2}{e_{0y}^2 Z_C} \cdot S^2 \quad \text{en W} \quad (\text{A.1})$$

donde

$$S = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2 + V_{p3}^2} \quad \text{con } V_p \text{ en V} \quad (\text{A.2a})$$

$$S = \sqrt{10^{\frac{V_{p1}|_{\text{dB}} - 120}{10}} + 10^{\frac{V_{p2}|_{\text{dB}} - 120}{10}} + 10^{\frac{V_{p3}|_{\text{dB}} - 120}{10}}} \quad \text{con } V_p|_{\text{dB}} \text{ en dB}\mu\text{V} \quad (\text{A.2b})$$

y

V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} son las medidas de tensión a partir de las tres posiciones del ESE;

S es la raíz cuadrada de la suma de las tensiones medidas al cuadrado, en V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda, k_0 , en $\frac{1}{\text{m}}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$ es la impedancia de onda en espacio libre, η_0 , en Ω ;

Z_C es la impedancia característica de la guía de onda TEM (normalmente 50Ω), en Ω ;

e_{0y} es el factor de campo: la componente y normalizada de un campo eléctrico del modo TEM en el emplazamiento del ESE [para la ecuación(A.1): $(x = 0, y, z)$], e_{0y} en $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$.

NOTA – Para ciertos ESEs, puede ser necesario someter los ensayos a tres posiciones ortogonales para cada una de las cuatro posiciones de partida (posiciones de partida a1, a2, a3, y a4 de la figura A.4) para un total de 12 posiciones canónicas. El valor máximo leído de tensión y los valores leídos de las dos posiciones ortogonales correspondientes se utilizan entonces en el método habitual de las tres posiciones. Esto se denomina como el método “a 3 posiciones mejorado” o “método de las 12 medidas/entradas” (véase [21]).

A.3.2.2.2 Determinación del factor de campo. El algoritmo aquí descrito necesita la componente y primaria de campo eléctrico del modo TEM. Los modos de orden superior no están directamente acoplados a la tensión al nivel del puerto. El factor de campo e_{0y} es la componente y normalizada de campo eléctrico del modo TEM en un emplazamiento de ensayo dado del ESE. Son posibles dos procedimientos para deducir el factor de campo e_{0y} como se indica a continuación.

A.3.2.2.2.1 Procedimiento experimental. El factor de campo se puede determinar de manera experimental por la medida de la componente y del campo eléctrico E_y en V/m (para una celda vacía) en el emplazamiento (x, y, z) del centro del ESE con una potencia de entrada conocida P_i en vatios

$$e_{0y} = \frac{E_y(x, y)}{\sqrt{P_i}} \quad \text{en } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}} \quad (\text{A.3})$$

El fabricante debe suministrar la información relativa al factor de campo e_{0y} para cada tipo y tamaño específico de guía de onda TEM.

A.3.2.2.2.2 Procedimiento analítico. Para una celda TEM de sección asimétrica de un puerto (por ejemplo, tipo GTEM), como se muestra en [41], se puede obtener un valor aproximado de la componente de modo TEM normalizada con la ecuación

$$e_{0y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_c} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{\cosh(My)}{\sinh(Mh)} \cdot \cos(Mx) \cdot \sin\left(M \frac{a}{2}\right) \cdot J_0(Mg) \right) \quad \text{en } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}} \quad (\text{A.4})$$

donde

$$M = m \frac{\pi}{a}, m = 1, 3, 5, \dots, \infty, \text{ en } 1/\text{m};$$

a es la anchura de la celda (véanse las figuras A.6 – A.9), en m;

h es la altura del septum, en m;

g es la anchura de espaciamento, en m;

x, y, z es el emplazamiento del centro del ESE, en m;

J_0 es la función Bessel de orden cero, J_0 sin unidad.

Sólo algunos términos de esta serie se necesitan tener en cuenta para una correcta aproximación de e_{0y} . En [28] se dan los resultados de los cálculos generales.

A.3.2.3 Correlación con OATS. Las emisiones del ESE según el método en OATS sobre un plano de suelo en condiciones de campo lejano, se simulan partiendo de la hipótesis que la misma potencia total radiada, como la medida en la guía de onda TEM, se emite por un dipolo corto (que reemplaza al ESE). Las ecuaciones relativas a los campos de un dipolo son bien conocidas, y el plano de suelo puede tenerse en cuenta introduciendo un dipolo imagen. Los campos se pueden calcular sobre el barrido en altura equivalente de la antena de recepción, como se requiere por el método en OATS. La señal máxima de las dos polarizaciones daría entonces el campo máximo posible. Usando el factor de geometría $g_{\text{máx.}}$ determinado por un barrido en altura de la antena de recepción, un valor estimado para el campo máximo $E_{\text{máx.}}$ sobre un OATS está dado por

$$E_{\text{máx.}} = g_{\text{máx.}} \cdot \sqrt{\frac{3\eta_0}{4\pi}} P_0 \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.5})$$

$$E_{\text{máx.}} = g_{\text{máx.}} \cdot \frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0_y}} \cdot \frac{S}{\sqrt{Z_C}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.6})$$

donde

S está definida por la ecuación (A.2), en V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ está definida por la ecuación (A.2), en $\frac{1}{\text{m}}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$ está definida por la ecuación (A.2), en Ω ;

Z_C está definida por la ecuación (A.2), en Ω ;

e_{0_y} está definida por la ecuación (A.2), en $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$

y

$$g_{\text{máx.}} = \begin{cases} \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\text{máx.}} = \left| \frac{1}{r_1 r_2} [r_2^2 + r_1^2 - 2r_1 r_2 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\text{máx.}} & \text{polarización horizontal} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\text{máx.}} = \left| \frac{s^2}{r_1^3 r_2^3} [r_2^6 + r_1^6 + 2r_1^3 r_2^3 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\text{máx.}} & \text{polarización vertical} \end{cases}$$

donde $g_{\text{máx.}}$ se expresa en $\frac{1}{\text{m}}$ (A.7)

con los siguientes parámetros como se muestra en la figura A.5:

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_H - h_g)^2}$ es la distancia entre el ESE y la antena de recepción, en m;

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$ es la distancia imagen entre el ESE y la antena de recepción, en m;

s es la distancia entre la antena de recepción y el ESE como se indica en las normas. Normalmente este valor, expresado en metros, es de 30 m, 10 m o 3 m, en m;

h_g es la altura del ESE sobre el plano de suelo, en m;

R_H es la altura de la antena de recepción sobre el plano de suelo, en m. Normalmente este valor se barre en el margen de 1 m a 4 m.

NOTA1 – El campo eléctrico máximo en el espacio libre, en una zona lejana a una distancia r viene dado por $E_{\text{máx.}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} D_{\text{máx.}} P_0$, donde

$D_{\text{máx.}}$ es la directividad máxima de la antena. La ecuación (A.5) viene de fijar $D_{\text{máx.}}$ a 3 y de considerar la antena imagen y la distancia r a través del factor de geometría $g_{\text{máx.}}$. El valor 3 es un límite superior para una pequeña antena y proviene de la presencia de un dipolo eléctrico y de un dipolo magnético ambos orientados y con una fase que permita obtener una directividad máxima. Para un dipolo eléctrico o magnético solitario, $D_{\text{máx.}} = 1,5$. Se trata del caso más probable para un radiador involuntario en la medida que un solo tipo de fuente debería ser dominante. En este sentido, la ecuación (A.5) puede considerarse como el “caso más desfavorable”.

Generalmente D viene dado bien por un valor hipotético o bien por un valor conocido a priori, o por la directividad medida del ESE. El algoritmo de correlación de la guía de onda TEM de un puerto tiene siempre como hipótesis un valor estimado del “caso más desfavorable” basado sobre a) la potencia total radiada sobre el volumen o cono de barrido OATS y b) la elección implícita de directividad del caso más desfavorable. Para una comparación con otros métodos de ensayo de emisiones de potencia total radiada, por ejemplo cámaras reverberantes, se pueden utilizar las directividades $D = 1,5$ ó $D = 1,7$. Para los propósitos de este documento, se ha decidido utilizar una directividad de ESE pequeño en el “caso más desfavorable” con $D = 3$.

NOTA 2 – Esta correlación es válida para los ESEs pequeños como se definen en el apartado 5.1. Algunas pautas para la correlación del ESE de tamaño grande y los métodos de montaje se dan en este documento a título indicativo. Los detalles completos, relativos a los métodos de correlación para los ESE grandes serán incluidos en la próxima edición de esta norma.

NOTA 3 – Para las clases de productos que tienen aproximadamente el mismo tamaño (factor de forma) y funcionalidad, una comparación completa guía de onda TEM – OATS se realiza utilizando un producto representativo de esta clase. Esta comparación forma una referencia, de forma que sólo los ensayos de guía de onda TEM son necesarios para otros productos en esta clase específica de productos.

NOTA 4 – Otra correlación posible concierne al espacio libre. Para el caso del espacio libre, o de una cámara completamente anecoica equivalente, los términos de reflexión debida al plano de suelo (2º factor de la ecuación A.7) se omiten.

Alternativamente $E_{\text{máx.}}$ puede expresarse en términos de dBµV/m como

$$E_{\text{máx.}}|_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg(g_{\text{máx.}}) + 10 \cdot \lg(P_0) + 139,5 \quad \text{en dB } \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.8})$$

El factor $20 \cdot \lg(g_{\text{máx.}})$ puede calcularse cada vez o interpolarlo a partir de las tablas de referencia precalculadas para las geometrías normalizadas.

$E_{\text{máx.}}$ puede expresarse igualmente en función de las tensiones medidas. La inserción de P_0 a partir de la ecuación (A.1), y de S a partir de la ecuación (A.2) en la ecuación (A.5), y la conversión en dBµV/m, conduce a:

$$E_{\text{máx.}}|_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg(g_{\text{máx.}}) + 20 \cdot \lg\left(\frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0y}}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S^2}{Z_C}\right) + 120 \quad \text{en dB } \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.9})$$

A.4 Procedimiento de validación para la utilización en emisión de guías de onda TEM

A.4.1 Procedimientos de validación

Una guía de onda TEM para los ensayos de emisión debe satisfacer los requisitos de validación descritos en este apartado y en el capítulo 5. Se recomienda que la validación se complete por el fabricante para cada tipo y tamaño de guía de onda TEM.

A.4.2 Requisitos de validación de guía de onda TEM para ESEs pequeños y grandes

El ensayo de validación se realiza utilizando un juego de fuentes de emisión de referencia con respuestas en emisión según el método OATS bien caracterizadas. Las fuentes de referencia se escogen sobre la base de los tipos de ESEs (capítulo 7) que se someterán a ensayo en la guía de onda TEM. Se recomiendan cuatro tipos de fuentes de referencia para representar las aplicaciones CEM generales. Estas representan las variaciones de los equipos de sobre mesa definidos en la Norma CISPR 22.

- a) Un generador de peine alimentado a baterías con una antena de banda ancha, que es un ejemplo de ESE pequeño. La dimensión más importante del generador de peine debe ser menor de $0,1 h$, donde h es el espacio entre conductores. Si no existe ningún generador de peine en el mercado que satisfaga el requisito del tamaño, se puede utilizar un generador de peine que tenga hasta $0,35 h$. En este caso, el tamaño y el tipo de generador de peine utilizado y la talla regularmente autorizada ($0,1 h$), están indicados en la misma posición del protocolo de ensayo y se marcan especialmente. El tamaño del ESE debería ser inferior en una longitud de onda a la frecuencia más elevada ensayada (véase el apartado 6.1).

NOTA – Los emisores de ruido de banda ancha (como el CNE) se estudiarán en la próxima edición de esta norma.

- b) Un generador de peine alimentado a baterías con un cable fijado, es un ejemplo de ESE grande sin cables de salida. El hilo adjunto se debería extender hasta el borde del volumen de ensayo utilizable pero que permanezca en el interior de éste.
- c) Un generador de peine alimentado a baterías con un cable de salida fijado, es un ejemplo de ESE grande con cables de salida. El cable fijado va hasta una pinza de ferrita y la atraviesa.
- d) Una caja de 19 U (480 mm) con generador de peine incorporado, con al menos dos cables de salida, prevista para ser un ejemplo de ESE grande con cables de salida.

Para cada uno de los ejemplos de ESE anteriores, el generador de peine debe producir líneas espectrales cada 10 MHz o menos sobre toda la gama de frecuencias considerada. Las líneas espectrales deben ser estables con variaciones inferiores a 1 dB durante la duración del ensayo de validación.

NOTA – Si la dimensión mayor del generador de peine es inferior a $0,1 h$, puede esperarse una perturbación mínima del modo TEM.

Para los fabricantes de guías de onda TEM de tipos y tamaños específicos, se recomienda que los ensayos de emisión se realicen utilizando los ejemplos de ESEs en cuatro o más guías de onda TEM, del mismo tipo y tamaño, y cuatro o más diferentes OATS. Los resultados son válidos para todas las guías de onda TEM del mismo tipo y del mismo tamaño. Debe utilizarse un montaje idéntico de ESE similares, con función de detección y recepción, tiempo de paso y ancho de banda idénticos, para todas las frecuencias y sobre cada emplazamiento de ensayo. El algoritmo de correlación de tres posiciones debe aplicarse para convertir las tensiones medidas con la guía de onda TEM en valores de campo OATS.

A.4.2.1 Requisitos de validación de guía de onda TEM para ESEs pequeños. Para validar una guía de onda TEM para su utilización con ESEs pequeños, los ensayos deben realizarse utilizando el ESE usado como ejemplo, que representa un ESE pequeño; es decir, el generador de peine alimentado a baterías con una antena de banda ancha.

A.4.2.1.1 Instalación de ESEs pequeños. Los ensayos se realizan en una guía de onda TEM aplicando una secuencia de ensayo específica, con como ejemplo un ESE pequeño. El ESE está situado en el centro del volumen de ensayo, por ejemplo sobre un soporte de montaje de ensayo, y se rota alrededor del orto-eje según un mínimo de tres posiciones ortogonales (véase la figura A.2). En ciertos casos, la utilización de un cubo no conductor destinado a envolver el ESE fijado, o la utilización de un manipulador, puede ayudar en las rotaciones.

A.4.2.1.2 Cálculo del factor de correlación para los ESEs pequeños. En el caso del ejemplo de un ESE pequeño, se ha visto un factor de correlación estadístico, para mejorar el acuerdo entre amplitudes de campo en OATS y la guía de onda TEM obtenida por el algoritmo de correlación en tres posiciones.

NOTA – La medida de emisión en las guías de onda TEM se basa en el método de la potencia total radiada. Por consiguiente, se examinan todas las orientaciones posibles. Cuando se comparan los datos OATS con las medidas en guía de onda TEM, el operador debe elegir la orientación del ESE en el OATS con la emisión máxima.

El cálculo del factor de correlación se basa en las diferencias del promedio y de la desviación tipo, a la vez para los campos correlativos de las guías de onda TEM y para los medidos con el método OATS, a cada frecuencia. Un factor de correlación del diagrama de radiación complementario se ha identificado para mejorar el acuerdo entre los resultados de la guía de onda TEM y del OATS para el ejemplo de un ESE pequeño. El factor de correlación c_f a cada frecuencia f se calcula utilizando

$$c_f = \bar{x}_f - d_{s,f} - t \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.10})$$

donde

$\bar{x}_f$ es la diferencia media entre las amplitudes de campo en la guía de onda TEM y en el OATS, en $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$d_{s,f}$ es la diferencia de las desviaciones típicas de los valores múltiples leídos en la guía de onda TEM y en OATS [ecuación (A.12)], en $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

t es el factor de incertidumbre del diagrama de radiación [ecuación (A.18)] en $\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

NOTA – Incluso un ESE pequeño puede no tener un diagrama de radiación isotrópico. Esta diferencia se debería tener en cuenta por el factor t en la ecuación (A.10). Las medidas sobre OATS diferentes y en diferentes guías de onda TEM pueden dar lugar igualmente a desviaciones. Esto se tiene en cuenta mediante $d_{s,f}$ en la ecuación (A.10). El orden de magnitud habitual de t y de $d_{s,f}$ es 1 dB.

La diferencia media de las amplitudes de campo a cada frecuencia viene dada por

$$\bar{x}_f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \right) \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.11})$$

donde

$g_{i,f}$ es la intensidad de campo eléctrico en la guía de onda TEM correlacionada con el campo libre (A.3.2.3), en $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$i = 1 \dots n$ siendo n el número de medidas en guía de onda TEM;

$o_{k,f}$ es la intensidad de campo eléctrico OATS, en $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$k = 1 \dots m$ siendo m el número de medidas OATS;

f es la frecuencia, en Hz;

$g_{i,f}$ son las intensidades de campo correlacionadas de las medidas $i = 1 \dots n$ utilizando una o varias guías de onda TEM de tamaño y tipo especificados, y

$o_{k,f}$ son los resultados de las medidas $k = 1 \dots m$ utilizando uno o varios OATS.

La diferencia de las desviaciones típicas de los valores múltiples leídos en la guía de onda TEM y en los OATS viene dada por

$$d_{s,f} = s_{\text{TEM},f} - s_{\text{OATS},f} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.12})$$

Aquí $s_{\text{TEM},f}$ es la desviación típica de los valores de intensidad de campo múltiple de la guía de onda TEM, dada por

$$s_{\text{TEM},f} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_{i,f} - \bar{g}_f)^2}{n-1}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.13})$$

y $s_{\text{OATS},f}$ es la desviación típica de los resultados de uno o varios OATS, dada por

$$s_{\text{OATS},f} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (o_{k,f} - \bar{o}_f)^2}{m-1}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.14})$$

En estas ecuaciones de desviación típica, la media de los niveles de cada guía de onda TEM y de cada OATS viene dada por

Guía de onda TEM:
$$\bar{g}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.15})$$

OATS:
$$\bar{o}_f = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \quad o_{k,f} \text{ en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.16})$$

NOTA – Si la guía de onda TEM es única ($n = 1$), por ejemplo, construida para utilización científica en un solo laboratorio, entonces $s_{\text{TEM},f} = 0$ para la determinación del factor de corrección de esta guía de onda específica. Por ello, estos resultados no pueden utilizarse para la validación de ninguna otra guía de onda TEM, incluso del mismo tipo y del mismo tamaño.

Para cada guía de onda TEM específica, el factor de incertidumbre del diagrama de radiación t se deduce de una serie de ensayos de correlación a tres posiciones efectuados, por ejemplo, a partir de ocho posiciones de partida 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° y 315° . Por ejemplo, para la posición de partida de la figura A.4.a1 ($xx'yy'zz'$), el ESE sufre una rotación según estos ángulos alrededor del eje y . En cada posición de partida, el método de correlación a tres posiciones se utiliza para producir adicionalmente una serie de ocho valores de intensidad de campo correlacionados designados E_α ($8 \times 3 = 24$ valores leídos de tensión). $\bar{E}_\alpha$ es el valor medio de campo eléctrico, específicamente $\bar{E}_{0^\circ} = (E_{0^\circ} + E_{90^\circ})/2$, ... $\bar{E}_{225^\circ} = (E_{225^\circ} + E_{315^\circ})/2$. Se obtiene una intensidad de campo máxima $E_{\alpha, \text{máx.}}$ como la intensidad de campo más elevada para cada par de valores separados 90° . Específicamente, $E_{0^\circ, \text{máx.}} = \text{máx.} (E_{0^\circ}, E_{90^\circ})$, ... $E_{225^\circ, \text{máx.}} = \text{máx.} (E_{225^\circ}, E_{315^\circ})$. Un factor de desviación tipo se calcula mediante la siguiente ecuación.

NOTA – Para la ecuación (A.15) se ha elegido un incremento de 45° como ejemplo.

$$t_{90^\circ, f} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=0^\circ \cap 90^\circ}^{225^\circ \cap 315^\circ} (E_{\alpha, \text{máx.}} - \bar{E}_\alpha)^2}{l-1}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.17})$$

donde l es el número de posiciones de partida (ocho en el ejemplo anterior).

El factor de incertidumbre final del diagrama de radiación t se obtiene como el promedio de estos, o

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{90^\circ, f})_i \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.18})$$

NOTA – Una alternativa al factor t (factor de incertidumbre del diagrama de radiación) puede ser el método a seis posiciones de [27] o el método a doce posiciones (“a tres posiciones mejorado”) de [37]. El aspecto importante es la necesidad de captar la potencia total radiada por el ESE. Datos comparativos se representan en [20] y [21].

A.4.2.2 Requisitos de validación de guía de onda TEM para ESEs grandes. Para la validación de una guía de onda TEM para una utilización con ESEs grandes, se están estudiando los procedimientos de ensayo y los factores de corrección y se tratan en la próxima edición de esta norma.

A.5 Procedimientos de medidas de emisión en guías de onda TEM

A.5.1 Tipos de ESE

A.5.1.1 ESEs pequeños en las guías de onda TEM. Un ESE pequeño se debe someter a ensayo utilizando dos posiciones de partida en la guía de onda TEM. La primera posición de partida es arbitraria, mientras que la segunda es la primera posición de partida tras una rotación, como se muestra en la figura A.4. Para cada posición de partida, se realizan las rotaciones del algoritmo de correlación. Por ejemplo, el método a tres posiciones del apartado A.3.2.2.1 exige que se midan tres orientaciones. Este procedimiento debe realizarse con las posiciones de partida a1 y a3, o a2 y a4 de la figura A.4 (un total de $2 \times 3 = 6$ posiciones). La intensidad de campo correlativa más elevada de estos dos conjuntos de datos debe anotarse para cada frecuencia.

NOTA – La gama de frecuencias está determinada por el límite aplicable o el objetivo del ensayo, generalmente de 30 MHz a 1 GHz para los ESEs pequeños. La gama de frecuencias utilizable se determina en los ensayos de verificación del modo TEM (véanse los apartados 5.1.1 y 5.2.2).

A.5.1.2 ESEs grande sin cables. El método del apartado A.5.1.1 puede utilizarse para obtener los datos relativos para los ESEs grandes sin cables.

A.5.1.3 ESEs grandes con cables. En estudio.

NOTA – En los márgenes de frecuencias más bajos (por ejemplo, inferiores a 100 MHz), puede ser necesario medir también las emisiones conducidas (inferiores a 30 MHz, Norma CISPR 22) y la potencia de perturbación radiada (Norma CISPR 14), para caracterizar completamente un ESE con cables conectados.

A.5.2 Montaje del ESE

Características y descripciones específicas complementarias de los montajes del ESE están aplazadas hasta la próxima edición de esta norma. Las siguientes informaciones se dan a título indicativo.

El ESE se sitúa en el centro del volumen de ensayo utilizable (apartado 5.1.2) sobre un manipulador (apartado 3.1.21 y figuras A.1, A.2b y c) o sobre un soporte del montaje de ensayo (apartado 3.1.16).

Los ESEs pequeños sin cables deben fijarse en el centro de rotación del manipulador. Utilizando el manipulador, el ESE se rota alrededor del centro eléctrico (que puede suponerse que es idéntico al centro geométrico del ESE).

Para ESEs con cable(s) se aplica el enrutamiento de cables siguiente. Los cables largos deben estar dispuestos en haz conforme a las reglas establecidas en el apartado 2.6.2.5.2 de la Norma CISPR 16-2. El o los cables de interconexión deben estar dispuestos de forma perpendicular a cada caja. Para obtener resultados de medida reproducibles, las posiciones relativas del o de los cables de interconexión y del ESE no deben cambiar durante el algoritmo de correlación a tres posiciones. Si el o los cables son demasiado largos, el o los cables de interconexión pueden disponerse en haz según el apartado 2.6.2.5.2 de la Norma CISPR 16-2.

El o los cables de salida deben estar dispuestos perpendicularmente desde cada caja del ESE hasta el límite del volumen de ensayo utilizable. El cable se encamina seguidamente a lo largo del límite del volumen de ensayo utilizable hasta la esquina del orto-ángulo, y del borde inferior del volumen de ensayo (figura A.1). Utilizando un posicionador como el representado en la figura A.2b, el o los cables de salida deben estar dispuestos a lo largo del orto-eje. La posición de los cables se debe mantener, por ejemplo, por pinzas no-conductivas. El o los cables de salida se encaminan desde la esquina inferior del volumen de ensayo utilizable en el orto-ángulo, a la o a las pinzas absorbentes al nivel del plano de suelo de guía de onda. Los cables múltiples deberían estar separados aproximadamente 100 mm. Al nivel del plano de suelo de guía de onda, cada cable debe estar terminado por pinzas absorbentes separadas como se define en la Norma CISPR 16, o por ferritas de pinza (véase [1]). La pérdida de inserción de la pinza (o de la ferrita en pinza) debería ser superior a 15 dB para la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 1 000 MHz. El cable de conexión no debe tocar el conductor interior o exterior de la guía de onda TEM, antes que el cable sea cargado por la pinza (o de la ferrita en pinza). Hasta 1,3 m de cable precede a la posición de la pinza. Si el cable es de longitud inferior a 1,3 m, entonces todo el cable precede a la posición de la pinza. Si el cable tiene una longitud superior a 1,3 m, al menos 1,3 m de cable deben preceder a la pinza (figura A.1). Los cables de salida se encaminan tras las pinzas absorbentes hasta los conectores sobre el suelo o sobre la pared, y luego se conectan al equipo asociado en el exterior de la guía de onda TEM.

A.6 Informe de ensayo

A.6.1 ESEs pequeños en las guías de onda TEM

Para los ESEs pequeños y ESEs grandes sin cables, el informe debe incluir los resultados de intensidad de campo corregidos (E) y no corregidos ($E_{\text{máx.}}$), y determinados de acuerdo a:

$$E = E_{\text{máx.}} - c_f \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.19a})$$

con $E_{\text{máx.}}$ en V/m de la ecuación (A.5) y c_f en V/m de la ecuación (A.10), o

$$E|_{\text{dB}} = E_{\text{máx.}}|_{\text{dB}} - 20 \cdot \lg(c_f) - 120 \quad \text{en dB } \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.19b})$$

con $E_{\text{máx.}}|_{\text{dB}}$ en dB $\mu\text{V/m}$ de la ecuación (A.8) y c_f en V/m de la ecuación (A.10).

A.6.2 ESEs grandes en las guías de onda TEM

En estudio.

NOTA – Para los ensayos de conformidad de ESEs grandes en las guías de onda TEM, se ha propuesto el siguiente procedimiento:

- tienen que realizarse tres ensayos independientes sobre un tipo particular de ESE en un OATS específico conforme y con la guía de onda TEM específica. La diferencia media entre los resultados de la guía de onda TEM y del OATS se calcula para cada frecuencia utilizando la ecuación (A.11) con $n = m = 3$;
- es necesario que la media y la desviación típica en función de la frecuencia y las diferencias calculadas en el paso 2 para un mínimo de 10 frecuencias satisfaga el criterio según el cual la diferencia media es superior a 0 dB o igual a 3 dB, y la desviación típica de las diferencias es inferior o igual a 4 dB;
- no es necesario adjuntar la diferencia media de los valores leídos de la guía de onda TEM para determinar la conformidad con el límite de perturbación. Si se satisfacen los criterios del paso 3, el tipo de ESE se considera como conforme al límite apropiado.

Detalles suplementarios se dan en [2].

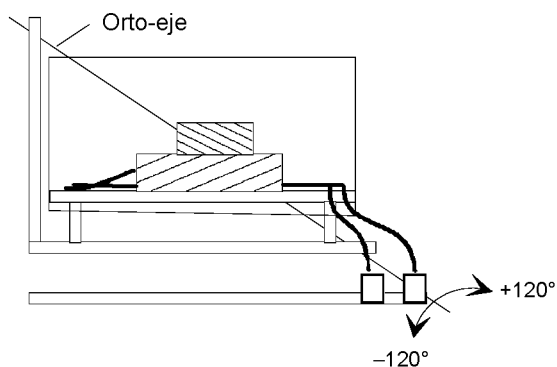


Fig. A.1a – Vista de lado

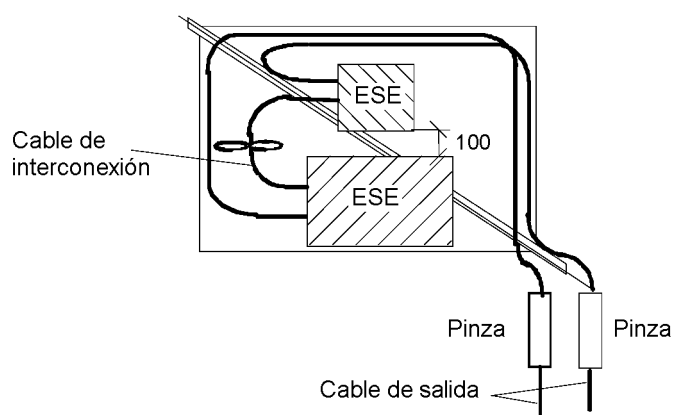
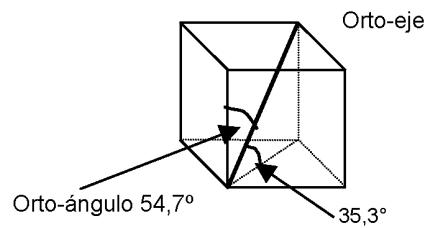
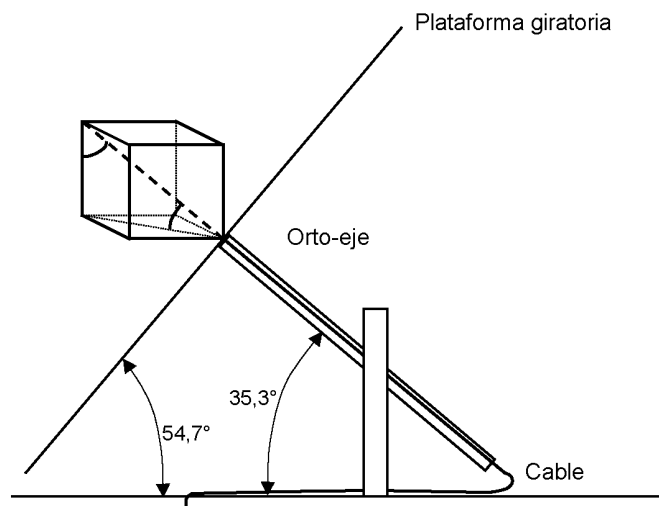
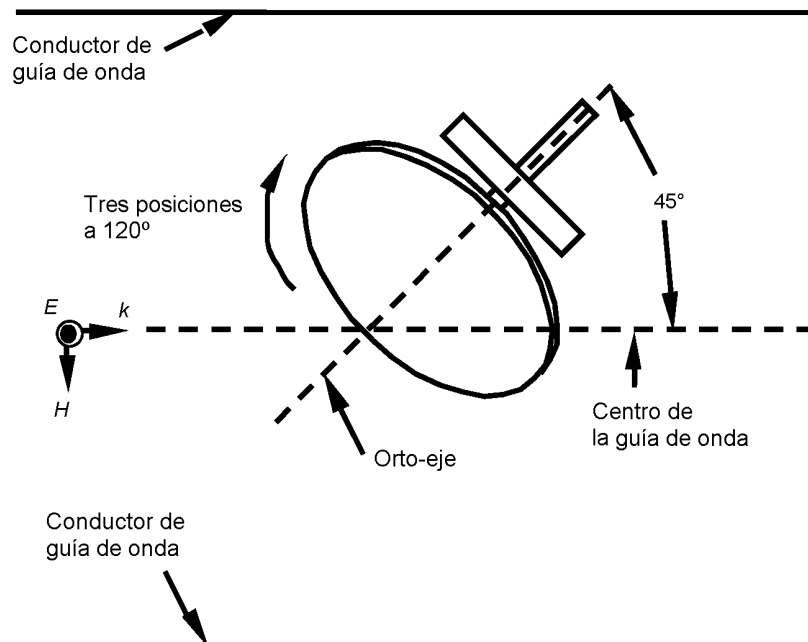


Fig. A.1b – Vista de planta

NOTA – Los ESEs grandes están en estudio y, por consiguiente, la disposición de los cables también.

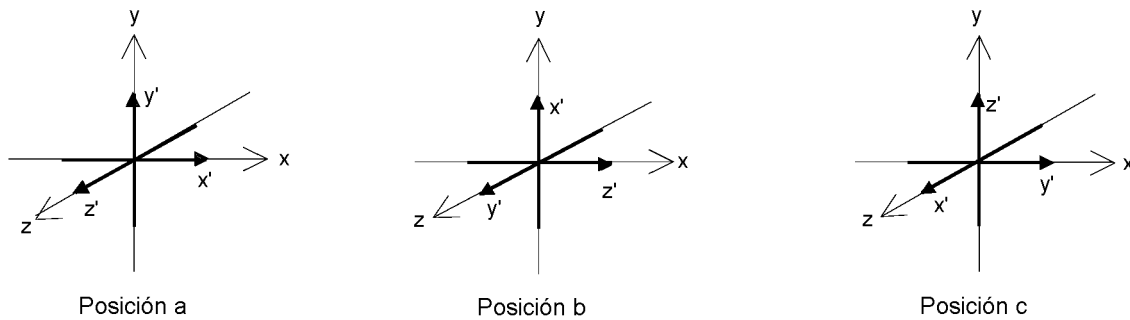
La longitud del cable de conexión entre la carcasa del ESE y la carga debe ser aproximadamente de 1,3 m.

Fig. A.1 – Disposición del cable de salida en la esquina del orto-ángulo y en el borde inferior del volumen de ensayo

**Fig. A.2a – Orto-eje y orto-ángulo****Fig. A.2b – Vista de lado (véanse los apartados 3.1.21 y A.5.2)****Fig. A.2c – Vista de planta (véanse los apartados 3.1.21 y A.5.2)**

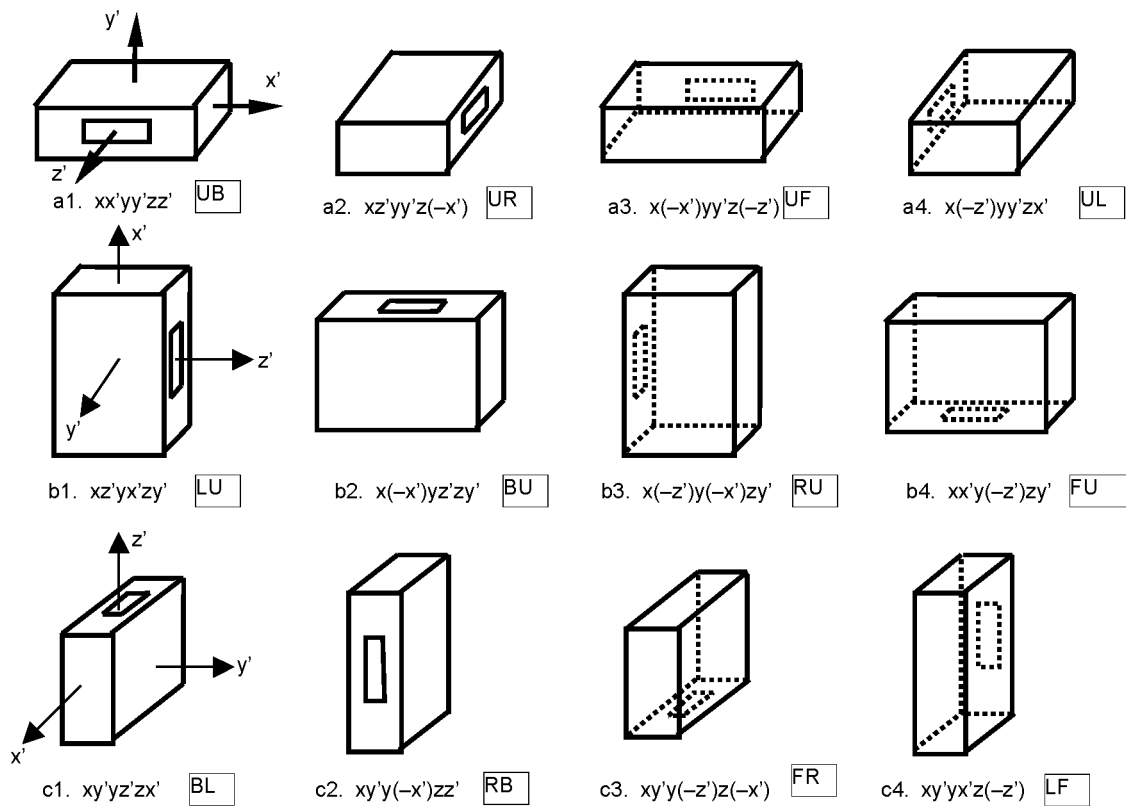
Análogamente al dispositivo de la figura A.1, este posicionador da tres posiciones ortogonales mediante tres rotaciones de 120° alrededor del orto-eje.

Fig. A.2 – Posicionador del orto-eje o manipulador



Las tres posiciones de rotación del eje ortogonal corresponden a las posiciones a1, b1, c1 de la figura A.4. Los ejes de coordenadas x , y , z en la guía de onda no tienen ejes primos, mientras que los ejes de coordenadas x' , y' , z' del ESE tienen una notación prima.

Fig. A.3 – Tres posiciones de rotación del eje ortogonal para las medidas de emisión

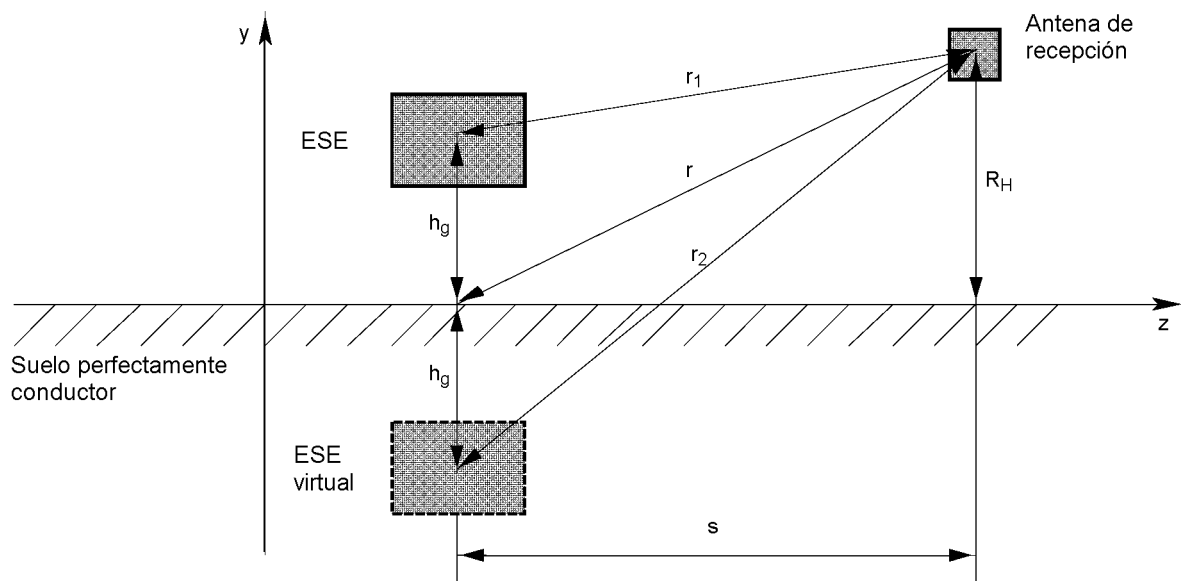


NOTA – En este ejemplo, x, y, z son los ejes de coordenadas de la guía de onda TEM, x', y', z' son los ejes de coordenadas del ESE y el campo está polarizado a lo largo del eje y , se propaga a lo largo del eje z . Es necesario que el centro virtual (o geométrico o de fase) del ESE permanezca en la misma posición con relación a los conductores de la guía de onda TEM.

Los lados del ESE están definidos por la posición a1) ($x'=x, y'=y, z'=z$): Izquierdo (L) = Derecho (R) $\equiv y'z' = \text{plano } yz$, Trasero (B) = Delantero (F) $\equiv x'y' = xy$, Superior (T) = Inferior (U) $\equiv x'z' = xz$. La dirección de propagación está alineada con el eje z . Por esta razón, el frente de onda en a1 es el lado trasero. Cada posición del ESE se puede describir con dos letras: la primera designa el lado del ESE que mira al suelo de la guía de onda TEM, la segunda letra designa el lado que mira al frente de onda (hacia la dirección de propagación).

Cada columna de esta figura/matriz (por ejemplo a3, b3, c3) muestrea un conjunto de tres posiciones ortogonales que se pueden utilizar por el algoritmo de correlación a tres posiciones. Análogamente, en un ensayo de inmunidad, se dan las ocho caras mínimas, por ejemplo, para los dos conjuntos de cuatro posiciones a1, a2, a3, a4 y b1, c2, b3, c4. Cuando se necesite el conjunto de las doce posiciones en un ensayo de inmunidad, añadir las posiciones c1, b2, c3, b4, donde c3 y b4 deberían rotarse 180° alrededor del eje z . En este caso c3, $x'y'(-z')z(-x')$ se transforma en $x(-y')yz'z(-x')$, y b4, $xx'y(-z')zy'$ se transforma en $x(-x')yz'zy'$.

Fig. A.4 – Orientaciones canónicas de 12 caras/ejes para un ESE típico



NOTA – El eje z es horizontal como el plano de suelo y está alineado con la dirección de propagación. Esto es coherente con el sistema de coordenadas de las guías de onda TEM, donde el eje z es paralelo al conductor y está alineado con la dirección de propagación.

Fig. A.5 – Geometría de emplazamiento de ensayo en espacio libre

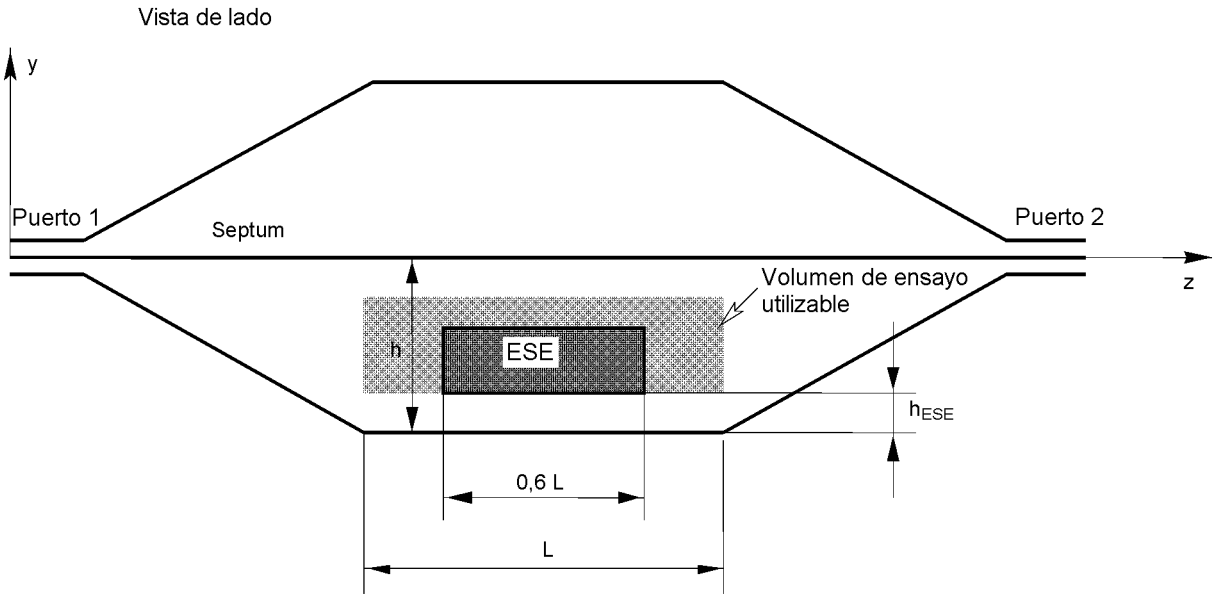


Fig. A.6a – Vista de lado

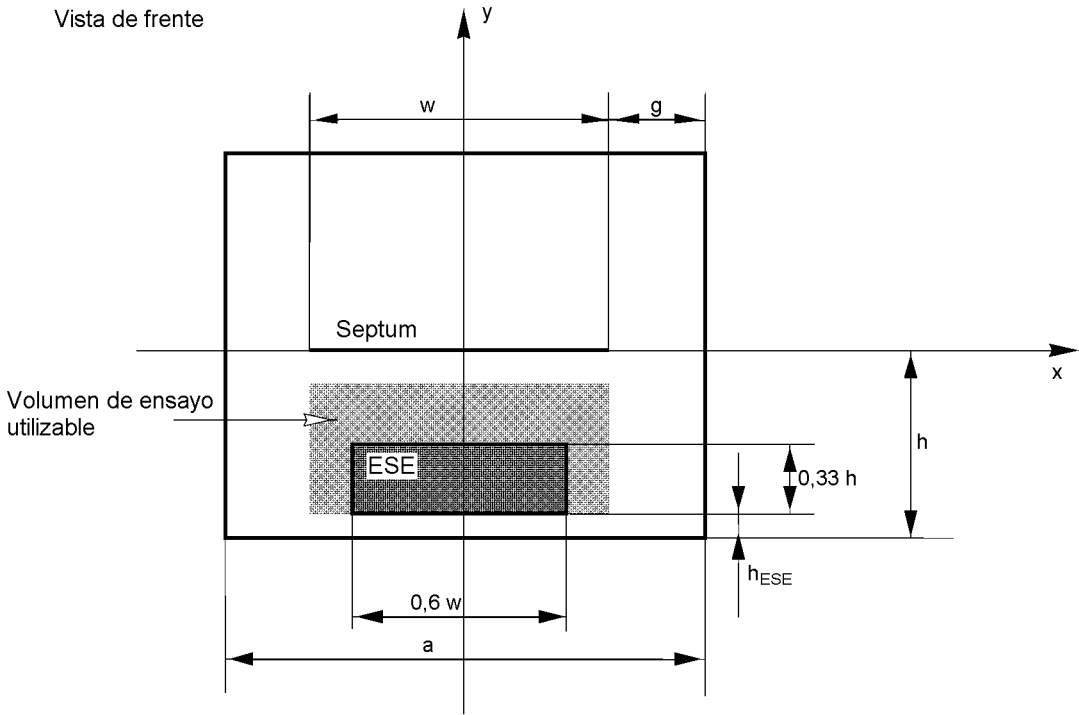


Fig. A.6b – Vista de perfil

Fig. A.6 – Celda TEM de dos puertos (septum simétrico)

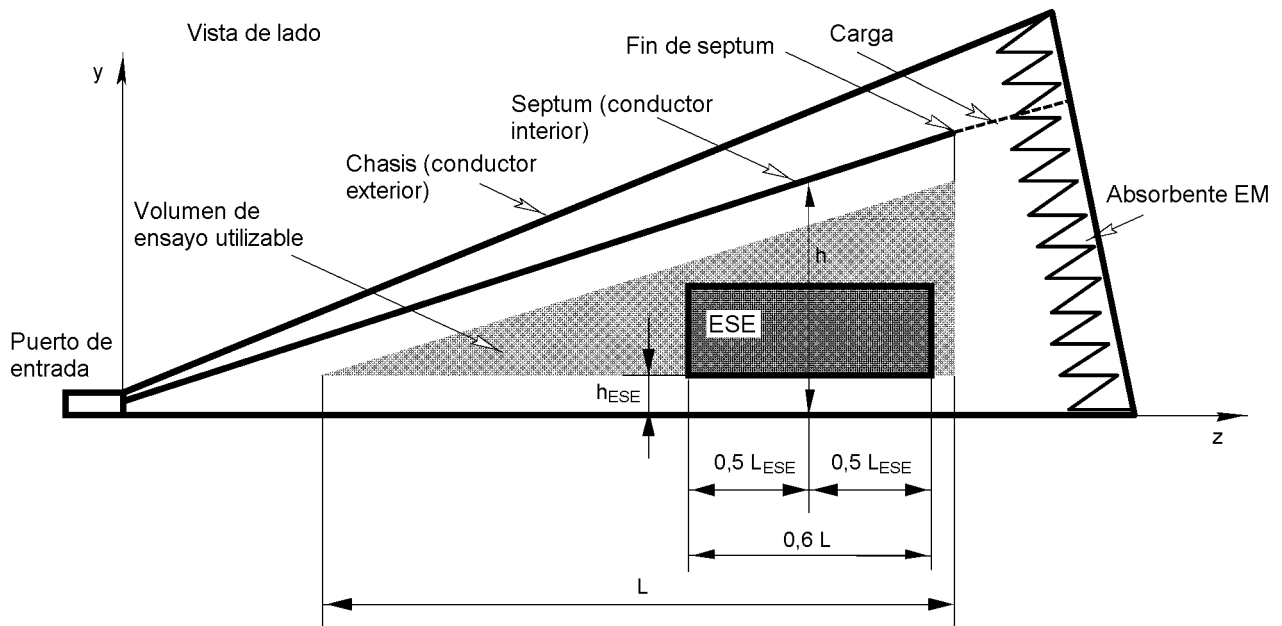


Fig. A.7a – Vista de lado

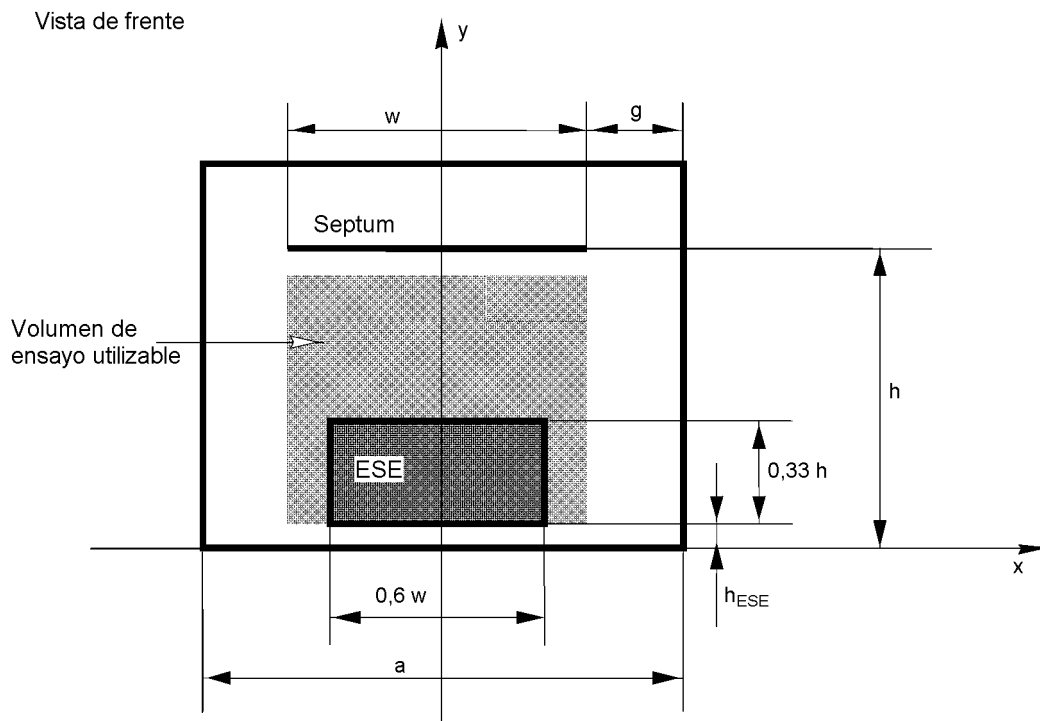


Fig. A.7b – Vista de perfil

Fig. A.7 – Celda TEM de un puerto (septum asimétrico)

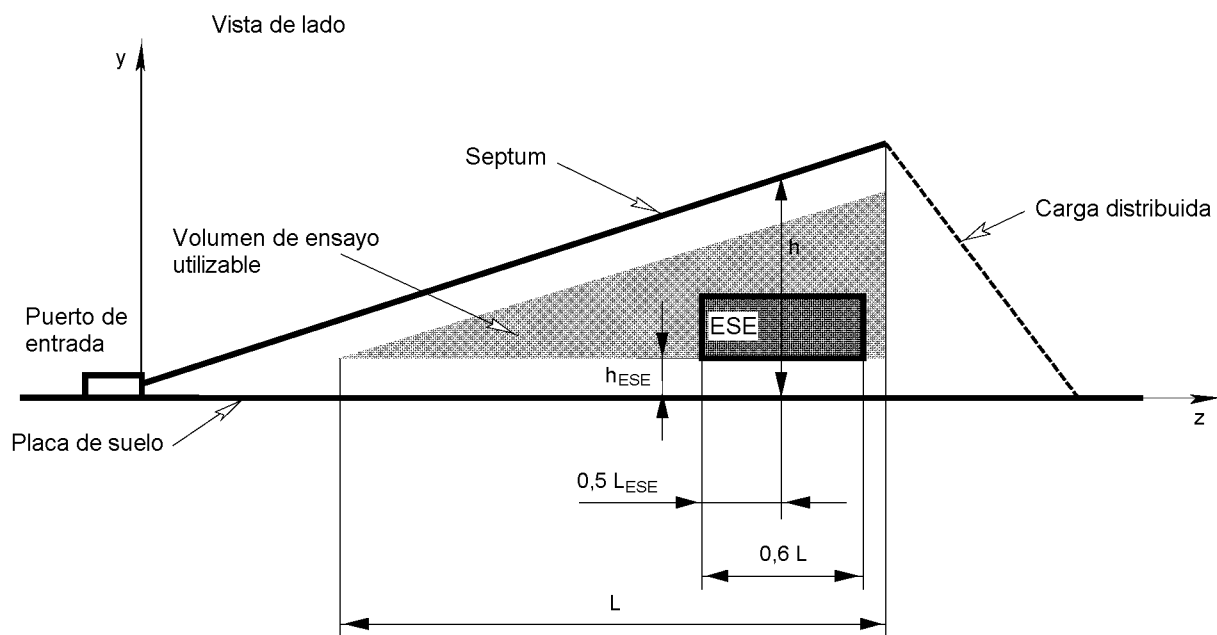


Fig. A.8a – Vista de lado (1)

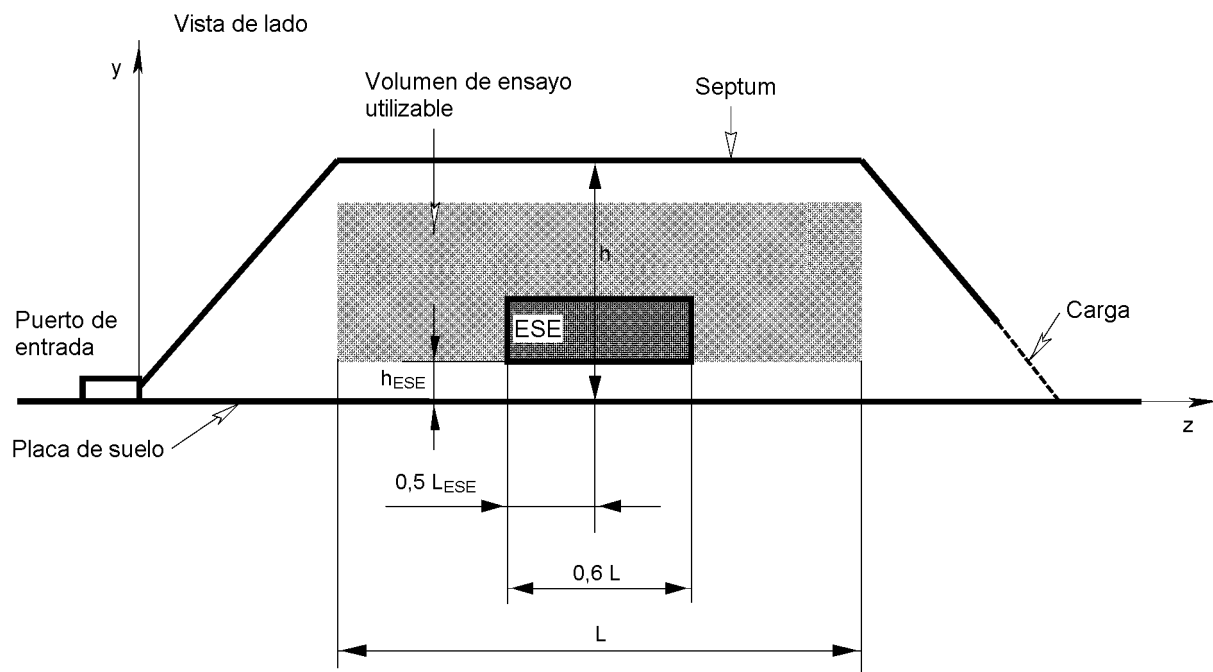


Fig. A.8b – Vista de lado (2)

NOTA – Una línea abierta de tres planos con vista de lado de línea de centro igual que la de la figura A.6a se obtiene usando esta teoría de geometría de imagen.

Fig. A.8 – Línea abierta (dos placas) (Continúa)

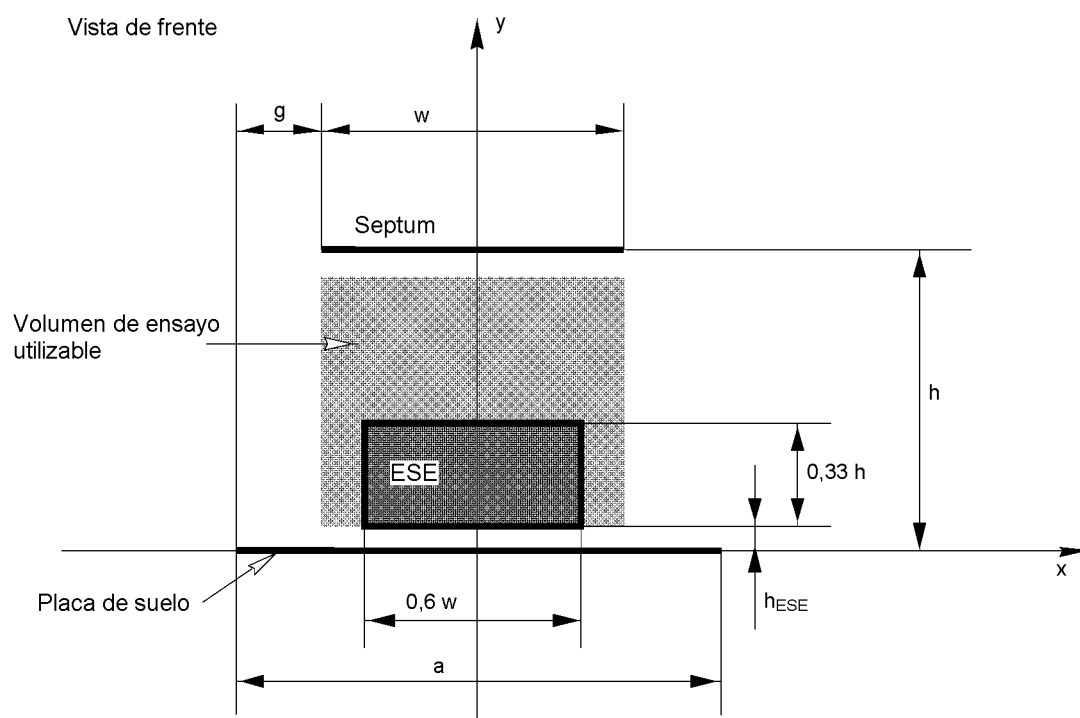


Fig. A.8c – Vista de perfil

Fig. A.8 – Línea abierta (dos placas) (Fin)

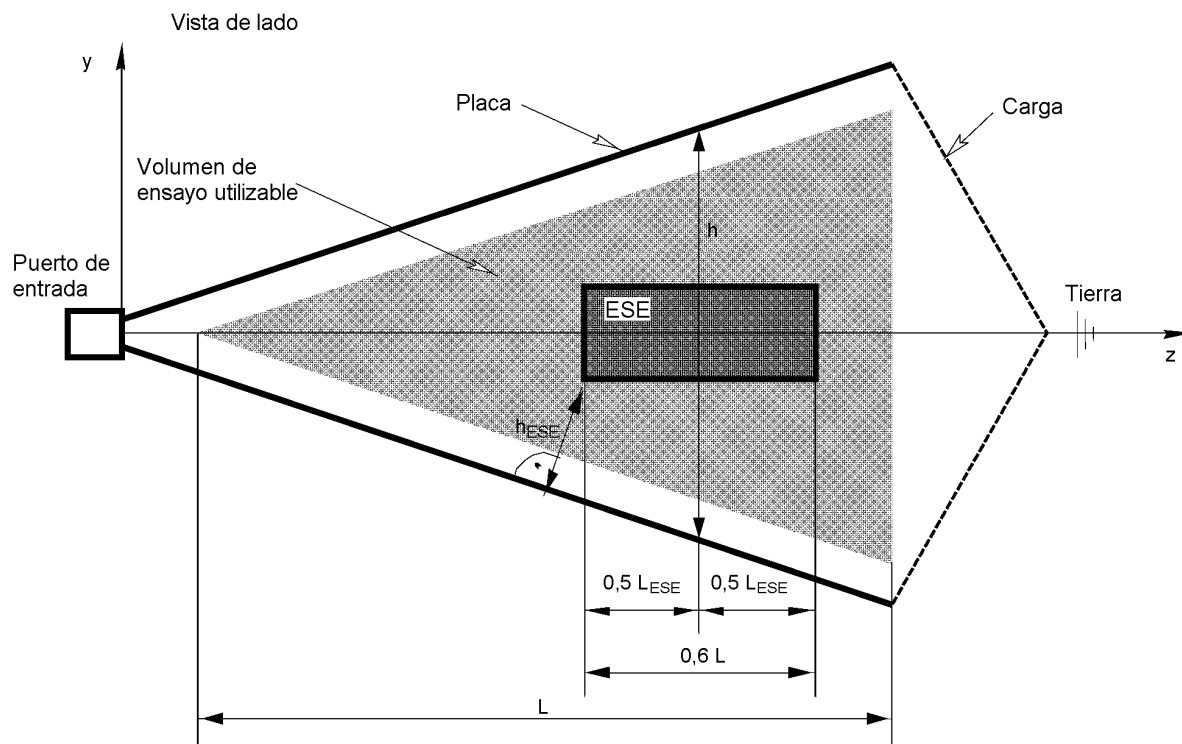


Fig. A.9a – Vista de lado

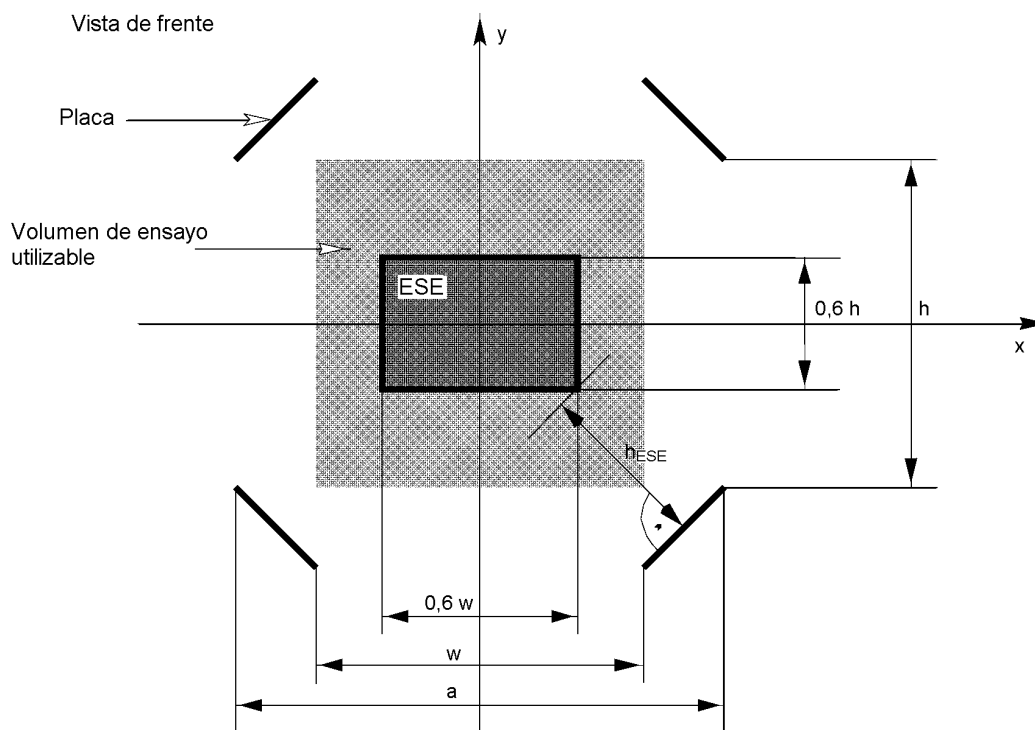


Fig. A.9b – Vista de perfil

NOTA – La configuración completa está rodeada por una envolvente completamente anecoica. Por razones simétricas la restricción de la altura máxima usable del ESE cambia de $0,33 h$ a $0,60 h$ (véase el apartado 5.1.2).

Fig. A.9 – Línea abierta (cuatro placas, alimentación equilibrada)

ANEXO B (Normativo)

ENSAYOS DE INMUNIDAD EN LAS GUÍAS DE ONDA TEM

B.1 Introducción

Este anexo describe los ensayos e inmunidad en las guías de onda TEM. Su intención es permitir los ensayos de inmunidad de los equipos eléctricos y electrónicos a un campo electromagnético incidente.

Los ensayos de inmunidad en el interior de las guías de onda TEM pueden realizarse con dos objetivos alternativos.

- a) El ensayo se realiza con un montaje específico del ESE. Esto requiere que el montaje de ensayo y los límites o niveles de ensayo estén definidos por las normas de producto o las familias de producto específicas.
- b) El ensayo se realiza para obtener resultados que sean comparables al procedimiento de ensayo descrito en la Norma IEC 61000-4-3.

B.2 Equipos de ensayo

Se recomiendan los siguientes tipos de equipos de ensayo:

- guía de onda TEM: de un tamaño apropiado para mantener un campo uniforme, de dimensiones suficientes para contener los equipos sometidos a ensayo (ESE) previstos;
- filtros contra perturbaciones electromagnéticas;
- generador(es) de señal de RF;

NOTA 1 – A menudo es útil controlar la potencia transmitida y reflejada en las guías de onda TEM cuando se establecen niveles de campo. Un acoplador direccional acompañado de un voltímetro o vatímetro de RF permite la medida de la potencia real transmitida hacia la guía de onda TEM (por oposición con la potencia nominal del generador de señal de RF). Ambos deben cubrir la anchura de banda prevista.

- amplificadores de potencia;
- captadores de campo, capaces de monitorear separadamente el campo eléctrico a lo largo de los tres ejes ortogonales. Todo circuito de cabeza de sonda y el sistema optoelectrónico debe presentar una inmunidad apropiada al campo a medir y un enlace de fibra óptica hacia el indicador exterior de la guía de onda TEM;

NOTA 2 – Las guías de onda TEM requieren una sonda de campo que permita la medida del campo eléctrico de forma individual a lo largo de los tres ejes ortogonales. Si se utiliza una antena pequeña de un solo eje, esta tiene que posicionarse para medir cada componente de campo separadamente.

- equipos asociados para registrar los niveles de potencia.

B.2.1 Descripción de la instalación de ensayo

NOTA – Una celda TEM se comporta ella misma como una cámara apantallada. En el caso de una línea abierta, debería estar situada en una cámara apantallada suficientemente grande para asegurar el aislamiento. Esta cámara apantallada puede requerir una cantidad apropiada de material absorbente para que la línea abierta cumpla los requisitos de zona uniforme.

Para las guías de onda TEM, el modo TEM es equivalente a una onda plana incidente que permite realizar los ensayos de inmunidad. Mientras que una onda plana ideal es invariable sobre cualquier frente de onda de fase constante, en una línea de transmisión los campos de modo TEM variarán sobre un frente de fase constante conforme a las características de la geometría de la sección transversal. Los métodos en cámara anecoica y en guía de onda TEM se basan en una distribución de campo de onda plana antes de la inserción del ESE. Un diagrama de campo en modo TEM está más próximo a la polarización vertical en una cámara anecoica, mientras que en una cámara el diagrama de campo en polarización horizontal está más propenso a las distorsiones causadas por las reflexiones del plano de masa.

B.2.2 Calibración de campo

Esta sección utiliza el concepto de “zona uniforme” que es un plano vertical hipotético con relación a la dirección de propagación del campo en el cual las variaciones de la amplitud del campo son aceptablemente pequeñas (véase [15]). Las dimensiones de la guía de onda TEM determinan el tamaño de esta zona uniforme (plana), a menos que el ESE pueda ser completamente iluminado sobre una superficie más pequeña. El tamaño máximo de un ESE está relacionado con el tamaño del “volumen de ensayo utilizable” (véase el apartado 5.1.2).

NOTA 1 – El plano vertical parte de la hipótesis según la cual la dirección de propagación del modo TEM es casi horizontal (alineada con el eje z). Si la dirección de propagación del modo TEM es cualquier otra dirección, el plano de zona uniforme puede reorientarse en consecuencia.

La utilización de una línea de transmisión evita las perturbaciones debidas a los campos reflejados por el suelo de la cámara semianecoica; así, se pueden establecer los campos uniformes en la proximidad de los conductores interiores y exteriores (únicamente en la dirección normal), y no se requiere la restricción de altura sobre el suelo de 0,8 m de la Norma IEC 61000-4-3.

En principio, la zona uniforme puede estar situada a cualquier distancia del puerto de entrada; el emplazamiento dependerá de la geometría específica de la guía de onda. La zona uniforme es válida únicamente para esta distancia, a partir del puerto de entrada al nivel al que se calibra. Para permitir la rotación del ESE, la zona uniforme debe estar separada una distancia al menos superior a la dimensión mayor de la carcasa a partir del extremo del volumen de ensayo utilizable $z_{\text{máx}}$ definida en el apartado 5.1.2.

La zona uniforme se calibra en la cámara vacía, sobre una gama de frecuencias especificada en el apartado 5.1.1 en pasos de frecuencia especificados en el apartado 5.1.1 utilizando una señal no modulada.

En función del tamaño de la zona uniforme, está calibrada al menos para un número de puntos de medida conforme a la tabla B.1 y a la figura B.2. Un campo se considera uniforme si se satisfacen los requisitos siguientes:

- a) la amplitud de la componente de campo eléctrico primaria sobre la zona definida se sitúa en un límite de ${}^{-0}_{+6}$ dB de la componente nominal de campo primaria sobre al menos el 75% de los puntos medidos;
- b) las amplitudes de las dos componentes de campo eléctrico secundarias (no deseadas) son al menos 6 dB inferiores a la componente primaria sobre al menos el 75% de los puntos medidos (véase el apartado 5.1.1).

El 75% de los puntos que satisfacen el primer requisito no necesitan ser idénticos al 75% de los puntos que satisfacen el segundo requisito. A frecuencias diferentes, diferentes puntos medidos se pueden encontrar dentro de la tolerancia. La tolerancia se ha expresado como ${}^{-0}_{+6}$ dB para asegurar que la intensidad de campo no caiga por debajo del valor nominal. La tolerancia de 6 dB está considerada como el valor mínimo que puede obtenerse con instalaciones de ensayo reales.

Una tolerancia de la componente de campo eléctrico primaria superior a ${}^{-0}_{+6}$ dB hasta ${}^{-0}_{+10}$ dB, o un nivel de componente de campo eléctrico secundaria hasta -2 dB de la componente de campo primaria, está permitida para un porcentaje máximo de frecuencias de ensayo como el definido en el apartado 5.1.1, en la medida que la tolerancia y las frecuencias reales estén indicadas en el informe de ensayo.

Tabla B.1
Puntos de calibración de la zona uniforme

Dimensiones	Disposición y número de puntos de medida	Número de puntos para satisfacer el criterio de -0 dB a + 6 dB
1,5 m × 1,5 m	4 × 4 = 16	12
1,0 m × 1,5 m	3 × 4 = 12	9
1,0 m × 1,0 m	3 × 3 = 9	7
0,5 m × 1,0 m	2 × 3 = 6	5
0,5 m × 0,5 m	4 + 1 (centro) = 5	4
0,25 m × 0,25 m	4 + 1 (centro) = 5	4

Las zonas que no figuran en la tabla B.1 se deben calibrar utilizando un número de casillas definido por la casilla más pequeña de 0,5 m conteniendo la zona propuesta (por ejemplo, una zona de 20 cm × 20 cm utilizando 4 + 1 (centro) = 5 puntos, una zona de 80 cm × 80 cm utilizando 3 × 3 = 9 puntos y una zona de 1,2 cm × 0,6 cm utilizando 4 × 3 = 12 puntos). El espacio de casilla debe ser uniforme a lo largo de cada lado (por ejemplo, 1,2 m × 0,6 m de zona uniforme debe utilizar un tamaño de celda básica de 0,4 m × 0,3 m). Como se indica anteriormente, al menos el 75% de los puntos de medida deben cumplir el criterio de uniformidad (por ejemplo para un casillero de 12 puntos se requiere una conformidad de 9 puntos). En el montaje de ensayo, la cara del ESE debe iluminarse coincidiendo con este plano.

NOTA 2 – La prescripción de una zona uniforme se basa en el método de validación del modo TEM del apartado 5.1.1. En principio, la uniformidad de campo se verifica en términos de componente de campo primaria en modo TEM. Si se utiliza el campo resultante en su lugar, todos los requisitos mencionados anteriormente se deben cumplir y es necesario demostrar que los requisitos sobre las componentes secundarias del apartado 5.1.1 sean satisfechos. En [17] se dan más informaciones relativas a la homogeneidad de campo.

El procedimiento de realización de la calibración es conocido como el método “a potencia transmitida constante” y comprende las siguientes etapas:

- posicionar el captador de campo eléctrico isotrópico en uno de los puntos de la cuadrícula;
- aplicar una potencia incidente al puerto de entrada de la guía de onda TEM de forma que el campo eléctrico de la componente de campo primaria esté comprendido entre 3 V/m y 10 V/m, en toda la gama de frecuencias especificada en el apartado 5.1.1 en pasos de frecuencia especificados en el apartado 5.1.1 y registrar todos los valores leídos de potencia transmitida, y de las intensidades de campo de las componentes primaria y secundarias;
- con la misma potencia incidente, medir y registrar las intensidades de campo primarias y secundarias en los restantes puntos de la cuadrícula;

NOTA 3 – La dimensión más grande del captador de calibración debería ser inferior al 10% de la distancia que separa el conductor interior y el conductor exterior. En este caso, toda perturbación de campo se puede desatender. En [18] se dan detalles suplementarios.

- teniendo en cuenta todos los puntos de la cuadrícula, suprimir un máximo del 25% (4 sobre 16, 2 sobre 9, 1 sobre 5) de dichos puntos que presentan la desviación más importante con relación al valor medio de la componente de campo primaria, expresada en V/m;
- la amplitud de la componente de campo primaria de los restantes puntos debe caer en un margen de 6 dB. El nivel de las componentes de campo secundarias no debe exceder -6 dB de la componente de campo primaria en cada uno de estos puntos;
- de los puntos restantes, tomar como referencia la posición correspondiente a la componente de campo primaria más baja (esto asegura que el requisito -0_{+6} dB se satisface);

- g) a partir del conocimiento de la potencia transmitida y de la intensidad de campo, se puede calcular la potencia incidente necesaria para el valor de intensidad de campo de ensayo requerido (por ejemplo, si en un punto dado 81 W da 9 V/m, entonces 9 W son necesarios para 3 V/m). Esto se debe registrar.

Alternativamente, un procedimiento equivalente consiste en establecer un campo eléctrico de componente primaria constante en el margen de 3 V/m a 10 V/m, y registrar la potencia incidente entregada al puerto de entrada. Se deben respetar los principios indicados en a), d), e), f) y g). Este método es conocido como de “intensidad de campo constante” (Norma IEC 61000-4-3).

La calibración es válida para todos los ESEs cuyas caras individuales (incluyendo los cables) pueden estar completamente abarcadas por la “zona uniforme”. Está previsto que la calibración de la zona uniforme completa se realice anualmente o cuando se produzcan modificaciones en la configuración de la envoltura (celda TEM o línea abierta en el interior de una cámara apantallada).

B.2.3 Niveles de ensayo

Los niveles de ensayo se dan como guía.

Tabla B.2
Niveles de ensayo

Nivel de ensayo	Intensidad de campo de ensayo V/m
1	1
2	3
3	10
X	Especial
NOTA – X es un nivel de ensayo abierto. Este nivel puede estar indicado en la especificación de producto.	

B.2.4 Correlación con la Norma IEC 61000-4-3

La correlación con la Norma IEC 61000-4-3 es posible con los métodos de ensayo descritos para

- a) ESEs pequeños (véase el apartado 6.1);
- b) ESEs grandes (véase el apartado 6.2).

Los métodos de ensayo para los ESEs grandes están en estudio.

B.2.5 Armónicos

En estudio.

NOTA – Ciertas guías de onda TEM pueden presentar resonancias a frecuencias superiores a la frecuencia útil superior recomendada. La Norma ISO 11452-3 requiere la instalación de un filtro paso-bajo de al menos 60 dB a frecuencias superiores a 1,5 veces la frecuencia de corte de la guía de onda TEM.

B.3 Montaje de ensayo

B.3.1 Instalación de un equipo sobre mesa

Para las guías de onda TEM, en lugar de utilizar una mesa no conductora de 0,8 m de altura, el equipo se coloca sobre un soporte de ensayo (véase el apartado 3.1.16) o un manipulador (véase el apartado 3.1.21) de forma y dimensiones apropiadas, de manera que la cara frontal esté situada dentro de la zona de campo uniforme para cada posición. Un montaje típico del ESE está representado en la figura B.1.

B.3.2 Instalación de un equipo sobre el suelo

Para las guías de onda, el equipo está colocado sobre un soporte de ensayo de manera que la cara frontal esté situada dentro de la zona de campo uniforme. La utilización de soportes de ensayo previene la puesta a masa accidental del ESE y la distorsión del campo. El soporte del montaje de ensayo debe ser preferentemente no conductor, mejor que un revestimiento aislante dispuesto sobre una estructura metálica.

B.3.3 Instalación de los cables

NOTA — Los ESEs grandes están en estudio y, por consiguiente, la disposición de los cables también.

El cableado queda expuesto al campo electromagnético sobre una distancia de 1 m a partir del ESE y está colocado sobre el suelo, bien al nivel del ESE bien a lo largo de la diagonal en el plano xy , hasta el punto de salida en el conductor exterior de la guía de onda TEM (celda TEM: pared, suelo). Se debe evitar la disposición de los cables en la dirección z a lo largo del conductor exterior o interior. Los cables dispuestos paralelamente al conductor interior o exterior de la guía de onda TEM, deben estar separados del conductor al menos 0,1 m. Los cables de salida están terminados por pinzas absorbentes (véase el apartado A.5.2). La terminación del cable de salida está ubicada en el límite de la zona uniforme. Para tener una guía sobre las características de la pinza absorbente, ver las descripciones en la Norma CISPR 16-1.

B.4 Procedimientos de ensayo

El ensayo debe realizarse normalmente con cada una de las cuatro caras del ESE de frente al puerto generador.

Para las guías de onda TEM, el campo eléctrico está polarizado en una sola dirección (normalmente vertical). Así, para asegurar que el ESE está completamente expuesto al equivalente de ambas polarizaciones vertical y horizontal simultáneamente, es necesario hacerlo rotar. Por ejemplo, para un campo eléctrico polarizado verticalmente, las exposiciones en polarización horizontal equivalentes se realizan primero aplicando una rotación de 90° al ESE alrededor del eje perpendicular a la zona uniforme (dirección de la propagación del modo TEM) para reorientar la primera cara del ESE, después se le aplican tres rotaciones alrededor del eje horizontal alineado sobre la zona uniforme, para exponer las otras caras del ESE (figura B.1). Esto puede excluir los ensayos en ciertas guías de onda TEM de un ESE que depende de la orientación.

Alternativamente, la guía de onda TEM se puede rotar alrededor del ESE o de una guía de onda TEM de polarización múltiple (figura A.9) puede utilizarse para obtener la misma polarización.

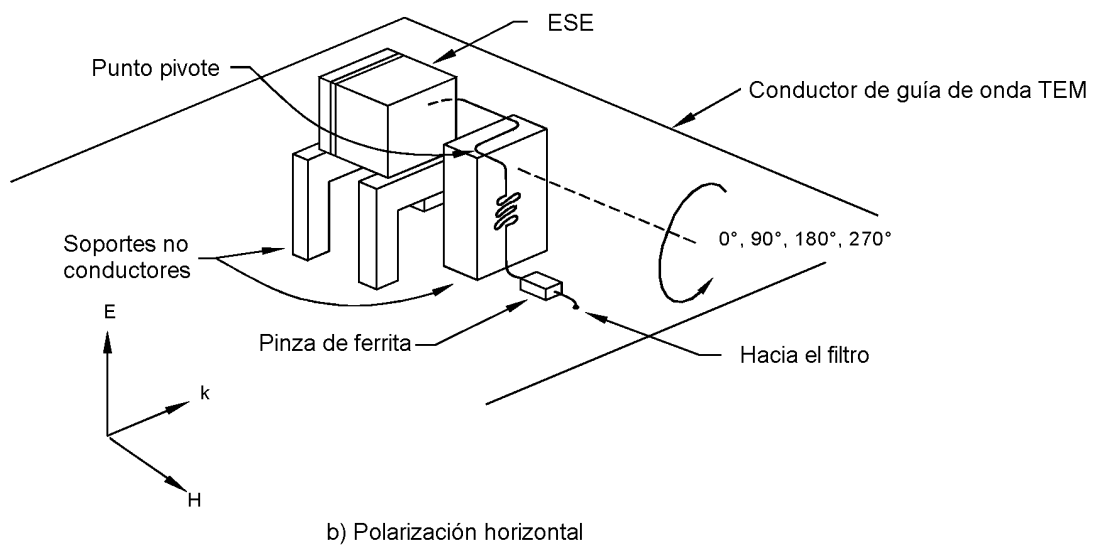
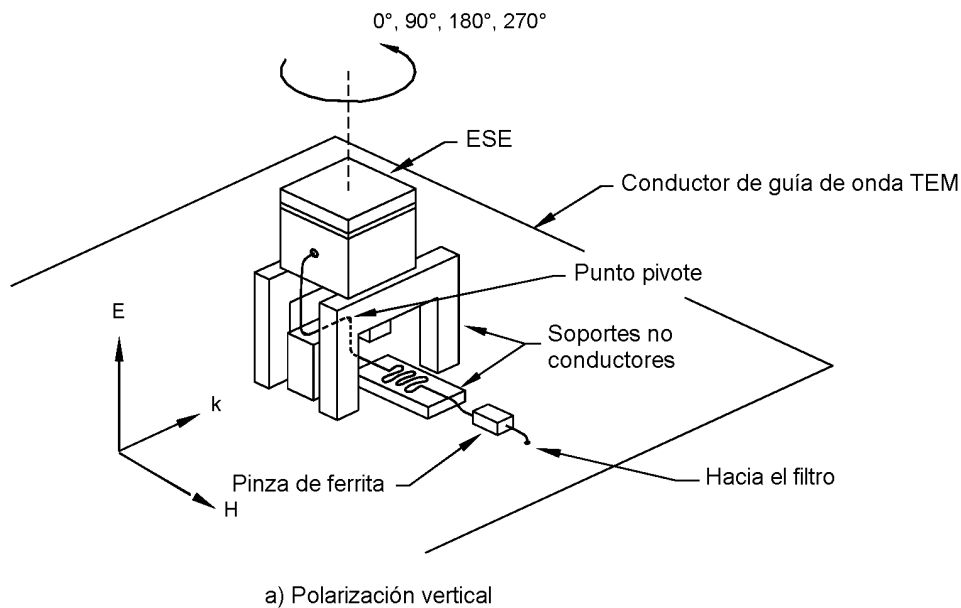
NOTA 1 — Si un ESE consta de varios elementos, hay que vigilar que las posiciones relativas de los elementos se conservan durante las rotaciones. Esto puede necesitar una disposición cuidadosa del ESE y la fijación de sus elementos y cables sobre un soporte de montaje de ensayo o un manipulador.

NOTA 2 — Los pasos de frecuencia y el tiempo de paso se deberían elegir conforme a la Norma IEC 61000-4-3.

B.5 Resultados e informe de ensayo

En estudio.

Además del contenido habitual del informe de inmunidad a las perturbaciones radiadas, se deben indicar detalles relativos al tamaño, el tipo y los métodos de verificación de la guía de onda TEM.



Leyenda

E componente de campo primaria
H campo magnético
K dirección de propagación (vector de onda)

NOTA 1 – Los ESEs grandes están en estudio y, por consiguiente, también la disposición de los cables.

NOTA 2 – La disposición del cableado al lado del filtro del punto pivote debe estar fija. Los soportes del montaje de ensayo (apartado 3.1.16) pueden recolocarse según sea necesario durante las rotaciones. Los soportes del montaje de ensayo deberían tener un espesor de 0,1 m. Los ESEs de unidades múltiples se deben fijar sobre un soporte del montaje de ensayo o una plataforma equivalente y se rotan de la misma manera. Se pueden utilizar los manipuladores y las guías de onda TEM que sufren rotaciones (véase [6]) o una polarización múltiple (figura A.9), y que obtienen el mismo conjunto de ESEs con relación a las polarizaciones del campo incidente.

Fig. B.1 – Ejemplo de montaje de ensayo para guías de onda TEM de polarización única

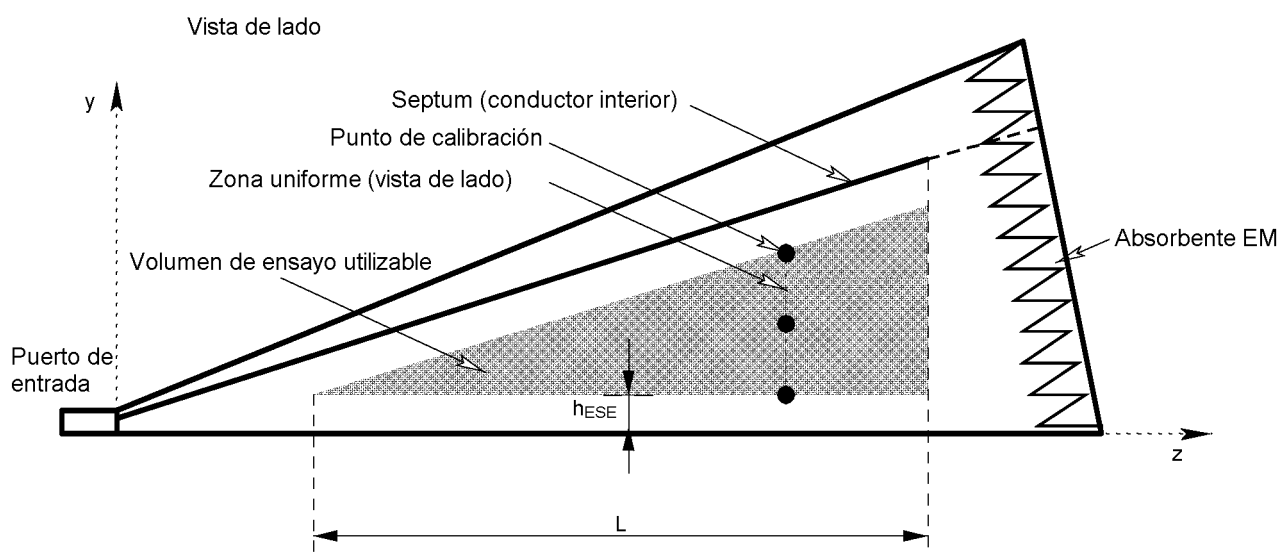


Fig. B.2a – Vista de lado

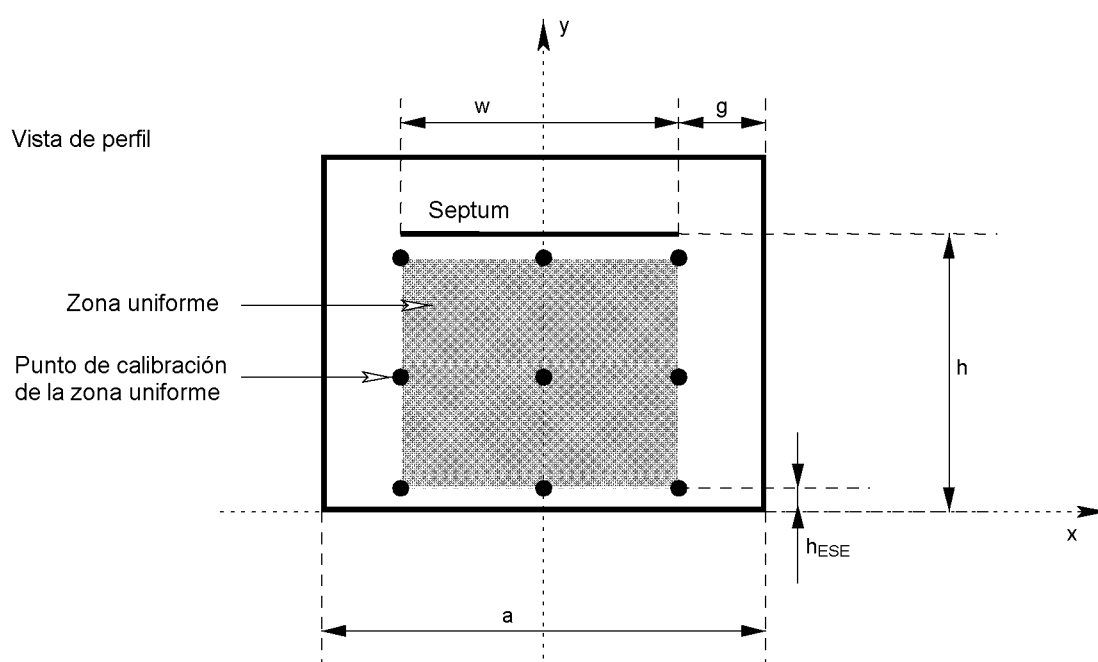


Fig. B.2b – Vista de perfil

NOTA – Ejemplo de una zona uniforme con 3×3 puntos de calibración en una celda GTEM de acuerdo con el apartado B.2.2. La figura B.2b muestra el tamaño máximo posible de la zona uniforme. El límite de la zona uniforme (plano) viene dado por los puntos de calibración exteriores. Los puntos de calibración no pueden estar en el exterior del volumen de ensayo utilizable (véanse el apartado 5.1.2 y las figuras A.6 a A.9).

Fig. B.2 – Puntos de calibración de la zona uniforme en una guía de onda TEM

ANEXO C (Normativo)

ENSAYOS DE TRANSITORIOS IEMN-GA EN LAS GUÍAS DE ONDA TEM

C.1 Introducción

Este anexo se ha desarrollado para especificar los ensayos de inmunidad a los impulsos electromagnéticos de alta altitud (IEMN-GA) para los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos. Se trata de permitir a los fabricantes cualificar los materiales y pequeños sistemas y utilizar muchos de los mismos ensayos de inmunidad IEC de laboratorio que se han prescrito para otros propósitos de CEM.

Se debería indicar que en el dominio IEMN-GA, el término “simulador” es a menudo utilizado para describir muchos tipos diferentes de instalaciones de ensayo que pueden producir el correcto entorno IEMN-GA incidente (véase la Norma IEC 61000-4-32). En este anexo, el término hace referencia únicamente a las guías de onda TEM que producen una forma de onda IEMN-GA.

Igualmente este anexo está destinado a describir los requisitos de ensayo IEMN-GA en las guías de onda TEM de manera homogénea con otros tipos de ensayos realizados en las guías de onda TEM, este anexo cubre los ensayos en transitorios que, por su naturaleza, difieren mucho de los ensayos en ondas continuas. Cuando los requisitos de ensayo IEMN-GA de este anexo difieran de los descritos en el cuerpo de esta norma, los requisitos IEMN-GA deben reemplazar a los otros.

C.2 Ensayos de inmunidad

Los ensayos de inmunidad IEMN-GA se componen de dos tipos principales: ensayos de inmunidad a las perturbaciones radiadas y ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas. Para las necesidades de este documento, el término “equipo electrónico” indica un aparato que realiza una función específica. Podría tratarse de un pequeño ordenador o de un teléfono. Ciertos equipos (por ejemplo, un ordenador conectado a periféricos complementarios tales como que los paneles de control para monitorear los procesos en una fábrica) se pueden considerar como parte de un sistema más importante. A menudo, los materiales electrónicos son relativamente pequeños – del orden de $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ o más pequeños. Es de prever que la mayoría de los ensayos de dichos equipos pequeños se realicen en los laboratorios utilizando simuladores de inyección de corriente y guías de onda TEM.

En ausencia de un objeto en el simulador, el campo eléctrico en el interior del volumen de ensayo es una onda comparable a una onda plana, con un histórico de duración de impulso biexponencial descrito por una onda 2,5/25 ns, es decir, una onda unipolar con un tiempo de subida del 10% al 90% de 2,5 ns, y una longitud de impulso igual a 25 ns. Esta forma de onda se da en la ecuación (C.1) siguiente.

$$E(t) = E_{\text{cresta}} \cdot k \cdot \left(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} \right) \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{C.1})$$

donde

$$\alpha = 6,0 \times 10^8 \text{ s}^{-1};$$

$$\beta = 4,0 \times 10^7 \text{ s}^{-1};$$

$$k = 1,3;$$

E es la componente primaria de campo eléctrico en V/m;

E_{cresta} es el valor de cresta de campo eléctrico en V/m;

t es la duración en segundos (s);

E_{cresta} es el nivel de ensayo de severidad elegido en la tabla C.1.

La amplitud espectral en el dominio de la frecuencia para la ecuación (C.1) se da en la ecuación (C.2)

$$|E(f)| = \frac{E_{\text{cresta}} \cdot k \cdot (\alpha - \beta)}{\sqrt{[(2\pi f) + \alpha][(2\pi f) + \beta]}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \frac{1}{\text{Hz}} \quad (\text{C.2})$$

donde f es la frecuencia, en Hz.

Para los parámetros de forma de onda arriba indicados, la amplitud espectral en el dominio de la frecuencia de la ecuación (C.2) está representada en la figura C.1.

NOTA – Para detalles suplementarios véase [23].

C.2.1 Instalaciones de ensayo en radiación

Instalaciones de ensayo pequeñas pueden satisfacer más fácilmente las especificaciones de campo deseadas, con tolerancias más bajas en las variaciones de los parámetros que con simuladores de gran tamaño. Estas pequeñas instalaciones se utilizarán esencialmente para los ensayos de materiales de tamaño relativamente pequeño. Las tolerancias para la forma de onda del impulso IEMN-GA inicial sobre la totalidad del volumen de ensayo de la instalación de ensayo pequeña, deben ser como sigue:

- la relación entre el campo eléctrico de cresta y el campo magnético de cresta debe ser igual a $\eta_0 = 377 \, \Omega \pm 50 \, \Omega$;
- el tiempo de subida entre el 10% y el 90% del valor de cresta debe ser de $2,25 \, \text{ns} \pm 0,25 \, \text{ns}$;
- el campo eléctrico debe aumentar de manera continua durante el tiempo de subida del 10% al 90%;
- la anchura del impulso (el tiempo entre los puntos de los flancos de subida y bajada del impulso al 50% de E_{cresta}) debe ser de $27,5 \, \text{ns} \pm 2,5 \, \text{ns}$;
- la amplitud de cualquier pre-impulso del campo eléctrico debe ser inferior o igual al 7% de la amplitud del campo de cresta;
- las reflexiones del campo eléctrico provenientes de la carga del simulador deben ser menores del 10% de la amplitud del campo de cresta;
- las fluctuaciones en el espectro de frecuencias liso del campo eléctrico en el centro del volumen de ensayo no deben ser superiores a $\pm 3 \, \text{dB}$ con relación al espectro teórico en la anchura de banda comprendida entre 100 kHz y 300 MHz;
- en el momento que el valor de cresta del campo primario, otras componentes electromagnéticas secundarias (véase el apartado 3.19) deben ser inferiores al 10% del valor de cresta del campo primario. Es conocido que este requisito es más estricto que el indicado en el apartado 5.1.1;
- el campo eléctrico de cresta debe ser uniforme en el volumen de ensayo según los criterios siguientes: el campo eléctrico de cresta en el interior del volumen de ensayo debe estar dentro del margen de E_{cresta} y $2 E_{\text{cresta}}$ en el dominio del tiempo;
- para evaluar las tolerancias del campo, las medidas de los campos eléctrico y magnético en el centro y en las ocho esquinas del volumen de ensayo deben realizarse en ausencia del ESE.

C.2.2 Requisitos de espectro en el dominio de la frecuencia

Adicionalmente a los requisitos relativos a los campos transitorios del simulador IEMN-GA, se deben respetar los requisitos siguientes para el espectro en el dominio de la frecuencia de los campos del simulador:

- a) el espectro de frecuencia debe calcularse utilizando una forma de onda transitoria muestreada de forma uniforme con 4 096 muestras entre el tiempo de inicio a 0 μ s y el final a 2 μ s. Un espectro de frecuencia de valores complejos de 4 096 puntos debe calcularse utilizando una FFT (transformada de Fourier rápida) o una DFT (transformada de Fourier discreta) con un intervalo de muestreo de frecuencias de 0,5 MHz y una frecuencia máxima de 1,0 GHz;
- b) el espectro en el dominio de frecuencia debe ser liso utilizando una ventana promediada a cinco puntos (es decir, que el espectro debe promediarse en una ventana de 2 MHz);
- c) la amplitud que resulta del espectro liso debe situarse en los límites del nivel especificado en dB del espectro de la forma de onda especificada de la ecuación (C.2) y representada en la figura C.1.

NOTA – La mayoría de los espectros de frecuencia medidos tienen valores nulos ocasionales (o “pérdidas de nivel”), que no modifican de forma significativa el comportamiento global de la forma de onda transitoria. El requisito según el cual el espectro en el dominio de frecuencia liso de los simuladores pequeños y grandes se sitúa, respectivamente, entre ± 3 dB y ± 10 dB, aporta el reconocimiento de este hecho, y tiene como objeto el permitir un valor nulo ocasionalmente en el espectro. Los límites espectrales de ± 3 dB y ± 10 dB son diferentes porque los simuladores más pequeños tienen generalmente tolerancias mayores y una precisión más importante de los campos simulados.

C.3 Equipo de ensayo

C.3.1 Instrumentación

El método de medida debe comprender la utilización de un enlace de transmisión por fibra óptica que permita la medida y la transmisión de las señales hacia un sistema de tratamiento de datos, sin perturbar el campo electromagnético ambiente. El sistema de medida debe ser intrínsecamente insensible a las radiaciones electromagnéticas emitidas por el simulador. El sistema de medida tiene por objeto

- suministrar las medidas de campo de referencia;
- sincronizar el IEMN-GA simulado con los modos operacionales del ESE como requiera el usuario; y
- suministrar las medidas de tensión y de corriente del ESE como requiera el usuario.

La precisión requerida para el sistema de medida global debe estar en los límites de ± 3 dB sobre una gama de frecuencias comprendida entre 50 kHz y 500 MHz, y su margen dinámico instantáneo global debe ser al menos de 40 dB.

Se recomienda que el sistema de medida presente las características siguientes:

- el sistema de transmisión de datos debería tener una anchura de banda mínima de 3 dB de 50 kHz a 1 GHz;
- el digitalizador u osciloscopio debería tener una anchura de banda mínima de 500 MHz y una tasa de muestreo mínima de 2 giga-muestras por segundo con una resolución de datos mínima de 8 bits;
- los captadores de campo eléctrico y magnético deberían tener una anchura de banda mínima de 3 dB de 50 kHz a 1 GHz. Véase la Norma IEC 61000-4-23 para más información relativa a los diseños apropiados para los captadores.

La medida de campo de referencia debe constar de tres componentes de campo eléctrico ortogonales y de tres componentes de campo magnético ortogonales para permitir una evaluación de la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético, así como de las componentes de campo electromagnético parásito. El usuario también puede especificar otras medidas de campo en el volumen de ensayo.

C.4 Montaje de ensayo

El volumen de ensayo de un simulador depende de su tamaño físico y de las características de la estructura de la guía de onda TEM. Se define este como el volumen en el cual los campos electromagnéticos incidentes satisfacen, o exceden, los requisitos de intensidad y uniformidad, como se especifica para un ensayo IEMN-GA. Si el ESE es demasiado grande con relación al volumen de ensayo, la respuesta inducida estará desviada de la de una iluminación de onda plana incidente, y los resultados del ensayo serán cuestionables.

Para asegurar la precisión de la simulación, es necesario minimizar la interacción entre el simulador y el ESE situando el ESE suficientemente alejado de los elementos radiantes o de la guía de onda del simulador. El material en ensayo debe situarse a una distancia superior a 0,3 veces la dimensión transversal global con relación a los conductores de guía de onda TEM. Si el ESE se ensaya mientras está sobre el suelo, se debe situar a una distancia superior a 0,6 veces su dimensión transversal con relación al septum.

El ESE se describe generalmente como un volumen finito con sus dimensiones determinadas por sus dimensiones ortogonales más significativas en altura, anchura y longitud. El ESE debe introducirse en el interior del volumen de ensayo del simulador como se define más arriba. Si los conductores exteriores de “tamaño corto” asociados al ESE se pueden iluminar de manera realista por el simulador, entonces estos cables también deben utilizarse para determinar el volumen del ESE. Si el ESE debe someterse a ensayo en un modo de campo libre; es decir, sin estar colocado sobre un plano de proyección horizontal, entonces debe colocarse sobre un soporte dieléctrico en el interior del simulador.

C.5 Procedimiento de ensayo

Los ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas y radiadas pueden realizarse por separado. No existe ningún requisito para realizar los ensayos de ambos tipos simultáneamente.

Si el sistema completo incluyendo todos los conductores exteriores “de tamaño corto” puede iluminarse de manera realista en un ensayo radiado, los ensayos conducidos precoces pueden no requerirse sobre estos cables. Además. Los ensayos conducidos pueden no ser necesarios para los puertos de antena, si la antena puede someterse a ensayo con la tensión IEMN-GA simulada, con la antena orientada para obtener una respuesta máxima. Sin embargo, todos los puertos conectados a las guías de onda de potencia, de telecomunicaciones o a otras líneas de gran longitud deben sufrir ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas.

Los ensayos de inmunidad IEMN-GA se deben realizar conforme a un plan de ensayo que describa el equipo a ensayar, el nivel de ensayo de severidad y las formas de onda, las condiciones climáticas, los modos principales de funcionamiento y los criterios para la satisfacción de los requisitos de inmunidad. El entorno ambiental (climático y electromagnético a la vez) del laboratorio o de la instalación de ensayo IEMN-GA no debe influenciar los resultados del ensayo. Durante los ensayos, es importante monitorear el equipo para clasificar sus prestaciones como está especificado. Si el equipo recibe y envía datos a otros equipos en un sistema, se debe hacer un esfuerzo para enviar y recibir los mismos datos o datos simulados con el equipo en ensayo. Esto debe permitir una evaluación de las prestaciones del equipo durante el ensayo.

Si el ESE no satisface los requisitos del ensayo y si se realizaron las medidas de diagnóstico en el interior del sistema o equipo, estas sondas o cables deben retirarse y se debe realizar de nuevo el ensayo para asegurar que la instrumentación añadida no es la causa del fallo del ensayo. El informe de ensayo debe identificar claramente la presencia de todos los cables exteriores conectados al ESE, según sean parte del equipo o del sistema de medida.

El ESE debe someterse a ensayo en cada modo principal de funcionamiento especificado en el plan de ensayo. Para los ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas, se deben utilizar las formas de onda positivas y negativas. Para los ensayos de inmunidad a las perturbaciones radiadas, sólo se requiere una polaridad de forma de onda.

Los ensayos de laboratorio deben realizarse con las condiciones de entorno ambiental dadas en el apartado C.5.1. Los ensayos in situ no son adecuados para los ensayos de aceptación en materia de inmunidad, pero estos ensayos pueden utilizarse para verificar la inmunidad del equipo instalado así como la inmunidad del sistema. Para los ensayos in situ, las condiciones ambientales descritas en el apartado C.5.1 siguiente son deseables pero no obligatorias.

C.5.1 Condiciones climáticas

Los ensayos IEMN-GA requeridos deben realizarse en las condiciones climáticas normalizadas conforme a la Norma IEC 60068-1:

- temperatura 15 °C a 35 °C;
- humedad relativa 25% al 75%;
- presión atmosférica 86 kPa a 106 kPa.

Se deben considerar otras gamas de condiciones climáticas si el equipo está diseñado y/o especificado para funcionar en dichas condiciones o si el ensayo debe realizarse en el exterior. Las condiciones climáticas deben medirse y registrarse en el informe de ensayo.

C.5.2 Nivel de severidad y exposiciones de ensayo

Es importante realizar ciertas exposiciones de ensayo por debajo del nivel de protección en tensión de dispositivos de protección contra las sobretensiones SPDs (surge protective devices) y también a un nivel de tensión suficientemente bajo para evitar la formación de un arco en el interior del sistema, en la medida que puedan aparecer daños. Así, cada nivel de severidad debe comprender tres amplitudes de ensayo reales, comenzando dos niveles por debajo del nivel de severidad especificado, el cual se considera como inferior al nivel de protección de tensión suministrado por los SPDs y por debajo del umbral de arco. Cada impulso de ensayo debe utilizar la misma forma de onda que la del nivel de severidad especificado.

Para los ensayos de inmunidad a las perturbaciones radiadas, se debe especificar un nivel de severidad. Se deben realizar al menos dos exposiciones de ensayo a cada una de las tres amplitudes de ensayo para cada orientación (capítulo B.4) y para cada modo principal de funcionamiento del ESE. Si está disponible una instalación de ensayo con capacidad de hiper-rotación (véase [6]) para el ESE, la instalación puede utilizarse para los ensayos IEMN-GA.

C.5.3 Procedimiento de ensayo

C.5.3.1 Medidas de los parámetros de ensayo. Los parámetros climáticos definidos en el apartado C.5.1 deben medirse por el operador del ensayo y documentarse. Las características de la instalación de ensayo con una serie de medidas de formas de onda de campo electromagnético, en el interior del volumen de ensayo sin que el ESE esté presente, deben ponerse a disposición del operador del ensayo. Esta información también debe incluir una evaluación que indique que se satisfacen los requisitos para la uniformidad de campo y las características de forma de onda indicadas en los apartados C.2.1 y C.2.2. Una medida de campo eléctrico de referencia debe registrarse para cada impulso de iluminación de campo.

C.5.3.2 Procedimiento de ensayo para las perturbaciones radiadas. Una pequeña instalación de ensayo a las perturbaciones radiadas puede utilizarse para someter a ensayo los equipos; sin embargo, también se requieren los ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas sobre todos los puertos para los cables. Un sistema pequeño puede someterse a ensayo en un simulador IEMN-GA grande y eventualmente satisfacer los requisitos de inmunidad a las perturbaciones conducidas para muchos puertos de los cables. Sin embargo, las líneas de gran longitud, tales como las líneas de potencia en corriente alterna y las líneas de telecomunicación, no pueden someterse a ensayo de forma apropiada en cualquier simulador IEMN-GA. En consecuencia, los ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas siempre son requeridos para estos puertos.

Se reconoce que el simulador IEMN-GA grande está más adaptado para realizar los ensayos a nivel de sistema donde piezas múltiples del equipo pueden funcionar juntas. Sin embargo, nada en esta norma exige la realización de los ensayos a nivel de sistema en tal simulador.

Cada ensayo de inmunidad a un nivel de severidad especificado comprende exposiciones a tres niveles: el nivel de severidad especificado y los dos niveles inmediatamente inferiores. Si sólo se define un nivel inferior en esta norma, entonces sólo debe utilizarse un nivel. Si está especificado el nivel de severidad más bajo, entonces sólo es necesario este nivel de exposición para el ensayo de inmunidad. Un mínimo de dos impulsos del campo de iluminación deben realizarse para cada nivel de exposición.

C.5.3.3 Instalación de ensayo pequeña para las perturbaciones radiadas. La aproximación de base utilizada en este procedimiento consiste en someter a ensayo equipos y sistemas de tamaño pequeño en una instalación de ensayo de laboratorio, por ejemplo, una guía de onda TEM. El ESE debe colocarse sobre un soporte dieléctrico a una altura de $0,1 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$ sobre el plano de suelo en el interior del volumen de ensayo y todos los cables del equipo deben utilizarse de manera coherente con el funcionamiento normal del equipo. Se debe establecer una conexión de tierra entre el plano de suelo y el ESE conforme a las especificaciones del fabricante. Es necesario controlar y documentar las longitudes y las posiciones de los cables asociados al ESE. Orientar el cableado para un acoplamiento mínimo a las componentes de campo eléctrico y magnético en la instalación de ensayo. Los ensayos complementarios de inmunidad a las perturbaciones conducidas se deben realizar por separado para tener en consideración el acoplamiento con estos dichos cables.

El ESE debe rotarse para exponer todos sus lados (normalmente seis lados) a los campos de impulsos incidentes, salvo que consideraciones prácticas limiten el número de rotaciones. Además, se deben aplicar las dos polarizaciones.

Si el método de monitoreado implica medidas en el interior del ESE, las sondas y los cables implicados deben colocarse con cuidado para minimizar los efectos desfavorables sobre las medidas. En particular, se recomiendan los cables de fibra óptica sin materiales metálicos para dichas medidas.

C.5.4 Ejecución del ensayo

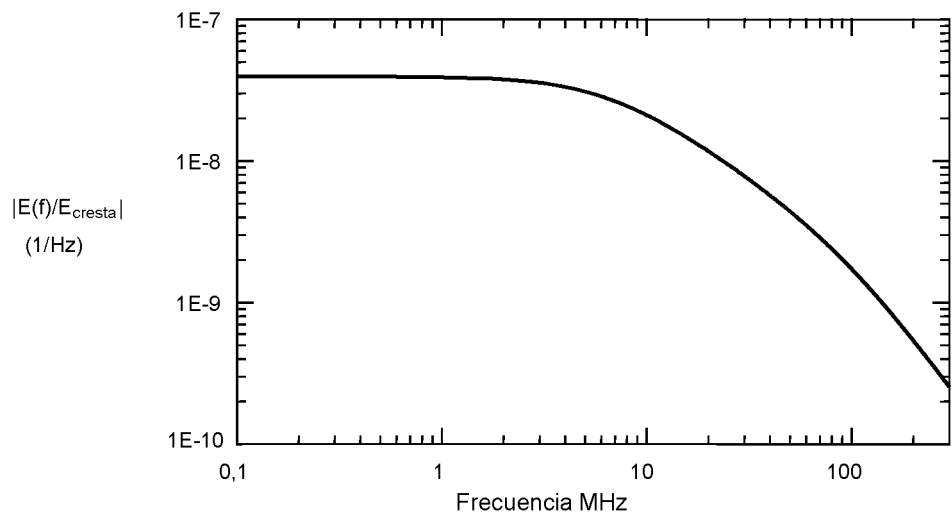
El ensayo debe realizarse conforme al plan de ensayo. Se deben aplicar las exposiciones de ensayo cuando el ESE esté en cada uno de sus modos principales de funcionamiento en las condiciones normales de funcionamiento, como se define en el plan de ensayo. Para cada nivel de exposición de ensayo, se deben aplicar los impulsos con tiempo suficiente entre ellos para verificar la degradación o los daños del sistema. Tras cada nivel de exposición, se deben determinar las características de funcionamiento del ESE.

C.5.5 Ejecución del ensayo de inmunidad a las perturbaciones radiadas

El ensayo de inmunidad a las perturbaciones radiadas se debe realizar sobre la base de un plano de ensayo, y comprende la verificación de las prestaciones del ESE, como se define en la norma de producto o, en su ausencia, por la especificación técnica.

El ESE debe estar en condiciones de funcionamiento normales. Debe desarrollarse una matriz de configuración de ensayo que incluya las configuraciones de funcionamiento del ESE, los estados principales de funcionamiento y las orientaciones con relación a la dirección de propagación de la onda. Para cada configuración de ensayo, el plan de ensayo debe especificar:

- los niveles de exposición de ensayo: el nivel de severidad elegido y los dos niveles inmediatamente inferiores;
- el número de exposiciones a cada nivel (se requieren al menos dos);
- los puntos de entrada (PdEs) o los puertos a evaluar;
- la descripción de las posiciones de los cables y las medidas a efectuar;
- el material auxiliar requerido;
- la polaridad y el ángulo de incidencia de los campos simulados;
- los detalles del montaje de ensayo, si son diferentes al especificado en el capítulo C.4 de este documento;
- los criterios de aceptación y de rechazo.



La amplitud espectral se determina por medio de los parámetros dados tras la ecuación (C.1) en la ecuación (C.2).

Fig. C.1 – Amplitud espectral en el dominio de la frecuencia entre 100 kHz y 300 MHz

Tabla C.1
Niveles de ensayo de inmunidad a las perturbaciones radiadas definidos en esta norma

Nivel de ensayo	Ensayo requerido para los materiales y los sistemas con la protección siguiente ^a	Valor de campo de cresta E_{cresta} ^b kV/m
R1	Concepto 4	0,5
R2	Valor intermedio	1
R3	Valor intermedio	2
R4	Conceptos 2A, 2B, 3	5
R5	Valor intermedio	10
R6	Valor intermedio	20
R7	Conceptos 1A, 1B	50
RX	Aplicaciones especiales	X

^a Los conceptos de protección están descritos en la Norma IEC 61000-5-3.

^b Según la Norma IEC 61000-2-11, tabla 2.

ANEXO D (Informativo)

CARACTERÍSTICAS DE LAS GUÍAS DE ONDA TEM

D.1 Introducción

Este anexo describe las características fundamentales de una onda TEM, incluyendo los aspectos de propagación y de polarización. También están presentes las diferentes categorías de guías de onda TEM, con los límites concernientes los volúmenes de ensayo y las frecuencias de funcionamiento.

D.2 Distinción entre impedancia de onda e impedancia característica

Una guía de onda TEM puede considerarse como un tipo particular de línea de transmisión coaxial, porque todas las guías de onda TEM se comportan como una línea de transmisión. Las impedancias de onda y las impedancias características de una línea de transmisión sin pérdidas están definidas como sigue en [33].

La impedancia de onda η se define como la relación entre las componentes de campo transversal, que pueden calcularse, suponiendo una dependencia de $e^{-j\beta z}$, para dar

$$\eta = \frac{E_{\rho}}{H_{\phi}} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (D.1)$$

donde

- η es la impedancia de onda;
- E_{ρ} es la componente transversal del campo eléctrico;
- H_{ϕ} es la componente transversal del campo magnético;
- μ es la permeabilidad del dieléctrico del cable (la mayoría de las veces, aire);
- ϵ es la permitividad del dieléctrico del cable (la mayoría de las veces, aire);
- β es la constante de propagación (parte real);
- ω es la frecuencia radiante.

Esta impedancia de onda es vista a menudo idéntica a la impedancia intrínseca del medio y constituye un resultado general para las líneas TEM.

La impedancia característica de una línea coaxial circular-cilíndrica se define como

$$Z_C = \frac{V_0}{I_0} = \frac{E_{\rho} \ln \frac{2h}{a}}{2\pi H_{\phi}} = \eta \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} \quad (D.2)$$

donde

- Z_C es la impedancia característica de la línea coaxial;
- V_0 es la tensión de la línea coaxial;
- I_0 es la corriente de la línea coaxial;
- E_{ρ} es la componente transversal del campo eléctrico;
- H_{ϕ} es la componente transversal del campo magnético;
- h $2h = r_i, r_i$: radio del conductor interior;
- a $a = r_a, r_a$: radio del conductor exterior.

donde las formas para E_ρ y H_ϕ de [7] han sido utilizadas. La impedancia característica depende de la geometría y será diferente para otras configuraciones de línea de transmisión.

Las ecuaciones (D.1) y (D.2) muestran que en general las impedancias de onda y característica no son iguales. En la medida que las celdas TEM y “TEM Gigahercios”, así como las líneas abiertas de dos y tres placas son básicamente líneas de transmisión TEM de dos conductores, en general las impedancias de onda y característica de estos dispositivos no serán iguales.

D.3 Onda TEM

Las ondas TEM se describen más fácilmente según su comportamiento en el espacio libre. Los dos párrafos siguientes presentan varias ecuaciones y criterios a la vez para los casos en el espacio libre y en guía de onda.

D.3.1 Espacio libre/modo TEM

En modo TEM, los dos vectores del campo eléctrico y magnético son completamente transversales con relación a la dirección de propagación de la energía (vector de Poynting $\vec{S}$). No hay componente ni de $\vec{E}$ ni de $\vec{H}$ en la dirección de transmisión.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{D.3})$$

Para el “espacio libre” la relación entre $|\vec{E}|$ y $|\vec{H}|$ está dada por

$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega \quad (\text{D.4})$$

Las propiedades esenciales del modo TEM son:

- no hay componente de campo en la dirección de transmisión;
- la relación entre $|\vec{E}|$ y $|\vec{H}|$ es aproximadamente de $120 \pi \Omega$.

NOTA – La situación anterior se observa a una distancia importante de una antena de emisión. Por esto, el modo TEM se denomina a menudo “condición en campo lejano” de una antena.

D.3.2 Guía de onda

Una guía de onda clásica para aplicaciones de RF consta sólo de una superficie conductora cerrada. Se puede demostrar que un modo TEM no puede propagarse en el interior de tal guía de onda. Sólo son posibles los modos TE y/o TM. Los modos TE o TM tienen una frecuencia de corte específica, la propagación de la onda sólo es posible por encima de esta frecuencia. Una sección de conexión doble o múltiple es necesaria para propagar un modo TEM en una guía de onda (línea de transmisión multi-conductora, como celda TEM, línea abierta o guía de onda TEM abierta). Cada par de conductores crea un sistema de propagación específica posible en modo TEM. Para el ejemplo representado en la figura D.2, la propagación de dos modos TEM separados es posible. Cada uno de estos modos TEM tiene las mismas propiedades que el modo TEM en el espacio libre.

NOTA – Cada par de conductores forma un sistema de transmisión en modo TEM. En el interior de una línea coaxial, la energía de la señal se transporta vía modo TEM.

D.4 Propagación de onda

La propagación de onda describe la forma de las líneas en fase y de las superficies del campo.

D.4.1 Propagación esférica

Este tipo de propagación es el más común en campo distante en espacio libre. Normalmente, está producido por una fuente puntual, como una antena única. La amplitud del campo disminuye con el aumento de la distancia a la fuente.

D.4.2 Propagación de onda plana en espacio libre

Muy alejado de la antena, el frente de onda puede considerarse como plano. Este tipo de propagación se observará en el interior de una guía de onda de placas paralelas, en la que la amplitud de campo es constante e independiente de la distancia con relación a la fuente.

D.4.3 Velocidad de propagación

La velocidad de fase del modo TEM para la propagación en espacio libre y en las guías de onda TEM es siempre igual a la velocidad de la luz c_0 . Sólo depende de la permitividad ε y de la permeabilidad μ del espacio.

D.5 Polarización

D.5.1 Vector de polarización

La dirección del vector de campo eléctrico representa el vector de polarización.

D.5.2 Polarización lineal elíptica

En general, la dirección del vector polarización cambia con el tiempo. La curva trazada por el extremo del vector polarización, representada en la figura D.3, define el tipo de polarización.

A partir de [7] la forma de la curva de polarización se puede calcular por el procedimiento siguiente. El vector campo eléctrico transversal viene dado por:

$$\vec{E}_{tr}(t) = Re \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} V_i \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (D.5)$$

El primer término de la serie representa el modo TEM, así un vector de Fresnel complejo puede escribirse como

$$\vec{A}_{TEM} = V_1 \cdot \vec{e}_{tr_1} = V_{TEM} \cdot \vec{e}_{tr_{TEM}} \quad (D.6)$$

El vector de Fresnel puede separarse en parte real e imaginaria,

$$\vec{A}_{TEM} = \vec{a}_r + j\vec{a}_i \quad (D.7)$$

Los vectores $\vec{a}_r$ y $\vec{a}_i$ definen un plano fijo. En general el extremo del vector $\vec{E}$ se deslaza sobre una elipse. Si $\vec{a}_r$ y $\vec{a}_i$ son paralelos, $\vec{E}$ se deslaza sobre una línea fija. Este caso se denomina polarizado linealmente. Todos los modos individuales son fundamentalmente polarizados linealmente. Sólo la superposición con otros modos da lugar a una polarización circular. El modo TEM intencional para los ensayos en las guías de onda TEM está generalmente polarizado linealmente.

D.6 Tipos de guías de onda TEM

La versión más sencilla de guía de onda TEM es una línea de transmisión de dos conductores como se representa en la figura D.5.

La línea de transmisión completa puede dividirse en tres secciones.

1 Sección alimentación

Se trata del puerto donde un generador o un receptor de señal se conecta a la guía de onda TEM

2 Sección guía de onda TEM

Contiene generalmente el volumen de ensayo.

3 Sección terminación

Normalmente, la terminación representa una resistencia real o equivalente que es igual a la impedancia característica de la línea de transmisión (= guía de onda TEM)

Para la mayoría de las guías de onda TEM de dos puertos, las secciones alimentación y terminación son geoméricamente idénticas e incluso intercambiables. En ambos puertos se utiliza un conector coaxial. Ciertas guías de onda TEM se basan en un sistema de línea de transmisión simétrica, en cuyo caso es necesario un transformador SIMETRIZADOR.

En primer lugar, las guías de onda TEM se pueden clasificar en geometrías cerradas y abiertas. Una geometría se denomina “cerrada” cuando un conductor encierra completamente al otro conductor. En este caso, el conductor exterior actúa como una pantalla electromagnética.

En segundo lugar, hay guías de onda de un puerto y de dos puertos. Esta clasificación define la terminación de una guía de onda TEM. Normalmente, la guía de onda TEM se utiliza en condiciones de terminación adaptada. La manera más sencilla de cargar una guía de onda TEM de dos puertos consiste en poner una terminación de constantes localizadas igual a la impedancia característica de un puerto. En este caso, se supone que la geometría de la línea TEM próxima a los puertos (sección de transición progresiva) es bien conocida para la adaptación a la banda ancha (véase la figura D.4).

Para una guía de onda TEM de un puerto, la terminación se realiza con resistencias repartidas y/o una combinación de absorbentes anecoicos. Este tipo de terminación puede utilizarse hasta varios GHz en algunas geometrías. Más que una gama de frecuencias ancha, una guía de onda TEM de dos puertos tiene la ventaja de permitir medidas de potencia reflejada y transmitida en cualquier puerto.

Los septums pueden ser un hilo único o hilos múltiples conectados en paralelo, o una placa única o placas múltiples conectadas en paralelo. Para los sistemas de conectores múltiples, la amplitud y la fase de excitación pueden modificarse voluntariamente para variar la polarización dominante en el interior del volumen de ensayo.

El septum puede instalarse de forma simétrica o asimétrica con relación al conductor exterior. La ventaja de una guía de onda TEM asimétrica es un volumen de ensayo mayor.

D.6.1 Guías de onda TEM abiertas (striplines, etc)

Una guía de onda TEM abierta simple puede construirse utilizando una placa instalada sobre un plano de suelo conductor. Se conecta a un puerto un generador o un receptor (impedancia típica de 50 Ω) y el otro puerto está adaptado a la impedancia característica de la línea de transmisión. Una distribución tensión/corriente constante a lo largo de la estructura se obtiene con una adaptación de impedancia correcta. Esta geometría se denomina guía de onda TEM abierta de dos puertos.

El principal inconveniente de las guías de onda abiertas es la energía perdida con relación a la radiación. Esta radiación no deseada puede causar perturbaciones sobre el sistema del equipo en ensayo. Para los ensayos de inmunidad a onda continua en particular, una cámara apantallada es absolutamente necesaria para la guía de onda abierta.

D.6.2 Guías de onda TEM cerradas (celdas TEM)

La principal ventaja de las guías de onda TEM cerradas es el blindaje inherente. Todos los ensayos de inmunidad se pueden realizar sin generar perturbación sobre el entorno. Otra ventaja es que la celda es un sistema asimétrico de forma que no necesita SIMETRIZADOR. Por último, en general, una guía de onda TEM no tiene límite de baja frecuencia. Por esta razón, los ensayos a los transitorios pueden realizarse con las guías de onda TEM cerradas.

NOTA – Para una guía de onda TEM de alimentación simétrica, se puede introducir una limitación en baja frecuencia por el SIMETRIZADOR.

D.7 Límites de frecuencia

El funcionamiento de una guía de onda TEM está previsto a partir de la hipótesis según la cual, el modo TEM tiene una estructura de campo idéntica a una onda plana en espacio libre, sobre una porción definida de la sección de la celda. Es por ello que la utilización de una guía de onda TEM para la medida de emisión o inmunidad, requiere la propagación del modo TEM sobre la gama de frecuencias utilizable.

Para una frecuencia dada dentro del margen de funcionamiento de la guía de onda vacía, la onda tendrá una sección transversal de dimensión que permitirá la propagación de modos distintos del TEM establecido. Para un modo no-TEM dado, el punto a lo largo de la longitud de la guía de onda para el cual el modo se puede propagar es dependiente de la frecuencia y retorna hacia el punto de alimentación cuando la frecuencia crece. El modo no-TEM de orden más bajo (normalmente TE_{10}) puede propagarse cuando una dimensión de la sección transversal de la guía de onda, sobrepase media longitud de onda en espacio libre a esta frecuencia. Los modos de orden más elevado se lanzan inicialmente por la conversión de modo a partir del modo TEM. La conversión de energía entre dos modos está provocada por irregularidades en la estructura de la guía de onda que pueden acoplarse a ambos modos.

En la práctica, muchas guías de onda TEM abiertas y cerradas incluyen un cierto tipo de absorbentes anecoicos de ferrita o espuma para reducir o eliminar los modos de orden superior y las distribuciones de campos resonantes que no se propagan. En el caso de una instalación en locales apropiados en términos de distribución de campo modal, las características del modo TEM pueden preservarse esencialmente. Generalmente, con la combinación correcta de la carga en absorbentes y la transición de los conductores de entrada/salida, muchas guías de onda TEM pueden operar en modo TEM hasta frecuencias de varios GHz o superiores. El emplazamiento correcto de los absorbentes está determinado por las formas de las secciones de entrada/salida y la del volumen de ensayo. El inconveniente para muchas de las guías de onda TEM con revestimiento por absorbente en la sección del volumen de ensayo, es que el factor de campo e_{0y} (véase el apartado A.3.2.2.2) utilizado en el algoritmo de correlación de emisión, no puede calcularse de manera analítica. Esto puede conducir a incertidumbres de medida más elevadas.

Para toda guía de onda TEM con o sin absorbente, la gama de frecuencias válida se debe establecer por medio de los métodos descritos en esta norma (véanse los apartados 5.1.1 y 5.2.2).

Más informaciones sobre la homogeneidad de campo y la frecuencia resonante se dan en [17] y [19]. Para las guías de onda TEM sin absorbente, las frecuencias resonantes dependen de la geometría de la guía de onda TEM. En una celda TEM de dos puertos, ellas aparecen entre una cierta sección transversal de la sección de alimentación y de la sección de terminación, llamadas posiciones de corte z_c . Cada modo de orden superior tiene otra posición de corte, en función del tipo de modo. Entre puerto y posición de corte, el modo de campo no se puede propagar. Se produce una resonancia si la distancia entre las posiciones de corte es un múltiplo de media longitud de onda. Por razones de simetría, el campo resonante debe tener un máximo o ser nulo en medio de la celda a $z = z_{sym}$. Se pueden calcular las frecuencias resonantes de los modos de campo de forma analítica por

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{z_{sym}} \right)^2 + k_c^2(z_{sym})} \quad (D.8)$$

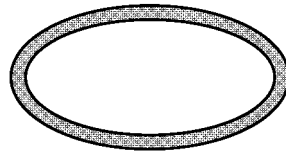
con $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ y $K_3, K_4 = f(z, a, k, k_c, J_v)$ y $k_c = f(z_c, a, \text{modo})$.

Las constantes K_1 a K_4 se pueden resolver de forma analítica. K_1 se elige igual a 1. Por tanto, K_2 vale 0. K_3 y K_4 se pueden escribir como:

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & -\sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \\ -\frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \end{pmatrix}. \quad (D.9)$$

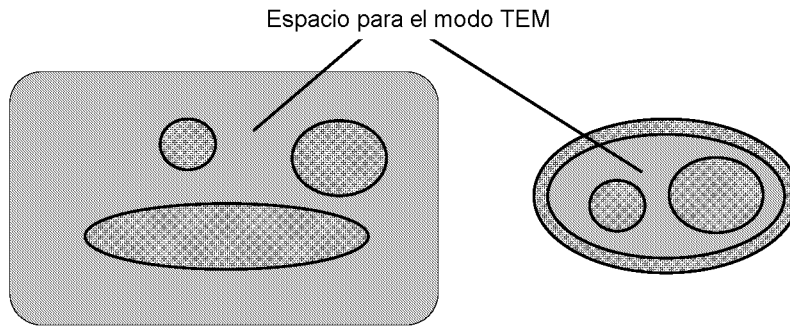
$$\begin{pmatrix} \frac{a' - 2\nu a'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_\nu(kz_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_{\nu-1}(kz_k) \\ \sqrt{a' z_k} \cdot J_\nu(kz_k) \end{pmatrix}.$$

Para los detalles véase [19].



Guía de onda con sección conectada única

Fig. D.1 – Guía de onda más sencilla (; sin onda TEM!)



Guía de ondas de sección triple conectada

Fig. D.2 – Guías de onda para propagación TEM

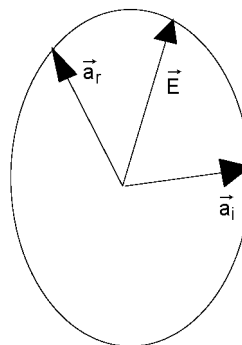


Fig. D.3 – Vector polarización

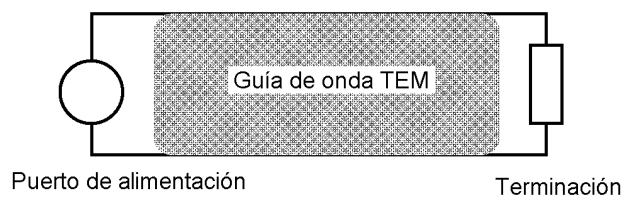


Fig. D.4 – Modelo de línea de transmisión para propagación TEM

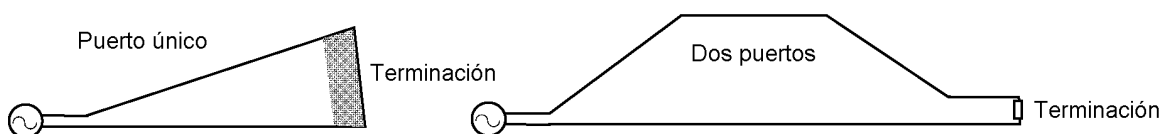


Fig. D.5 – Guías de onda TEM de uno y dos puertos

ANEXO E (Informativo)

NORMAS QUE CONTIENEN GUÍAS DE ONDA TEM

ANSI C63.4 – *Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz.*

ANSI C63.14-1998 – *American National Standard Dictionary for Technology of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD).*

CISPR 20 – *Receptores de radiodifusión y de televisión y equipos asociados. Características de inmunidad. Límites y métodos de medida.*

CISPR 22 – *Equipos de tratamiento de la información. Características de las perturbaciones eléctricas. Límites y métodos de medida.*

CISPR 25 – *Características de las perturbaciones radioeléctricas para la protección de los receptores utilizados a bordo de los vehículos. Límites y métodos de medida.*

EIA/TIA-631 – *Telecommunications Telephone Terminal Equipment. Radio Frequency Immunity Requirements for Equipment Having an Acoustic Output,*

ETR 273-5 – *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Improvement of radiated methods of measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties. Part 5: Striplines.*

IEC 60489-1 – *Métodos de medición de los equipos de radiocomunicación utilizados en los servicios móviles. Parte 1: Definiciones generales y condiciones normalizadas de medida.*

IEC 60489-3 – *Métodos de medición de los equipos de radiocomunicación utilizados en los servicios móviles. Parte 3: Receptores para emisiones A3E o F3E.*

IEC 61967-2¹⁾ – *Circuitos integrados. Mediciones de las emisiones electromagnéticas de 150 kHz a 1 GHz. Parte 2: Mediciones de las emisiones radiadas, método para la celda TEM.*

IEEE Std C95.1 – *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.*

IEEE Std C95.3 – *IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields. RF and microwave.*

IEEE Std 1309-1996 – *IEEE Standard for Calibration of electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz.*

IEEE Std 145-1993 – *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas.*

IEEE Std 211-1997 – *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation.*

ISO 11452 (todas las partes) – *Vehículos de carretera. Métodos de ensayo de un vehículo sometido a perturbaciones eléctricas por radiación de energía electromagnética de banda estrecha.*

1) En estudio.

MIL-STD 461 – *Electromagnetic Emission and Susceptibility, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference.*

MIL-STD 462 – *Electromagnetic Interference Characteristics, Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics.*

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Alexander, A. Nothofer, R. C. Dixon, "The use of ferrite clamps and clip-on ferrites", CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, junio 2001.
 - [2] ANSI C63.4-2000 – *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Dec. 2000.
 - [3] T.M. Babij, "Evaluation of errors in the calibration of TEM cells", *IEEE Miami Technicon 87*, Miami, FL, pp. 199-201, 1987.
 - [4] A. Beggio, G. Borio, and R. E. Zich, "On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table", *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp. 252-225, mayo 1999.
 - [5] S. Bentz, "Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996.
 - [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, "Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996.
 - [7] J. van Bladel, *Electromagnetic Fields*, Hemisphere Publishing Corporation, 1985.
 - [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt "Beeinflussung der Stromverteilung auf Testobjekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors," (translation: "Influence of current distribution on test objects in TEM waveguides for variable object size"), *Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG*, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Germany, vol. 39, 1996.
 - [9] E.L. Bronaugh, "Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells" *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 488-491, August 1990.
 - [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, "Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Aug. 1991.
 - [11] CISPR 14 (todas las partes) – *Compatibilidad Electromagnética. Requisitos para los aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y aparatos análogos*.
- | NOTA – Armonizada como Norma EN 55014, serie (sin ninguna modificación).
- [12] CISPR 20 – *Receptores de radiodifusión y de televisión y equipos asociados. Características de inmunidad. Límites y métodos de medida*.
- | NOTA – Armonizada como Norma EN 55020:2002 (sin ninguna modificación).
- [13] R.E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., IEEE Press, Piscataway, NJ, 1991.
 - [14] M. Crawford, and J. Workman, "Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980.
 - [15] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, "Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 459-464, Feb. 1997.

- [16] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, "Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp. 600-603, May 1999.
 - [17] C. Groh, J.P. Kaers, M. Koch, and H. Garbe, "TEM Waveguides for EMC measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol 41, n°. 4, pp. 440-445, Nov. 1999.
 - [18] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, "Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern," (translation: "Influence of load on field modes in TEM waveguides"), *Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC)*, VDE Verlag, Berlin, Germany, pp. 287-294, Feb. 2000, ISBN 3-8007-2522-3.
 - [19] C. Groh, *TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren*, (translation: *TEM cells for calibration of electromagnetic field probes*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, (to be published).
 - [20] T.E. Harrington, Z. Chen and M. D. Foegelle, "GTEM radiated emissions testing and FDTD modelling," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999.
 - [21] T.E. Harrington, "Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM waveguides," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 23-28, 2000.
 - [22] T.E. Harrington and E.L. Bronaugh, "ESE directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001.
 - [23] IEC 61000-2-9 – *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones radiadas*.
- | NOTA – Armonizada como Norma EN 61000-2-9:1996 (sin ninguna modificación).
- [24] IEEE Std 1309-1996: *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996.
 - [25] J.P. Kaerst, C. Groh and H. Garbe, "Field mode properties of loaded waveguides," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 481-486, Feb. 2001.
 - [26] J.P. Kaerst, *Qualifikation beladener TEM Wellenleiter*, (translation: *Validation of loaded TEM waveguides*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, (to be published).
 - [27] M- Klingler, J. Rioult, J.P. Ghys and S. Ficheus, "Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 665-670, 1999.
 - [28] M. Koch, *Analytische Feldberechnung in TEM Zellen*, (translation: *Analytical Field Calculation in TEM Cells*), PhD-thesis, University of Hannover, *Shaker-Verlag*, Aachen, Germany, 1999, ISBN 3-8265-6017-5.
 - [29] G. Koepke and M. Ma, "A new method to quantify the radiation characteristics of an unknow interference source," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 35-40, March 1983.
 - [30] M. Ma and G. Koepke, *Uncertainties in Extracting Radiation Parameters for an Unknow Interference Source Based on Power and Phase Measurements*, *National Institute of Standards and Technology* (NIST, formerly NBS), Technical Note 1064, June 1983.
 - [31] A. Nothofer, A. C. Marvin and J. F. Dawson, "Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, pp. 590-595, 1998.

- [32] A. Nothofer, A. C. Marvin and J. F. Dawson, "Indirect measurements of field uniformity in TEM cells including cross-polar field components", " *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 659-664, March 1999.
- [33] D.M. Pozar, *Microwave Engineering* 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998.
- [34] T. Schrader, *Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen*, (translation: *Comparison of Field Generators for EMC Tests*), PhD-thesis, University of Braunschweig, Germany, 1997.
- [35] I. Sreenivasiah, D. Chang and M. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell, " *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol 23, n° 3, pp. 113-121, Aug. 1981.
- [36] E. Steinke, P. Wilson and H. Garbe "An equivalent "radiated emission" voltage measurement standard for TEM cells," " *International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, pp. 301-304, Sept. 1992.
- [37] M-J- Thelberg, E.L. Bronaugh and J.D.M. Osburn, "GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1-5 GHz," *IEEE, " International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994.
- [38] J. Tippet and D. Chang, "Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell," *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol 18, n° 4, pp.134-140, Nov. 1976.
- [39] L. Turnbull and A. Marvin, "A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques," " *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol 40, n° 1, pp.62-69, Feb. 1998.
- [40] P. Wilson, D. Hansen and D. Koenidstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," *IEEE, " National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, pp. 171-177, May 1989.
- [41] P. Wilson, "On correlating TEM cell and OATS emission measurements," *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol 37, n°1, pp. 1-16, Feb. 1995.

ANEXO ZA (Normativo)

**OTRAS NORMAS INTERNACIONALES CITADAS EN ESTA NORMA
CON LAS REFERENCIAS DE LAS NORMAS EUROPEAS CORRESPONDIENTES**

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras normas por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Las revisiones o modificaciones posteriores de cualquiera de las normas citadas con fecha, sólo se aplican a esta norma europea cuando se incorporan mediante revisión o modificación. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de esa norma (incluyendo sus modificaciones).

NOTA – Cuando una norma internacional haya sido modificada por modificaciones comunes CENELEC, indicado por (mod), se aplica la EN/HD correspondiente.

Norma Internacional	Fecha	Título	EN/HD	Fecha	Norma UNE correspondiente¹⁾
IEC 60050-161	— ²⁾	Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética	—	—	UNE 21302-161 ⁴⁾
IEC 60068-1	— ²⁾	Ensayos ambientales. Parte 1: Generalidades y guía	EN 60068-1	1994 ³⁾	UNE-EN 60068-1:1997
IEC 61000-2-11	— ²⁾	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-11: Entorno. Clasificación de entornos IEMN-GA	—	—	—
IEC 61000-4-3	— ²⁾	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-3: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos, radiados y de radiofrecuencia	EN 61000-4-3	2002 ³⁾	UNE-EN 61000-4-3:2003
IEC 61000-4-23	— ²⁾	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-23: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de ensayo para los dispositivos de protección para perturbaciones IEMN-GA y otras perturbaciones radiadas	EN 61000-4-23	2000 ³⁾	UNE-EN 61000-4-23:2002
IEC/TR 61000-4-32	— ²⁾	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-32: Técnicas de ensayo y de medida. Compendio de simuladores IEMN-GA	—	—	—
IEC/TR 61000-5-3	— ²⁾	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 5-3: Guías de instalación y de atenuación. Conceptos de protección IEMN-GA	—	—	—

(Continúa)

Norma Internacional	Fecha	Título	EN/HD	Fecha	Norma UNE correspondiente¹⁾
CISPR 16-1	— ²⁾	Especificaciones de los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas. Parte 1: Aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas	—	—	UNE 208001-1 ⁵⁾
CISPR 16-2	— ²⁾	Especificaciones de los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas. Parte 2: Métodos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad	—	—	— ⁵⁾
CISPR 22 (mod)	— ²⁾	Equipos de tecnología de la información. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medida	EN 55022	1998 ³⁾	UNE-EN 55022:2000

1) Esta columna se ha introducido en el anexo original de la norma europea únicamente con carácter informativo a nivel nacional.

2) Referencia sin fecha.

3) Edición válida en la fecha de publicación.

4) El título de la Norma UNE es "Vocabulario electrotécnico. Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética".

5) Cuando CENELEC adopte la serie de la Norma CISPR 16 como serie EN 55016, a nivel nacional se adoptará como la serie de la Norma UNE-EN 55016.

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD DE VIGO