

Mayo 2002

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida

Sección 23: Métodos de ensayo para los dispositivos de protección para perturbaciones IEMN-GA y otras perturbaciones radiadas

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-23: Testing and measurement techniques. Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-23: Techniques d'essai et de mesure. Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations IEMN-HA et autres perturbations rayonnées.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 61000-4-23 de diciembre de 2000, que a su vez adopta la Norma Internacional CEI 61000-4-23:2000.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

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

ICS 33.100.99

Versión en español

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida
Sección 23: Métodos de ensayo para los dispositivos de protección
para perturbaciones IEMN-GA y otras perturbaciones radiadas
(CEI 61000-4-23:2000)

Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 4-23: Testing and measurement
techniques. Test methods for protective
devices for HEMP and other radiated
disturbances.
(IEC 61000-4-23:2000).

Compatibilité électromagnétique (CEM).
Partie 4-23: Techniques d'essai et de
mesure. Méthodes d'essai pour les
dispositifs de protection pour
perturbations IEMN-HA et autres
perturbations rayonnées.
(CEI 61000-4-23:2000).

Elektromagnetische Verträglichkeit
(EMV). Teil 4-23: Prüf- und
Messverfahren. Prüfverfahren für Geräte
zum Schutz gegen HEMP und andere
gestrahlte Störgrößen.
(IEC 61000-4-23:2000).

Esta norma europea ha sido aprobada por CENELEC el 2000-11-01. 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, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, 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

ANTECEDENTES

El texto del documento 77C/92/FDIS, futura edición 1 de la Norma CEI 61000-4-23, preparado por el SC 77C, *Fenómenos transitorios de gran intensidad*, del TC 77 de CEI, *Compatibilidad electromagnética*, fue sometido al voto paralelo CEI-CENELEC y fue aprobado por CENELEC como Norma EN 61000-4-23 el 2000-11-01.

Se fijaron las siguientes fechas:

- | | | |
|--|-------|------------|
| – fecha límite de adopción de la EN a nivel nacional por publicación de una norma nacional idéntica o por ratificación | (dop) | 2001-08-01 |
| – fecha límite de retirada de las normas nacionales divergentes | (dow) | 2003-11-01 |

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

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

En esta norma, el anexo ZA es normativo, y los anexos A, B, C, D y E son informativos.

El anexo ZA ha sido añadido por CENELEC.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional CEI 61000-4-23:2000 fue aprobado por CENELEC como norma europea sin ninguna modificación.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	6
Capítulos	
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	7
2 NORMAS PARA CONSULTA.....	7
3 DEFINICIONES	7
4 CONCEPTOS DE ENSAYO IEMN-GA.....	12
4.1 Ensayos de recintos apantallados.....	13
4.1.1 Edificios.....	15
4.1.2 Refugios de protección y cámaras.....	16
4.1.3 Armarios, paneles y cajas	17
4.2 Ensayo de cables y conectores apantallados	19
4.2.1 Ensayos del apantallamiento de los cables	20
4.2.2 Ensayos de conectores de cables	22
4.3 Ensayo de los materiales de apantallamiento	23
4.3.1 Juntas conductoras	24
4.3.2 Placas y pantallas conductoras	26
4.3.3 Guías de onda de corte y nidos de abeja	29
4.4 Resumen de conceptos del ensayo.....	29
5 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO IEMN-GA	30
5.1 Ensayos de campo electromagnético	30
5.1.1 Ensayos de campo de impulso	30
5.1.2 Ensayos de campo de ondas no moduladas	35
5.2 Procedimientos de ensayo de inyección de corriente.....	49
5.2.1 Ensayos de inyección en recintos	49
5.2.2 Impedancia y admitancia de transferencia de los apantallamientos en cables y conectores	51
5.2.3 Ensayo del material de las juntas.....	51
ANEXO A (Informativo) CONCEPTOS PARA LOS ENSAYOS IEMN-GA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	54
ANEXO B (Informativo) CARACTERIZACIÓN DE LOS CABLES APANTALLADOS	61
ANEXO C (Informativo) EQUIPO DE MEDIDA DE IMPULSOS IEMN-GA	66
ANEXO D (Informativo) EQUIPO DE ENSAYO DE ONDAS NO MODULADAS	75
ANEXO E (Informativo) CARACTERIZACIÓN DE UN APANTALLAMIENTO PLANO PARA LA PROTECCIÓN IEMN-GA.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	92

INTRODUCCIÓN

Esta norma forma parte de la serie de normas 61000 de la CEI, según la estructura siguiente:

Parte 1: Generalidades

Consideraciones generales (introducción, principios fundamentales)

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 no están bajo la responsabilidad de los comités de productos)

Parte 4: Técnicas de ensayo y medida

Técnicas de medida

Técnicas de ensayo

Parte 5: Guías de instalación y de atenuación

Guía para instalación

Métodos y dispositivos de atenuación

Parte 6: Normas genéricas

Parte 9: Varios

Cada parte está a su vez subdividida en varias partes, publicadas bien como normas internacionales, especificaciones técnicas o informes técnicos, habiendo sido algunos publicados como secciones. Otras serán publicadas con el número de la parte seguido de un título y completado de una segunda cifra que identifica la subdivisión (ejemplo 61000-6-1).

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida
Sección 23: Métodos de ensayo para los dispositivos de protección
para perturbaciones IEMN-GA y otras perturbaciones radiadas

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta parte de la serie CEI 61000 estudia las principales razones que justifican los ensayos practicados en los dispositivos IEMN-GA y da una breve descripción de los conceptos más importantes relativos a los ensayos de elementos de apantallamiento. Para cada ensayo, se dan las informaciones básicas siguientes:

- fundamento teórico del ensayo (concepto del ensayo);
- disposición de ensayo;
- equipo requerido;
- procedimientos de ensayo;
- tratamiento de datos.

Esta norma internacional no da ninguna información concerniente a los requisitos relativos a niveles de ensayo específicos.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación las ediciones indicadas estaban en vigor. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta norma internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las normas indicadas a continuación. Los miembros de CEI y de ISO poseen el registro de las normas internacionales en vigor en cada momento.

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

CEI 60096-1:1986 – *Cables para frecuencias radioeléctricas. Parte 1: Requisitos generales y métodos de medida.*

CEI 60625 (todas las partes) – *Instrumentos de medición programables. Sistema de interfaz (bits paralelos, octetos serie).*

CEI 61000-2-9 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones radiadas. Norma básica de CEM.*

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

ANSI/IEEE Std 488.1: 1987 – *Norma IEEE: Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation, 02-Feb-1988.*

3 DEFINICIONES

Para los fines de esta parte de la serie CEI 61000, se aplican las definiciones siguientes y las de la Norma CEI 60050(161).

3.1 abertura: Interrupción en la barrera electromagnética (pantalla) por la que pueden penetrar campos electromagnéticos.

3.2 punto de entrada de la abertura: Puntos que incluyen agujeros, resquebrajaduras y aberturas previstas o no, así como otras discontinuidades en el nivel de la superficie de apantallamiento del sistema.

NOTA – Se prevén puntos de entrada para permitir la entrada y la salida del personal y/o del equipo, así como para la ventilación a través de una barrera electromagnética.

3.3 atenuación: Reducción de la magnitud (que resulta de la absorción y de la difracción) de un campo eléctrico o magnético, de una corriente o de una tensión, generalmente expresada en decibelios.

3.4 Ancho de banda

3.4.1 ancho de banda de un dispositivo: Ancho de la banda de frecuencias dentro de la cual una característica dada de un equipo o de un canal de transmisión no se desvía de su valor de referencia en más de una cantidad especificada en valor absoluto o relativo.

[VEI 161-06-09]

3.4.2 ancho de banda de una emisión o de una señal: Ancho de banda de frecuencias fuera de la cual ningún componente espectral excede un porcentaje especificado de un nivel de referencia.

[VEI 161-06-10]

3.5 simulador de onda confinada: Tipo de simulador que permite producir campos electromagnéticos en una región bien delimitada del espacio denominada “volumen de ensayo”

3.6 caja: Envolvente que contiene un equipo eléctrico.

NOTA – Estas cajas contienen generalmente módulos de subsistemas.

3.7 Banda ancha

3.7.1 emisión de banda ancha: Transmisión cuyo ancho de banda es superior a la de un receptor o un aparato de medida dado.

[VEI 161-06-11]

3.7.2 dispositivo de banda ancha: Dispositivo cuyo ancho de banda es tal que puede recibir y procesar todos los componentes espectrales de una emisión dada.

[VEI 161-06-12]

3.8 circuito: Conjunto de elementos electrónicos interconectados que forman uno o varios caminos cerrados.

3.9 punto de entrada conductor; conductor de penetración: Hilo o cable eléctrico u otro objeto conductor, tal como una varilla metálica, que atraviesa la barrera electromagnética.

3.10 acoplamiento: Interacción de campos electromagnéticos y de circuitos eléctricos en el curso de la cual una parte de la energía del campo se transfiere al circuito.

3.11 inyección de corriente: Proceso en el que, a través de medios exteriores, se introduce una corriente en un circuito en un lugar deseado. En el marco de los ensayos IEM, se trata de un proceso según el cual se introducen impulsos de corriente transitorios IEM simulados en un componente, un circuito o un sistema en funcionamiento para medir los umbrales de deterioro y de perturbación

3.12 ensayo por inyección de corriente; CIT: Técnica de ensayo que utiliza la inyección de corriente.

3.13 frecuencia de corte (para una guía de onda): La frecuencia más baja para la que no existe atenuación de los campos electromagnéticos que se propagan en una guía de onda sin pérdidas. Por debajo de esta frecuencia, los campos disminuyen exponencialmente con la distancia a lo largo de la guía de onda.

3.14 dipolo: Antena recta, generalmente alimentada en su centro, que produce una radiación máxima en un plano normal a su eje principal.

3.15 ensayo directo: Excitación de un sistema eléctrico por la aplicación directa de una tensión o inyección directa de una corriente (transitoria o en régimen permanente) en un sistema de cables o en una superficie para simular los efectos de un impulso EM transitorio (véase inyección de corriente).

3.16 penetración de campo directo: Penetración del apantallamiento del sistema por el campo EM.

3.17 dirección de propagación: Dirección del vector de propagación k de una onda electromagnética plana, perpendicular al plano que contiene los vectores de los campos eléctricos y magnéticos.

3.18 intensidad de campo eléctrico; E: Magnitud del vector de campo eléctrico de una onda electromagnética o de un campo creado por una distribución de carga eléctrica, medida en voltios por metro.

3.19 barrera electromagnética; pantalla: Superficie topológicamente cerrada realizada para impedir o limitar la penetración de campos EM y de transitorios conducidos en el espacio encerrado. La barrera comprende la superficie de apantallamiento y los puntos de entrada protegidos y envuelve el volumen protegido.

3.20 perturbación electromagnética: Fenómeno electromagnético que puede degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema, o de afectar desfavorablemente la materia viva o la inerte.

[VEI 161-01-05]

3.21 entorno electromagnético: Conjunto de fenómenos electromagnéticos que existen en un lugar dado.

[VEI 161-01-01]

3.22 impulso electromagnético (IEM); impulso electromagnético nuclear (IEMN): Cualquier tipo de campo electromagnético producido por una explosión nuclear. Llamado también impulso electromagnético nuclear (IEMN).

3.23 radiación electromagnética

- a) fenómeno por el que una fuente genera energía hacia el espacio exterior, en forma de ondas electromagnéticas;
- b) energía transportada en el espacio en forma de ondas electromagnéticas.

[VEI 161-01-10]

3.24 topología electromagnética: Descripción de la interconexión de apantallamientos o barreras de un sistema, que delimita el entorno IEM en el sistema.

3.25 acoplamiento externo: Proceso por el que un campo electromagnético incidente ilumina las partes externas de un recinto de material conductor e induce sobre éste una corriente y una carga.

3.26 junta: Elemento flexible, generalmente conductor, utilizado para sellar una abertura en un recinto.

3.27 endurecimiento: Proceso que consiste en reducir la vulnerabilidad de un sistema o de un componente por técnicas de diseño, por ejemplo proporcionando una protección o un desacoplamiento con relación a un entorno exterior indeseable, tal como el IEM.

3.28 impulso electromagnético de gran altitud; IEM-GA: Impulso electromagnético producido en una explosión nuclear acaecida fuera de la atmósfera terrestre, generalmente más allá de 30 Km.

3.29 intensidad de campo magnético; H: Magnitud del vector de campo magnético de una onda electromagnética o campo generado por una corriente que circula por un hilo, una antena de cuadro, etc.

3.30 apantallamiento global: Protección de una entidad completa mediante la utilización de un recinto apantallado único o de un equivalente en la práctica, por ejemplo la protección del contenido de un edificio entero por el apantallamiento del conjunto del edificio.

3.31 simulador IEM de placas paralelas: Equipo de ensayo que utiliza el campo electromagnético existente entre las placas de una línea de transmisión paralela para simular aproximadamente un IEM. El equipo comprende generalmente un generador de impulsos, tomas de entrada y de salida en la línea así como una resistencia terminal adaptada que sirve para minimizar las reflexiones.

3.32 penetración: Transferencia de energía electromagnética de un volumen a otro a través de una barrera electromagnética. Esta transferencia puede efectuarse por difusión del campo a través de la barrera, por fugas del campo a través de aberturas y por una corriente eléctrica que pasa por conductores que unen los dos volúmenes (hilos, cables, tubos, tuberías, conductos, etc.).

3.33 punto de entrada; PdE: Emplazamiento físico (punto) en la barrera electromagnética, en el que la energía EM es susceptible de penetrar o de salir de un volumen topológico, a menos que sea instalado un dispositivo de protección adecuado. Un punto de entrada no se delimita por un punto geométrico. Los puntos de entrada se dividen en puntos de entrada de abertura o en puntos de entrada de conductor, en función del tipo de penetración. Se subdividen también en puntos de entrada arquitectónicos, mecánicos, estructurales o eléctricos en función del marco arquitectónico en el que se les encuentra más frecuentemente.

3.34 dispositivo de protección de punto de entrada; tratamiento de punto de entrada: Medida protectora utilizada en el punto de entrada para impedir o limitar la penetración de la energía EM en un volumen protegido. Los dispositivos de protección de puntos de entrada comunes comprenden guías de onda por debajo de la frecuencia de corte, placas de cierre en el caso de puntos de entrada de abertura, así como filtros y limitadores de sobretensión en los conductores de penetración.

3.35 volumen protegido: Espacio tridimensional delimitado por una barrera electromagnética.

3.36 impulso: Variación brusca y de corta duración de una magnitud física seguida de un retorno rápido a su valor inicial.

[VEI 161-02-02]

3.37 radiofrecuencia; RF: Frecuencia situada, en el espectro electromagnético, entre la frecuencia audio y el infrarrojo.

NOTA – Las frecuencias de audio también se integran a veces en esta definición.

3.38 campos de penetración del apantallamiento: Campos presentes dentro de un recinto apantallado. Los campos interiores existen porque el apantallamiento está hecho de materiales de conductividad finita y cuando no es perfecto (presenta agujeros, aberturas).

3.39 jaula de Faraday: Recinto cerrado por paredes metálicas lisas o malladas, destinados a separar electromagnéticamente el interior del exterior.

[VEI 161-04-37]

3.40 deterioro del apantallamiento: Reducción general o localizada de la eficacia del apantallamiento electromagnético debida a la presencia de aberturas, penetraciones, desgaste, una mala utilización, etc.

3.41 eficacia al apantallamiento: Medida de la reducción o de la atenuación de la intensidad del campo electromagnético en un punto del espacio, provocada por la inserción de una pantalla entre la fuente y este punto, generalmente expresado en decibelios (dB).

3.42 efecto de capa superficial: Tendencia de la corriente alterna de concentrarse en la capa superficial de un conductor. Resultando que la resistencia efectiva del conductor aumenta con la frecuencia.

3.43 sistema

- a) conjunto de subsistemas, conjuntos y/o componentes que funcionan conjuntamente de manera coherente para cumplir una misión básica;
- b) conjunto de dispositivos, subsistemas, personal cualificado y técnicas capaces de realizar o cumplir un papel operacional definido. Un sistema completo comprende las instalaciones, dispositivos, subsistemas, materiales, servicios y personal asociado requerido para asegurar su funcionamiento según un grado considerado suficiente en su entorno de funcionamiento y de soporte.

3.44 transitorio: Se dice de un fenómeno o de una magnitud que varía entre dos regímenes permanentes consecutivos en un intervalo de tiempo relativamente corto comparado con la escala de tiempo considerada.

[VEI 161-02-01]

3.45 dispositivos de protección contra transitorios; TPD; dispositivo de supresión contra transitorios; dispositivo de atenuación contra transitorios: Dispositivo de protección contra los transitorios (TPD) que provee una protección en un punto de entrada conductor. Puede, por ejemplo, incluir uno o varios de los elementos siguientes: (spark-gap) espinterómetro, varistor de óxido metálico (MOV) o filtro. Estos dispositivos se utilizan para reducir la tensión eléctrica que penetra una barrera electromagnética.

3.46 impedancia de onda: Relación entre la intensidad del campo eléctrico y la intensidad del campo magnético en el punto de observación, expresado en ohmios (Ω).

3.47 guía de onda por debajo de la frecuencia de corte: Guía de onda cuyo objetivo principal es atenuar las ondas electromagnéticas a frecuencias inferiores a la frecuencia de corte más baja, permitiendo la existencia de una abertura física a través de un recinto apantallado.

3.48 conjunto de guías de onda por debajo de la frecuencia de corte: Conjunto de guías de onda paralelas por debajo de la frecuencia de corte, utilizado cuando la superficie de una abertura necesaria para obtener un flujo líquido o gaseoso comprendido entre los límites de caída de presión excede el valor de superficie autorizado para una guía de onda única, por debajo de la frecuencia de corte.

3.49 malla metálica: Malla de hilos conectados utilizada normalmente para proteger las aberturas en una barrera electromagnética.

4 CONCEPTOS DEL ENSAYO IEMN-GA

La descripción y utilización de la *topología del apantallamiento electromagnético* del sistema constituye uno de los aspectos claves de la protección IEMN-GA. Se trata de localizar y caracterizar las diversas superficies (o barreras electromagnéticas) comprendidas en las regiones (volúmenes) que engloban el sistema, protegidas contra el IEMN-GA. Generalmente, estas superficies se construyen en un material conductor, como en el caso de una pantalla metálica. En los sistemas reales, deben ser practicadas aberturas en los apantallamientos para permitir una explotación normal del equipo en el interior. Estas aberturas degradan el apantallamiento y, si la degradación es demasiado importante, deben instalarse diversos tipos de dispositivos de protección IEMN-GA en estos puntos de penetración de la pantalla. Los emplazamientos de los diversos puntos de penetración y los tipos de dispositivos de protección determinan el emplazamiento y el tipo de ensayos a realizar para verificar el apantallamiento del sistema.

A título de ejemplo, puede considerarse el caso hipotético de un edificio que incluye una cámara fuertemente apantallada. Se supone que dentro de esta cámara, se unen varias envolventes de equipos por medio de cables y conectores apantallados. La primera superficie de apantallamiento de este sistema está constituida por el recinto del edificio. En función del tipo de edificio, puede constituir o no un apantallamiento importante para el volumen interior. Pueden existir grandes aberturas en forma de puertas y ventanas así como elementos de penetración de conductores para líneas de alimentación eléctrica y de comunicación que puedan existir. Es necesario efectuar ensayos de estos mecanismos de penetración individuales para evaluar el apantallamiento dado por este recinto.

En el interior del edificio, el campo IEMN-GA está algo atenuado por las paredes o el recinto del edificio. Así, la tensión eléctrica sufrida por la cámara apantallada interna es inferior a la del campo IEMN-GA ambiente exterior. La cámara apantallada interna, al estar diseñada específicamente para reducir los campos EM en el interior, se puede esperar que funcionará correctamente – si los diversos dispositivos de protección aplicados en las penetraciones de la pantalla son operacionales. Las penetraciones del campo a través de grietas y juntas en las paredes, la difusión a través del material de apantallamiento y las penetraciones conductoras a lo largo de los hilos de transmisión constituyen los principales puntos de fuga de energía en la cámara apantallada.

En el interior de la cámara apantallada, los elementos conductores exteriores de la caja del equipo y los cables apantallados forman la tercera barrera de este sistema hipotético. Como anteriormente, la energía EM puede penetrar en estas cajas interiores por los elementos de penetración conductores, aberturas y por difusión. Además, puede producirse una penetración de energía a través de cables trenzados y de conectores en las líneas que unen los diferentes recintos del equipo internos.

El anexo A describe conceptos de ensayo para perturbaciones conducidas y para perturbaciones radiadas. Este capítulo describe diversos métodos de ensayo para las medidas de protección contra el entorno IEMN-GA únicamente radiado. Estos ensayos implican la producción directa de campos EM actuando en los recintos o apantallajes del equipo, o la inyección de corriente y de carga en las pantallas, con el fin de simular la interacción de campos radiados en las estructuras. Este capítulo da también una breve introducción a los conceptos y técnicas de ensayo IEMN-GA concernientes a las perturbaciones de campo radiado. Los procedimientos de ensayo específicos se presentan en el capítulo 5.

4.1 Ensayos de recintos apantallados

El comportamiento de los recintos de protección puede caracterizarse de diversas maneras. A continuación, se examinan diversos conceptos de ensayo que sirven para describir el comportamiento de los elementos de apantallamiento individuales en cuestión. Aquí no se considera la manera como funciona el elemento de protección en la secuencia de interacciones global, que conduce a la reacción final del sistema frente al IEMN-GA. Tampoco los aspectos de una evaluación detallada del sistema, denominados ensayos “ahumados” (quemados) o de control rápido ni las cuestiones de la perturbación del sistema, que se fundan en la observación del conjunto de efectos de los niveles del sistema; es conveniente consultar el anexo A para más informaciones concernientes a estos tipos de ensayo IEMN-GA. En su lugar serán examinados los métodos de ensayo utilizados para verificar los niveles de protección provistos por los componentes de apantallamiento individuales integrados en el sistema, así como las indicaciones concernientes a los valores que deben medirse en el marco de estos ensayos.

Funciones de transferencia de campo

Se obtiene una medida común del apantallamiento estudiando la intensidad del campo EM interior con relación a la intensidad del campo EM exterior de excitación (es decir, el campo sin el edificio). Debido a que los entornos EM interiores y exteriores pueden definirse en términos de campo E o de campo H y siendo estos campos magnitudes vectoriales, es posible un gran número de combinaciones. Además, estos campos, por su naturaleza, son variables en el tiempo debido a la naturaleza transitoria de la amenaza IEMN-GA.

En lo que respecta a la descomposición de los campos interiores y exteriores en espectros frecuenciales, es posible una medida de la atenuación dada por el edificio gracias a la función de transferencia del campo $T(\omega)$, representada por la relación de las magnitudes del campo seleccionadas de manera adecuada como sigue:

$$T(\omega) = \frac{A_{in}(\omega)}{A_{out}(\omega)} \quad (1)$$

donde

A_{out} representa la componente espectral de una componente vectorial particular de uno u otro de los campos de excitación E o H en el exterior de la instalación; y

A_{in} representa una componenete de E o H en el interior del edificio.

En función de la elección de los campos interiores y exteriores, esta relación puede ser adimensional o presentar unas dimensiones de impedancia (en ohmios) o de admitancia (en siemens).

La función de transferencia de campo en la ecuación (1) es una magnitud compleja, que presenta a la vez una amplitud y una fase. La figura 1 presenta un ejemplo de función de transferencia entre el campo magnético de excitación externo y el campo magnético interno, medida para un recinto apantallado. Si se debe determinar una representación precisa de los campos transitorios interiores a partir de las medidas de $T(\omega)$, las dos magnitudes deben ser medidas. Si se desea únicamente una indicación relativa de la atenuación en función de la frecuencia para el edificio, es suficiente medir la amplitud $|T(\omega)|$.

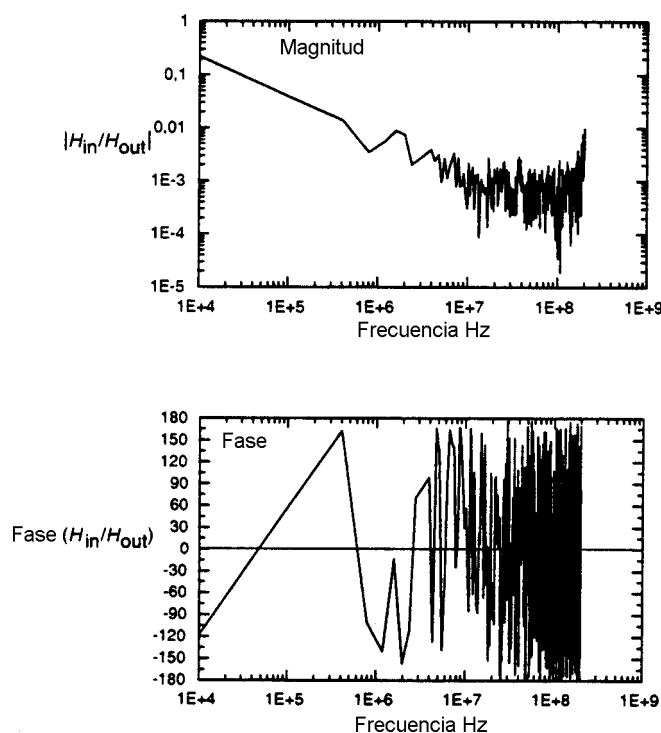


Fig. 1 – Ejemplo de función de transferencia $T(\omega) = H_{in}/H_{out}$ medida (amplitud y fase) para un recinto apantallado

Eficacia al apantallamiento

La eficacia al apantallamiento de una instalación está estrechamente ligada a la función de transferencia del apantallamiento discutida anteriormente, en la medida en que establece una comparación entre las amplitudes relativas de dos componentes de campo similares en el campo frecuencial. Sin embargo, esta magnitud contiene menos información porque falta información de la fase. La eficacia al apantallamiento del recinto se define por la fórmula siguiente:

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{|T_A(\omega)|} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

donde A_{out} y A_{in} representan las magnitudes adaptadas del campo E o H exterior e interior. Así, este valor depende estrechamente del trazado de la amplitud de la función de transferencia relativa a los campos.

Debido a las diferencias fundamentales en los mecanismos de apantallamiento eléctricos y magnéticos de baja frecuencia, la eficacia del apantallamiento frente a los campos eléctricos, señalada por SE_E , y la eficacia del apantallamiento frente a los campos magnéticos, SE_H , son muy diferentes en baja frecuencia. La figura 2 ilustra el apantallamiento teórico dado por un cuerpo de aluminio cerrado de espesor igual a 0,5 mm. Esta figura ilustra el hecho de que a una frecuencia elevada (superior de alrededor de 1 MHz), los parámetros de eficacia del apantallamiento son aproximadamente idénticos para los dos campos. Generalmente SE_H es inferior a SE_E en baja frecuencia (por debajo de 100 kHz), porque el campo magnético de baja frecuencia puede difundirse a través de las paredes del recinto de protección más fácilmente que el campo eléctrico. Es por esta razón que, a menudo, se utiliza únicamente la eficacia al apantallamiento de un recinto en el campo magnético para caracterizar un recinto.

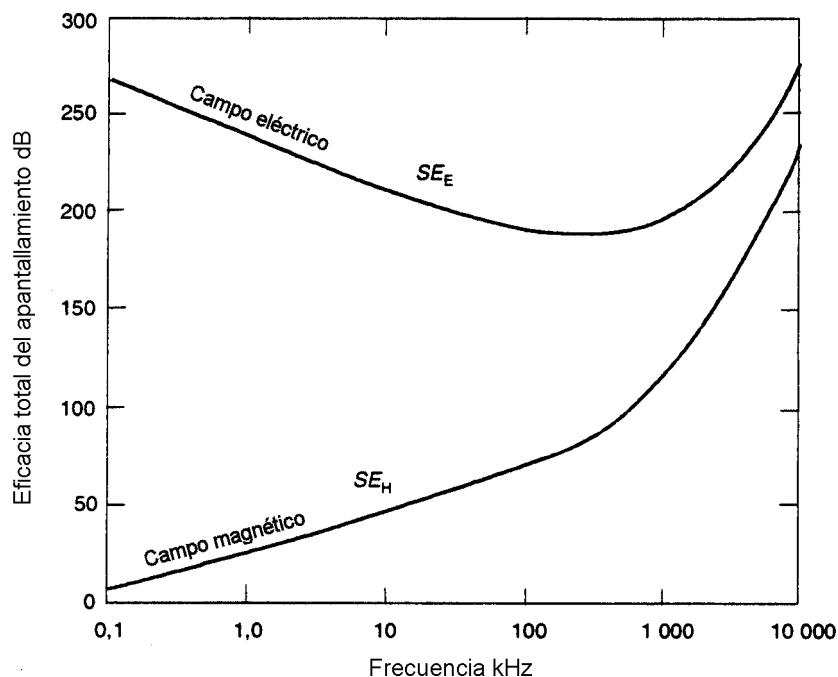


Fig. 2 – Eficacia al apantallamiento para los campos eléctrico y magnético en un recinto de aluminio de 0,5 mm de espesor [28]¹⁾

La figura 3 da otro ejemplo de la eficacia de apantallamiento de campo magnético medida para un recinto real e ilustra el comportamiento de SE_H por medidas realizadas para un edificio idéntico al de la figura 1. Es conveniente observar que el apantallamiento presenta varios valores máximos y valores nulos, que corresponden a las resonancias internas y externas del recinto, así a como a penetraciones que dependen de la frecuencia que viene a añadirse a la simple penetración difusa de los campos a través del material de apantallamiento.

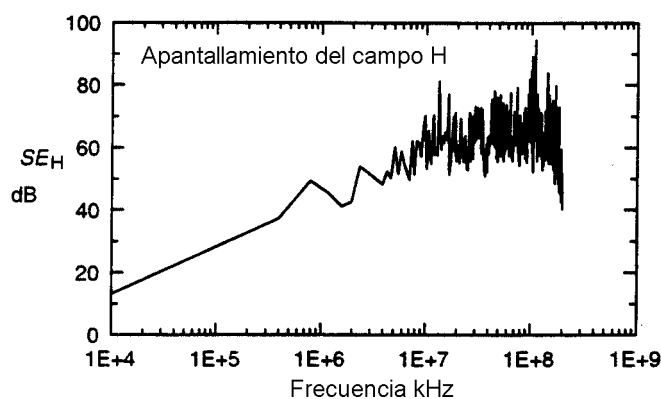


Fig. 3 – Eficacia de apantallamiento de campo magnético SE_H medida para un edificio

4.1.1 Edificios. Para un edificio tal como el que se muestra en la figura 4, la respuesta interna inducida por el IEMN-GA proviene principalmente de penetraciones conductoras y de abertura. Así, es conveniente excitar correctamente estos elementos de penetración en el marco de los ensayos del apantallamiento del recinto. La penetración del campo por difusión a través del apantallamiento global (por ejemplo las paredes del recinto) es generalmente baja.

1) Las cifras entre corchetes se refieren a la bibliografía.

El concepto de ensayo IEMN-GA relativo a los edificios físicamente más grandes implica la simulación de campos en el exterior del objeto de ensayo (véase la representación de los diversos emplazamientos de interfaz de ensayo en la figura A.1). Para esta excitación, es necesario medir una respuesta interna adaptada producida por este campo exterior.

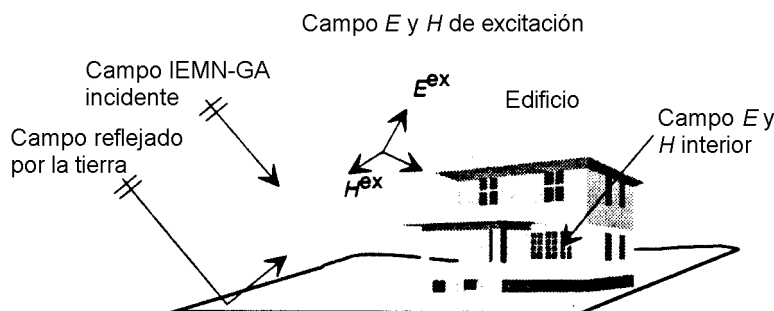


Fig. 4 – Ilustración conceptual del ensayo IEMN-GA de un edificio

En el exterior del edificio, el campo de excitación IEMN-GA simulado se expresa por los parámetros siguientes (véase la Norma CEI 61000-2-9):

- características de la forma de onda del campo incidente (más el campo reflejado por el suelo, llegado el caso) (tales como la amplitud, el tiempo de subida y de bajada);
- polarización del campo de excitación;
- proporción del sistema exterior iluminado por el campo simulado.

En el apartado 5.1 se presentan informaciones relativas al método de producción o de aproximación de este campo exterior.

Se pueden seleccionar diferentes tipos de respuestas internas para describir el apantallamiento del recinto de la instalación. Entre ellos se incluyen los campos internos E o H , o la tensión y la corriente inducidas en los conductores internos. En consecuencia, pueden existir diferentes medidas de apantallamiento para un sistema particular. Además, el emplazamiento del punto de observación interior puede variar, dando lugar a importantes variaciones de los índices de mérito del apantallamiento.

4.1.2 Refugios de protección y cámaras. En el caso de un refugio protector o de una cámara apantallada, se supone que el entorno IEMN-GA simulado se aplica siempre en el exterior del recinto, en donde los campos IEMN-GA incidentes se asume que proporcionan la mayor excitación a la estructura. En consecuencia, los conceptos de ensayo para estos recintos son similares a los conceptos relativos a los edificios más grandes. Estos recintos más pequeños pueden también caracterizarse por:

- una función de transferencia de campo de valor complejo, o
- una eficacia al apantallamiento.

Es conveniente sin embargo tener en cuenta que las señales transitorias serán también conducidas en esta instalación por las líneas de alimentación y que es preciso tratarlas separadamente, de acuerdo con la Norma CEI 61000-5-3.

La principal diferencia entre los edificios y los refugios o las cámaras apantalladas es que los niveles de protección IEMN-GA dados por los recintos más pequeños son muy superiores, porque están específicamente diseñados para proporcionar un grado alto de apantallamiento. En consecuencia, los niveles de las señales internas son generalmente inferiores a los niveles que existen en los edificios. Las medidas son por tanto más sensibles al ruido. Además, debido al tamaño reducido, los efectos de resonancia de la cavidad interna ocurrirán a frecuencias más altas. Consiguientemente, los conceptos de apantallamiento cuasiestáticos son aplicables en una escala mayor de frecuencias para estos recintos (véase la Norma CEI 61000-5-3).

La figura 5 muestra una cámara apantallada genérica que posee varios puntos de entrada de la barrera de apantallamiento identificados.

NOTA — No se muestran las penetraciones conductoras de alimentación y de transmisión, porque son objeto de una descripción por separado en la Norma CEI 61000-4-25.

La caracterización del conjunto del apantallamiento de la barrera por una función de transferencia de campo $T(\omega)$, o por la eficacia del apantallamiento SE , da una medida global de los efectos de penetración a partir de cualquier mecanismo de penetración indicado en la figura 5. Es decir que los campos interiores son producidos por las penetraciones de todos los puntos de entrada unidos, así como la difusión a través del material en las paredes del apantallamiento. Se dispone de otras técnicas de medida para caracterizar la protección dada por las penetraciones individuales (tales como juntas, conducto de ventilación, conducto apantallado, etc.); se estudian en el apartado 4.3.

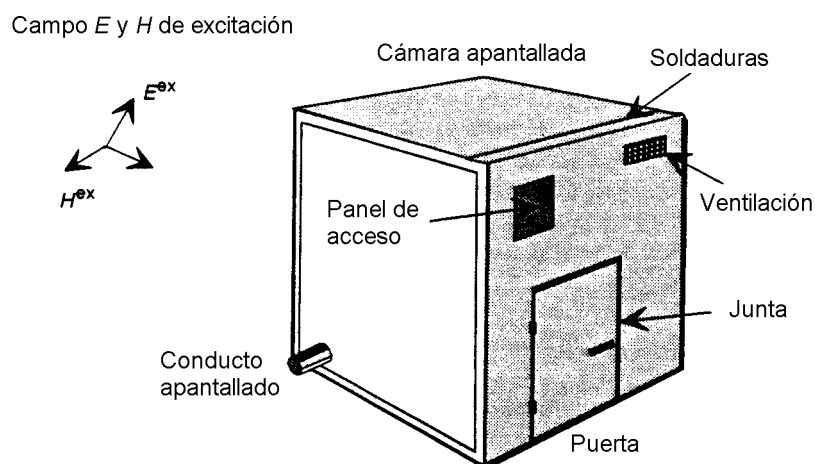


Fig. 5 – Ilustración de una cámara o de un recinto apantallado, excitado por campos IEMN-GA

4.1.3 Armarios, paneles y cajas. Estos recintos están situados generalmente dentro de una barrera EM existente, que modifica de forma importante el entorno del campo magnético que excita el sistema. Una caja interna o un armario es excitado por una combinación del campo EM interno y de las corrientes inyectadas en apantallamientos de cables provenientes de otros equipos, excitados también por los campos locales. En la figura 6 se da una muestra.

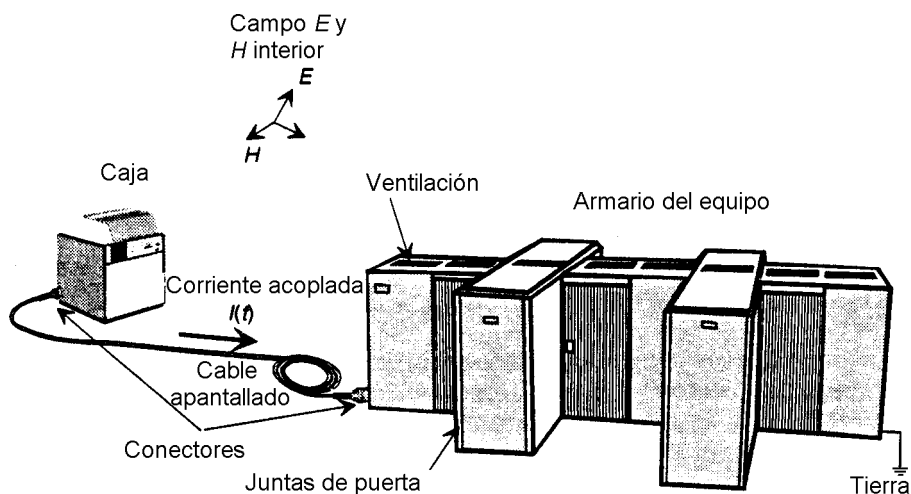


Fig. 6 – Muestra de paneles, armarios y cajas excitadas por una tensión IEMN-GA interna

Ensayo de iluminación de campo

Para los ensayos realizados en los recintos que implican campos EM en el interior de un recinto más grande, el concepto precedente de iluminación de campo puede adoptarse para medir el apantallamiento global dado por el material. Como antes, este apantallamiento puede caracterizarse por:

- un valor de transferencia de campo de valor complejo, o
- una eficacia al apantallamiento del recinto.

Debido al tamaño más reducido de estos recintos, pueden surgir dificultades para las medidas que provienen del embalaje interior compacto de los componentes electrónicos internos. Así, es a menudo difícil colocar los captadores de campo EM adecuados en el interior del armario. Por otra parte, para los ensayos que son realizados en la superficie de la caja o del recinto, existen importantes incertidumbres en la caracterización del entorno de campo IEMN-GA. Finalmente, la interconexión entre los diferentes elementos del equipo puede ser relativamente compleja y, si se practican ensayos en una caja o panel simple, su respuesta medida puede diferir considerablemente de la registrada cuando esté conectado al resto del sistema. El capítulo 5 da detalles para los ensayos de campo practicados en estos recintos.

Impedancia de transferencia del apantallamiento

También es posible, para sustituir los ensayos de campo practicados en las cajas y en pequeños recintos, aplicar el concepto de impedancia de transferencia del recinto; véase el anexo E. Es similar al tratamiento de un cable apantallado estudiado en el apartado 4.2 e implica practicar ensayos en una interfaz de la caja en el sistema. En este caso, una corriente $I(t)$ es inyectada a la superficie de la caja o del panel y se mide una tensión en circuito abierto $V_{oc}(t)$ en un cable de detección interna adecuado. En este tipo de ensayo, es importante asegurarse de que la corriente inyectada circula en el exterior de la caja de la misma manera que cuando la caja está conectada al resto del sistema. Esto implica que el punto de salida de la corriente (acoplamiento a tierra) debe ser mantenido, de manera que pueda suprimirse la corriente inyectada adecuadamente.

La figura 7 muestra un recinto apantallado general excitado por una inyección de corriente exterior. En el interior del cuerpo, en los puntos *a* y *b*, hay conectado al apantallamiento un cable de detección, y se mide la tensión en circuito abierto V_{oc} . La impedancia de transferencia de este recinto es una magnitud de valor complejo, definida en términos de componentes espectrales en el dominio de las frecuencias $I(\omega)$ y $V_{oc}(\omega)$, según la fórmula:

$$Z_t(\omega) = \frac{V_{oc}(\omega)}{I(\omega)} \quad (3)$$

donde

$I(\omega)$ es la corriente inyectada, y

$V_{oc}(\omega)$ es la tensión a circuito abierto medida en el conductor de medida.

Este valor de la impedancia de transferencia del apantallamiento varía, en función del emplazamiento de los bornes en el interior del recinto, para la determinación de la tensión en circuito abierto. Para determinar correctamente el apantallamiento provisto por el recinto en su conjunto, es conveniente situar los puntos de medida de tensión en el interior del recinto, cerca de los puntos de inyección de corriente.

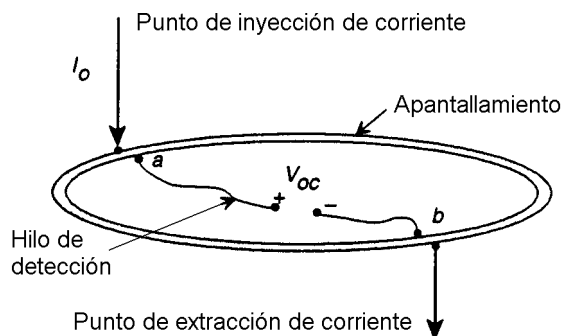


Fig. 7 – Apantallamiento general excitado por una inyección de corriente

La impedancia de transferencia de la pantalla es una función de las propiedades eléctricas del material de apantallamiento (conductividad σ y permeabilidad μ), así como de las dimensiones del apantallamiento y de la naturaleza de las eventuales imperfecciones del recinto tales como rebabas de junta, aberturas, etc. En el caso particular de un apantallamiento esférico delgado de radio a y de espesor Δ que no presenta ninguna penetración de abertura, es posible calcular la eficacia al apantallamiento del campo H , SE_H , en función de la impedancia de transferencia del apantallamiento Z_t y de la resistencia en c.c. del apantallamiento por unidad, R' , gracias a la relación:

$$SE_H = 20 \log_{10} \left| \frac{\left(\frac{a}{\Delta} (\gamma \Delta)^2 \right)}{3 \frac{Z_t}{R'}} \right| \quad (4)$$

donde

- a es el radio de un apantallamiento delgado esférico (en m);
- Δ es el espesor del apantallamiento (en m);
- γ es la constante de propagación en el material de apantallamiento, dado por $\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$;
- σ es la conductividad eléctrica del material del apantallamiento (en S/m);
- μ es la permeabilidad magnética del material del apantallamiento (en F/m);
- Z_t es la impedancia de transferencia del apantallamiento (en Ω /m);
- R' es la resistencia en c.c. por unidad de longitud del apantallamiento (en Ω /m).

4.2 Ensayos de cables y conectores apantallados

Se utilizan frecuentemente cables apantallados para transmitir informaciones entre equipos situados en dos recintos de protección. Se puede definir así dos líneas de transmisión distintas: una línea externa por la que circulan las corrientes y cargas en el exterior del cable, al mismo tiempo que un eventual retorno al plano de tierra, y una línea interna que incluye los conductores en el interior del apantallamiento. Los campos IEMN-GA pueden excitar la línea de transmisión externa y, si el apantallamiento del cable es imperfecto, pueden penetrar a través del apantallamiento algunas corrientes y cargas exteriores y excitar la línea interna, lo que provoca una respuesta parásita del equipo “protegido”. Los conceptos de ensayo relativos a este mecanismo de acoplamiento son examinados en este apartado.

El anexo B resume los principales aspectos de la caracterización de un apantallamiento de cable. Lo que implica dos parámetros: la impedancia de transferencia del apantallamiento y la admitancia de transferencia. Para la mayor parte de los apantallamientos de cable prácticos, la impedancia de transferencia es una función de valor complejo, dependiente de la frecuencia, descrita por una parte real y otra imaginaria, o por una función de amplitud y de fase. La admitancia de transferencia, sin embargo, es ante todo reactiva y se determina efectivamente por una capacidad independiente de la frecuencia.

Mientras que la impedancia de transferencia es únicamente función de las propiedades del apantallamiento, la admitancia de transferencia depende a la vez del apantallamiento y de la configuración de la línea de transmisión externa. Es posible, sin embargo, presentar un parámetro de admitancia de transferencia medido en otra forma: el parámetro de fuga del apantallamiento, independiente del circuito externo. El capítulo 4 trata de los métodos de ensayo relativos a las magnitudes de impedancia y admitancia de transferencia, teniendo en cuenta que esta última magnitud depende de las particularidades del circuito externo, tales como la altura de línea externa, el sector del hilo y la naturaleza del plano de tierra local cerca del cable.

4.2.1 Ensayos del apantallamiento de los cables

Determinación de la impedancia de transferencia

Aunque existen numerosas configuraciones de ensayo diferentes para la medida de la impedancia de transferencia de un apantallamiento de cable, éstas están relacionadas con la configuración básica que se muestra en la figura 8. Una fuente de tensión externa V_s alimenta el extremo $x = 0$ de un apantallamiento de cable de longitud L conectado a tierra (es decir el conductor de referencia) por un cortocircuito en el extremo opuesto del cable. La resistencia Z_s en la fuente limita la circulación de corriente en el exterior del cable.

El conductor interno (coaxial) del cable apantallado es puesto en cortocircuito con el apantallamiento del extremo $x = L$ de la línea, y la tensión a circuito abierto, V_i , se mide en el extremo $x = 0$. Partiendo de las hipótesis:

- que las líneas de transmisión internas y externas son eléctricamente cortas ($L \ll \lambda$), y
- que existe una excitación de campo despreciable en el cable interno debido a los campos que penetran por los extremos de la línea,

se puede obtener una aproximación de la impedancia de transferencia dependiente de la frecuencia del apantallamiento del cable aplicando la ecuación (B.5a) como sigue:

$$Z'_t(\omega) = R'_t(\omega) + j X'_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e L} \approx \frac{Z_s}{L} \frac{V_i}{V_s} \Omega / m \quad (5)$$

donde

Z'_t es la impedancia de transferencia del cable (en Ω/m);

ω es la frecuencia angular (en $2\pi \times \text{Hz}$);

V_i es la tensión interna a circuito abierto entre el conductor interno y la envoltura del cable;

V_s es la tensión que excita el circuito externo del apantallamiento del cable (en V);

L es la longitud del apantallamiento del cable (en m);

Z_s es la impedancia de la fuente de tensión externa (en Ω).

Para aplicar estas fórmulas, es muy importante asegurarse de que la línea es eléctricamente corta. A medida que la frecuencia aumenta, el reparto de la corriente en el cable exterior comienza a presentar valores nulos y valores de cresta periódicos debidos a las reflexiones del extremo cortocircuitado de la línea. Además, se observa la presencia de reflexiones internas que provienen del cortocircuito en el cable interior. Estas oscilaciones son la causa de errores importantes en la medida de la impedancia de transferencia en alta frecuencia.

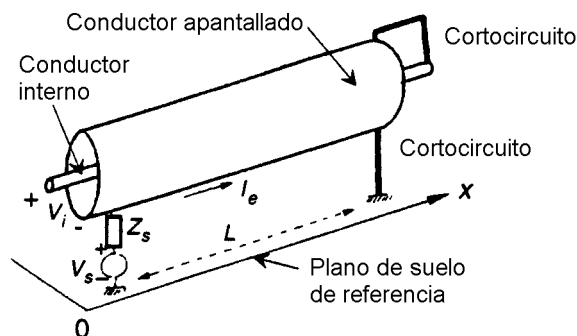


Fig. 8 – Configuración básica para la medida de la impedancia de transferencia

La figura 9 muestra un comportamiento típico en el dominio frecuencial de la impedancia de transferencia, medida para cuatro cables trenzados diferentes que presentan un apantallamiento razonablemente eficaz. En baja frecuencia, Z'_t es principalmente resistiva, con un valor igual a la resistencia en c.c. por unidad de longitud del apantallamiento. A frecuencias más altas, la penetración del campo por las aberturas del trenzado del apantallamiento comienza a afectar la respuesta interna y el comportamiento del apantallamiento se deteriora ligeramente. Paralelamente, este aumento de la impedancia de transferencia de alta frecuencia es una variación de fase eléctrica – magnitud que es primordial conocer si se deben efectuar cálculos precisos con la ayuda de la Z'_t medida.

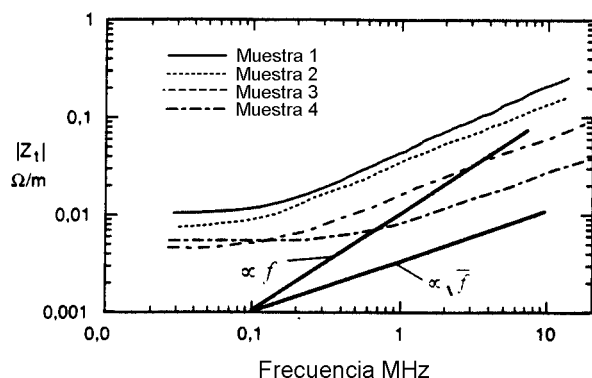


Fig. 9a –Magnitud

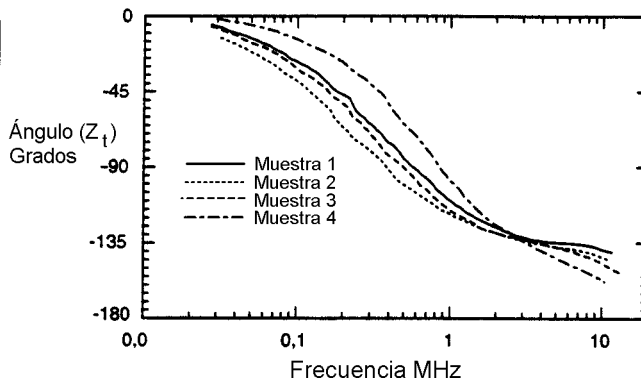


Fig. 9b – Fase

NOTA – En alta frecuencia, las curvas son proporcionales a $\sqrt{f}$ en vez de f , lo que indica que las respuestas no están bien representadas por una inductancia simple.

Fig. 9 – Magnitud de la impedancia de transferencia medida y fase de la impedancia de transferencia por unidad de longitud para cuatro cables trenzados con apantallamiento que presentan propiedades del apantallamiento satisfactorias

Determinación de la admitancia de transferencia

Para la evaluación de la admitancia de transferencia del apantallamiento del cable, se utiliza la configuración de ensayo general presentada en la figura 10. Es similar a la configuración utilizada para la medida de la impedancia de transferencia, pero las terminaciones son diferentes en los extremos del cable. Aplicando la ecuación (B.5b), así como hipótesis idénticas a las utilizadas para la impedancia de transferencia, la admitancia de transferencia del apantallamiento puede ser expresada por la fórmula siguiente:

$$Y'_t \approx -\frac{1}{L} \frac{I_i}{V_s} \approx -j\omega C'_i C'_e S \quad \text{S/m} \quad (6)$$

donde

- Y'_t es la admitancia de transferencia del cable (en S/m);
- I_i es la corriente en el conductor interno (en A);
- V_s es la tensión que excita el circuito interno del apantallamiento del cable (en V);
- L es la longitud del cable (en m);
- ω es la frecuencia angular (en $2\pi \times \text{Hz}$);
- S es el parámetro de fugas del apantallamiento (en m/F);
- C'_i es la capacidad interna por unidad de longitud del cable coaxial (en F/m);
- C'_e es la capacidad externa por unidad de longitud del cable coaxial (en F/m).

Así, una medida de la corriente en el conductor interno I_i que resulta de la fuente de tensión externa V_s da la admitancia de transferencia. Estimando que Y'_t es puramente reactiva, se puede determinar el parámetro de fuga del apantallamiento S , si las capacidades internas y externas por unidad de longitud del cable coaxial C'_i y C'_e son conocidas. El parámetro S es un número simple de valor real, que depende únicamente de las características del cable trenzado. Es un descriptor útil para los apantallamientos de cables.

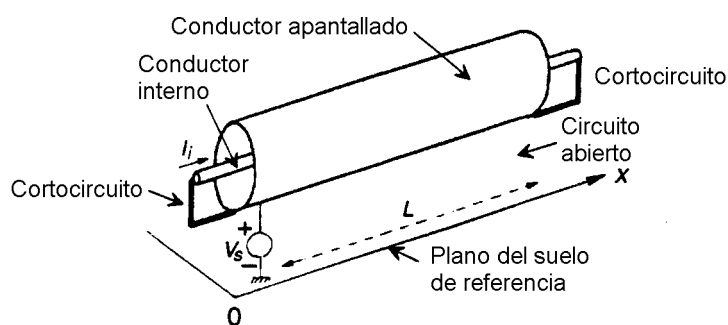


Fig. 10 – Configuración básica para la medida de la admitancia de transferencia

4.2.2 Ensayos de conectores de cables. Los conectores de cables apantallados son a menudo más importantes, para determinar el apantallamiento global del sistema de cables, que el apantallamiento del cable, porque el conector implica una interrupción en el apantallamiento y, como tal, presenta una imperfección en la topología del apantallamiento. Los efectos del conector se pueden representar (para el circuito de transmisión interna o apantallado) utilizando fuentes de tensión y de corriente discretas localizadas en el emplazamiento del conector. La intensidad de estas fuentes está asociada a la corriente y a la tensión exteriores en el conector, multiplicadas por las magnitudes de impedancia de transferencia y de admitancia localizadas, como en el caso de penetraciones en el apantallamiento de cable repartidas.

Al igual que para un apantallamiento trenzado, la impedancia de transferencia localizada de un conector comporta una parte resistiva y una parte reactiva, y la admitancia de transferencia de un conector es principalmente capacitiva. Sin embargo, los conectores son siempre diseñados de manera que la penetración del campo E en el dispositivo sea muy reducida. En consecuencia, los efectos de la admitancia de transferencia del conector son casi siempre más bajos que los efectos que provienen de la impedancia de transferencia. Generalmente, el parámetro de la impedancia de transferencia localizada es el único parámetro requerido.

La configuración de ensayo para los conectores es similar a la aplicable a la impedancia de transferencia de apantallamiento del cable estudiada anteriormente. La figura 11 muestra la configuración del ensayo general relativa a estas medidas. Aquí se aplican requisitos idénticos a los del ensayo del apantallamiento de cable, y la construcción del apantallamiento exterior debe ofrecer un apantallamiento más eficaz que el conector. Esto implica que para esta medida es preferible un apantallamiento sólido a un apantallamiento trenzado.

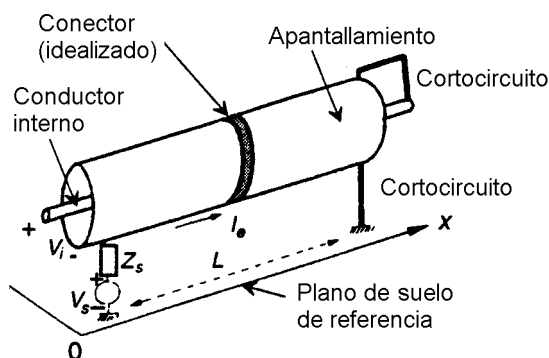


Fig. 11 – Configuración del ensayo para la medida de la impedancia de transferencia de un conector

Para una medida de la tensión a circuito abierto interno V_i , la impedancia de transferencia del conector se determina por la fórmula

$$Z_t(\omega) = R_t(\omega) + j x_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e} \approx Z_s \frac{V_i}{V_s} \quad \Omega \quad (7)$$

donde

V_i y V_s han sido definidos más arriba, y

Z_t es la impedancia de transferencia del conector (en Ω);

Z_s es la impedancia del circuito externo (en Ω).

Es conveniente observar que aunque la longitud del cable L no aparece explícitamente en esta fórmula, es necesario que $L \ll \lambda$. Es conveniente así que L sea lo más corto posible para optimizar la escala de frecuencias válida para las medidas.

4.3 Ensayo de los materiales de apantallamiento

A menudo es posible proteger las imperfecciones en la topología del apantallamiento de un sistema utilizando métodos localizados tales como juntas (en uniones, entre las puertas y sus montantes), placas conductoras o pantallas (que cubran las aberturas), así como otras medidas específicas tales como nidos de abeja y guías de onda por encima del corte. La caracterización de estas medidas de protección es diferente porque su comportamiento depende no solamente de su composición eléctrica individual, sino también de la manera en que los dispositivos se unen a la topología del apantallamiento. Por ejemplo, se puede proteger una grieta muy larga rellenándola de material conductor, lo que puede ser eficaz para asegurar la protección contra corrientes que atraviesan la grieta: el material conductor deja atravesar la corriente por la grieta sin provocar una distorsión significativa y minimiza el campo H en el lado apantallado. Sin embargo, para corrientes paralelas a la grieta, la presencia o ausencia de material de relleno protector no tiene importancia. La corriente no está afectada de manera significativa por la fisura y no es necesario proveer una protección contra esta componente de corriente.

Para describir los ensayos adaptados a estas componentes, se debe caracterizar la propiedad del apantallamiento intrínseca del dispositivo de protección, independientemente de su aplicación en una instalación particular. Eso significa que una componente particular puede ser identificada como un dispositivo de protección “satisfactorio” en una instalación, pero debido a sus particularidades de utilización en otra instalación, puede ser considerada como “insuficiente” en este último caso. La evaluación del comportamiento global de un sistema así como del conjunto de sus dispositivos de protección se realiza por ensayos efectuados en el sistema, lo que excede el marco de esta norma.

4.3.1 Juntas conductoras. La figura 12 presenta varias configuraciones de juntas conductoras que sirven como dispositivos de protección IEMN-GA. El mecanismo de protección básico es el siguiente: la junta forma un trayecto conductor entre dos partes del recinto, lo que impide las fugas de corriente y de carga en el interior (es decir en la región protegida). Cada una de las tres configuraciones de la figura presenta un comportamiento al apantallamiento diferente, debido a las diferencias de geometría de las paredes del recinto que envuelve la junta.

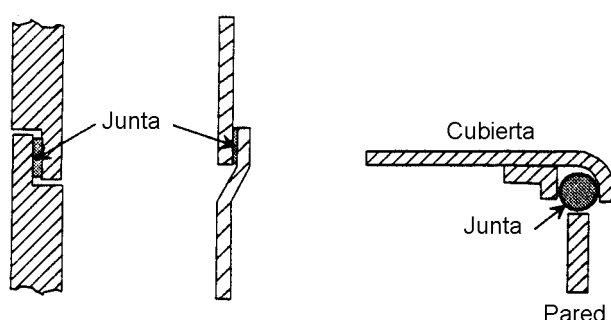


Fig. 12 – Ejemplos de utilización de juntas conductoras como dispositivos de protección IEMN-GA

Es posible realizar un modelo de circuito simple pero general para una junta de estanqueidad, observándose las partes geométricas importantes en la figura 12. La circulación de corriente de un conductor a otro debe pasar a través de la junta, que presentará una resistencia eléctrica a la corriente. Igualmente, las placas de los dos lados de la junta aparecen localmente como una capacidad a través de la cual puede circular una corriente de desplazamiento. Finalmente, los conductores metálicos de las dos paredes forman una inductancia en este circuito.

La figura 13 muestra la representación del circuito equivalente para este tipo de abertura de junta. La resistencia de la junta y la capacidad de la abertura de la junta aparecen en paralelo y esta combinación está en serie con las inductancias que representan los trayectos de la corriente a través de las paredes del recinto. Los valores específicos para L y C dependen de la geometría local de la junta, mientras que el valor de R depende a la vez de la geometría y de las propiedades eléctricas intrínsecas del material de la junta.

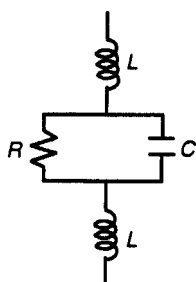


Fig. 13 – Modelo de circuito que representa el comportamiento de una junta conductora de protección IEMN-GA

Estos valores del circuito pueden medirse o calcularse utilizando modelos simples para la forma y la geometría específicas en el estudio de un problema dado. Para caracterizar las propiedades eléctricas del material de la junta, se puede medir sin embargo la resistividad eléctrica del material de la junta. Esta magnitud es independiente del entorno de la junta y puede utilizarse para situar la eficacia de un tipo de junta con relación a otro. Se observa, sin embargo, que estas juntas se realizan generalmente en un material flexible y que sus características dependen de la presión de contacto como en todos los ejemplos de la figura 12. La antigüedad de los materiales de la junta también constituye un factor.

La figura 14 muestra la configuración de la medida relativa a la resistividad. Se trata del método de los cuatro electrodos, especialmente concebido para realizar medidas de materiales de muy baja resistividad. Para esta medida, se coloca un bloque de material de la junta entre dos electrodos de cobre o fabricados en otro material muy conductor. Se une una fuente de tensión continua exterior a los bornes de los dos electrodos exteriores y se hace pasar una corriente a través del electrodo. La caída de tensión que resulta, en la muestra, se mide con la ayuda de un voltímetro de impedancia de entrada elevada de manera que no perturbe la circulación de corriente en la prueba. Una vez medidos estos parámetros, la resistividad media en c.c. del material de la muestra se da por la fórmula:

$$\rho_{DC} = \frac{V_s}{I_o} \frac{A}{L} \Omega \cdot m \quad (8)$$

donde

ρ_{DC} es la resistividad media en c.c. del material de la muestra (en $\Omega \cdot m$);

A es la sección de la muestra del material de la junta (en m^2);

L es el espesor de la muestra (en m);

I_o es la corriente que pasa a través de la muestra (en A);

V_s es la caída de tensión sobre la muestra (en V).

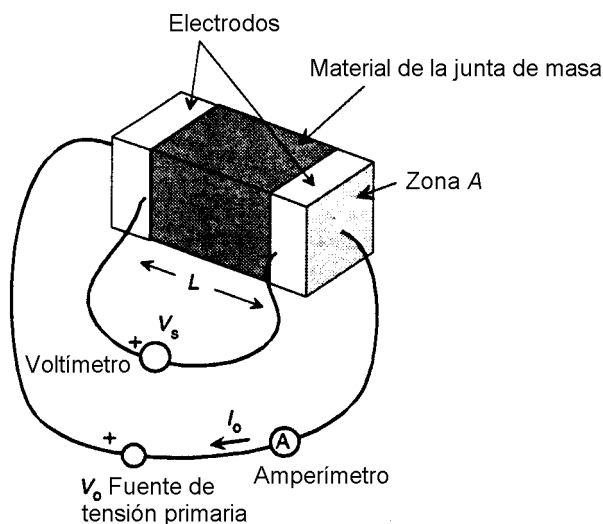


Fig. 14 – Configuración de la medida de la resistividad de una muestra

Se pueden realizar medidas similares de frecuencia más elevada pudiendo medirse una impedancia de la junta que dependa de la frecuencia. Sin embargo, esta magnitud es de aplicación limitada, porque sus variaciones de frecuencia pueden ser fácilmente confundidas con las del material de montaje de la junta y de su entorno. En consecuencia, la resistividad en c.c. representa el parámetro más frecuentemente utilizado para caracterizar el material de la junta.

4.3.2 Placas y pantallas conductoras. Se utilizan a menudo placas o pantallas conductoras realizadas en material conductor para limitar la penetración IEMN-GA a través de las aberturas del apantallamiento. Entre estos dispositivos de protección, se distinguen los elementos siguientes:

- malla de tela metálica;
- revestimientos de pintura conductores;
- revestimientos metalizados en vacío;
- soplete/arco eléctrico;
- hojas metálicas que bordean las cajas del equipo;
- materiales metálicos de relleno añadidos a los recintos de plástico.

Como en el caso del material de una junta, es posible caracterizar estos dispositivos de protección bien midiendo su comportamiento al apantallamiento en una configuración topológica específica, o midiendo algunas propiedades eléctricas intrínsecas del material de apantallamiento. Esta última medida puede no dar una indicación precisa sobre el funcionamiento del dispositivo de protección en una instalación arbitraria, pero constituye una técnica útil para hacer la distinción entre un material de protección y otro de manera coherente. En los apartados 4.3.2.1 y 4.3.2.2 se estudian dos conceptos de ensayo relativos a los dispositivos de protección de abertura conductores: uno mide la resistividad del material conductor, el otro mide la eficacia al apantallamiento del material utilizado para el apantallamiento en condiciones controladas.

4.3.2.1 Medida de la resistividad del material. La resistividad del material que engloba el elemento de protección de una abertura es un parámetro que puede utilizarse para caracterizar su apantallamiento. Como en el caso de la junta conductora descrito en el apartado 4.3.1, la resistividad de una placa conductora puede determinarse utilizando la configuración de ensayo presentada en la figura 14. Otro procedimiento consiste en utilizar una técnica de medida en la que la resistividad en c.c. se evalúa por medio de sondas situadas en la superficie de la muestra como se indica en la figura 15.

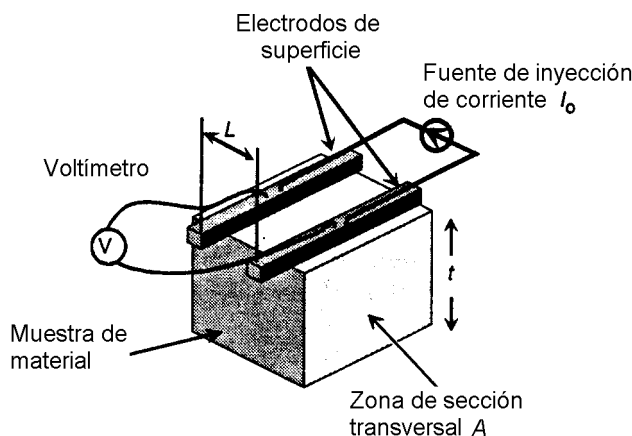


Fig. 15 – Concepto de ensayo para la medida de la resistividad por medio de sondas de superficie

En este ensayo, se conecta una fuente de corriente continua constante I_0 a dos electrodos separados por una distancia L y que presenten un buen contacto eléctrico con un bloque de material conductor. En respuesta a esta corriente, es inducida una tensión V_s en los bornes de los dos electrodos. Esta tensión puede medirse por un voltímetro de impedancia elevada y la resistividad se da de nuevo por la ecuación (8). Se utiliza la misma fórmula en este caso porque se supone que el bloque es un buen conductor y que la corriente tiende a circular uniformemente a través de la sección A del material de un electrodo al otro.

Es importante observar que este procedimiento se aplica únicamente en baja frecuencia, cuando el espesor de la capa superficial del material en cuestión es muy grande en comparación con el espesor de la muestra. Si la frecuencia de la fuente de la corriente aumenta, el espesor de la capa superficial (dado por $\delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu)}$) disminuye y, en un punto determinado, comienza a ser comparable al espesor del material sometido a ensayo. En este punto, es preciso tomar en cuenta las particularidades del reparto de la corriente en la sección del conductor, como se indica en el anexo E.

Según el anexo E, es posible calcular la impedancia de superficie (que asocia el campo E tangencial en el exterior de la barrera protectora a la corriente de excitación en superficie) y la impedancia de transferencia (que asocia el campo E tangencial en el interior de la barrera protectora a la corriente de excitación en superficie) puede ser calculada (véase la ecuación E.14 y la ecuación E.17) una vez que se conoce la resistividad del material. Así, la medida en c.c. de la resistividad puede utilizarse para determinar las propiedades del apantallamiento del material para frecuencias más elevadas.

4.3.2.2 Medidas de la eficacia al apantallamiento. Un procedimiento más directo para caracterizar el comportamiento al apantallamiento de una malla o de una pantalla conductora consiste en medir su eficacia al apantallamiento en condiciones normalizadas. Se sabe que en el campo próximo (o para bajas frecuencias), los campos eléctricos y magnéticos penetran en un conductor de manera diferente. En consecuencia, un apantallamiento deber ser caracterizado en general por dos parámetros de eficacia al apantallamiento diferentes. Para un apantallamiento en campo remoto, en que el campo incidente en el apantallamiento es una onda plana, los dos valores de eficacia al apantallamiento se igualan, y este valor único puede utilizarse para caracterizar la protección.

La figura 16 muestra el concepto de medida de la eficacia al apantallamiento de la onda plana de pantallas y placas. La figura 16a presenta la situación ideal, en la que una onda plana es incidente con relación a una pantalla infinita. El apantallamiento de esta pantalla puede caracterizarse por la ecuación siguiente (véase la ecuación (2)):

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

donde

A_{out} representa la componente principal del campo incidente E^{inc} (o H^{inc}) en un punto de observación suprimiendo la pantalla conductora;

A_{in} representa la misma componente para el campo transmitido a través de la pantalla: E^{tr} (o H^{tr}).

La eficacia al apantallamiento que resulta depende del ángulo ψ constituido por el campo incidente perpendicular a la placa. Normalmente, se elige el ángulo $\psi = 0^\circ$ para definir las propiedades del apantallamiento en el plano infinito.

En el marco de las mediciones reales, la configuración ideal de la figura 16a no puede ser aplicada, debido a que la fuente que produce el campo incidente no es de tamaño infinito y no está situada a una distancia infinita con relación a la pantalla. Además, la pantalla no es infinitamente grande. Esto implica que las medidas realizadas utilizando la configuración de la figura 16b pueden ser diferentes de las obtenidas a partir de un tratamiento teórico con una geometría de plano infinito, debido a los efectos siguientes:

- naturaleza de la onda no plana de los campos incidentes que provienen de la fuente;
- diagrama de radiación de la fuente;
- difracción de los bordes de la pantalla.

Para minimizar esta dificultad, se impone a menudo el mantenimiento de las condiciones siguientes en la configuración de la medida:

- tamaño de la pantalla $a \gg \lambda$;
- puntos de observación y de la fuente d_o y $d_s < a$;
- $= 0^\circ$ (incidencia normal).

A partir de estas hipótesis, se obtiene una aproximación de la eficacia al apantallamiento de onda plana de la pantalla realizando dos medidas de las componentes del campo primario seleccionadas en el punto de observación. La primera medida se efectúa sin la placa y se designa por $E_{\text{descubierto}}^m$ (o $H_{\text{descubierto}}^m$). La segunda medida representa la misma componente del campo pero en presencia de la placa frente al radiador; se designa por E_{cubierto}^m (o H_{cubierto}^m). La eficacia al apantallamiento, para esta configuración, se evalúa por la fórmula:

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{|E_{\text{descubierto}}^m|}{|E_{\text{cubierto}}^m|} \right) \text{ dB} \quad (10)$$

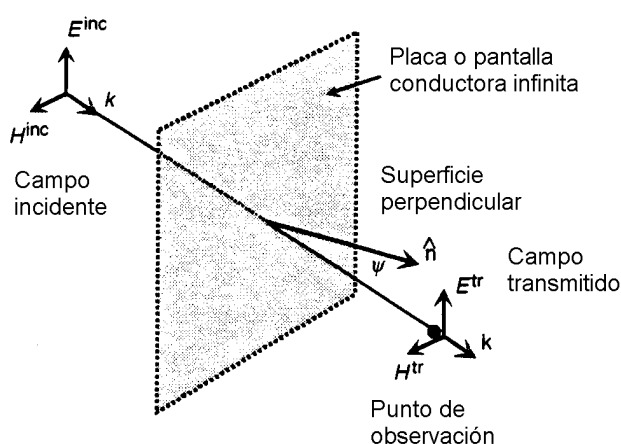


Fig. 16a – Idealización

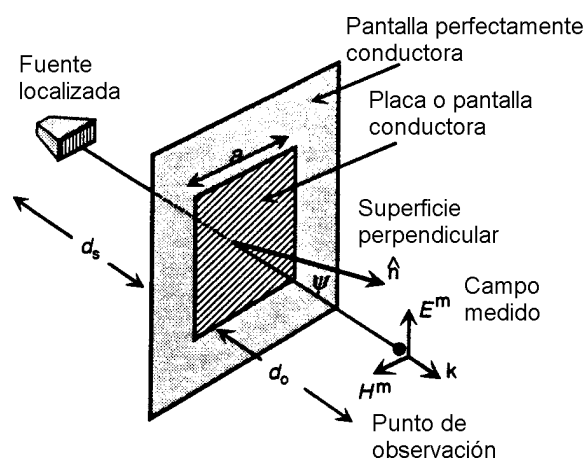
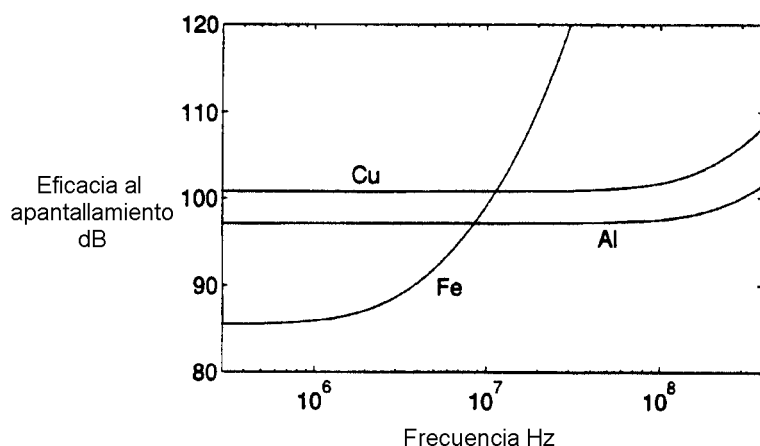


Fig. 16b – Realización experimental

Fig. 16 – Conceptos relativos a la medida de la eficacia al apantallamiento de placas conductoras y de pantallas

A título de ejemplo que muestra la eficacia al apantallamiento de onda plana de una placa de material diferente, la figura 17 presenta datos calculados para placas de cobre, aluminio y de hierro, cada una poseyendo un espesor de 0,01 mm. Son previsibles resultados similares para materiales que presentan otros valores de conductividad.



Parámetros del material:

Cu: $\sigma = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

Al: $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

Fe: $\sigma = 10 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 400$

Fig. 17 – Ejemplo de la eficacia al apantallamiento con onda plana calculada para una placa de 0,01 mm de espesor de material diferente, en función de la frecuencia

4.3.3 Guías de onda de corte y nidos de abeja. Otro tipo de medida de protección IEMN-GA consiste en utilizar una o varias guías de onda de corte o estructuras de nido de abeja en una pared conductora, como muestra la figura 18. Este método permite una circulación fácil del aire o de otro material no conductor entre el interior y el exterior de un recinto, suministrando una gran atenuación del entorno de campo EM. El concepto de ensayo relativo a este método de protección de penetración es idéntico al utilizado para la malla conductora o la pantalla de la figura 16.

Como antes, las guías de onda o los nidos de abeja deben estar situados en una pared muy conductora, y las medidas de eficacia al apantallamiento deben ser realizadas con y sin pared, como se describe en el apartado 4.3.2.

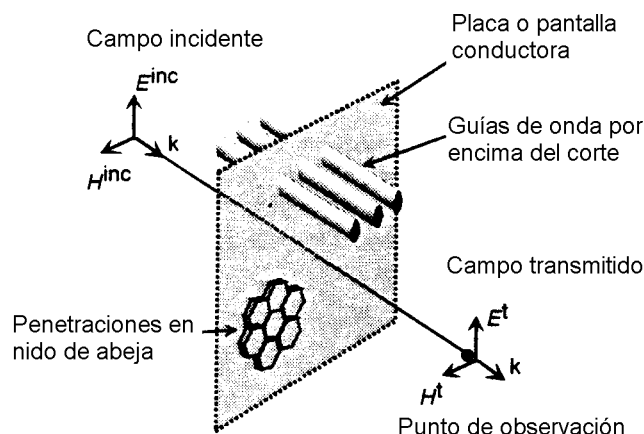


Fig. 18 – Guías de onda de corte y nido de abeja utilizados como elementos de protección

4.4 Resumen de conceptos del ensayo

Un cierto número de conceptos del ensayo diferentes ha sido presentado en este apartado tratando diferentes aspectos de los sistemas apantallados. La tabla 1 resume los conceptos de ensayo recomendados para los diferentes componentes del sistema. Para seleccionar los diferentes ensayos, es importante observar que no existe un ensayo “ideal” para un sistema. Cada ensayo tiene sus puntos fuertes y sus puntos débiles. Cada ensayo presenta incertidumbres y errores de resultado, por ejemplo debido a la interacción entre el objeto de ensayo y el equipo de medida, de la variabilidad del objeto de ensayo, de la uniformidad de los campos, de los efectos no lineales y errores de medida. Para seleccionar un ensayo, es conveniente que el usuario considere atentamente los requisitos siguientes para el ensayo propuesto:

- ¿por qué se realiza el ensayo?
- ¿el ensayo es realmente necesario?
- ¿qué resultado se espera del ensayo?
- ¿cuál es la precisión requerida en los resultados del ensayo?

Las respuestas a estas cuestiones servirán para situar los procedimientos de ensayo en una mejor perspectiva; permitirán al usuario seleccionar el ensayo adecuado y minimizar el coste de los ensayos.

Tabla 1
Procedimiento de ensayo recomendado para diferentes objetos sometidos a ensayo

Objeto de ensayo	Procedimiento de ensayo						
	Iluminación transitoria a plena escala	Iluminación no modulada a plena escala	Simulación de célula TEM	Excitación de impulso de simulador reducida	Excitación local de placas colectoras	Ensayo de inyección de corriente	Dispositivos de ensayo específicos
Edificios	1	2	–		3	–	–
Cámaras apantalladas	1	2	–		3	3	–
Envoltorios de equipos	–	–	1	1	2	3	–
Aberturas	–	–	–	–	1	2	3
Juntas y uniones	–	–	–	–	2	1	3
Caracterización de cables y conductos	–	–	3	3	–	2	1
NOTA 1 – Concepto(s) de ensayo recomendado (s). NOTA 2 – Concepto de ensayo de respaldo. NOTA 3 – Ensayo de último recurso.							

5 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO IEMN-GA

Debido a la diversidad de los métodos de simulación de efectos IEMN-GA en un sistema, puede ser utilizada una gran variedad de instalaciones, de configuraciones de equipos y de procedimientos para realizar ensayos a los dispositivos de protección. Este capítulo sintetiza los procedimientos de ensayo para cada uno de los conceptos de ensayo presentados en el capítulo 4.

5.1 Ensayos de campo electromagnético

Según se indica en el diagrama secuencial de interacción del anexo A, los ensayos pueden realizarse generando los campos de excitación E y H en una interfaz de ensayo en el sistema, o simulando los efectos de la interacción de estos campos con las barreras del sistema inyectando una corriente y una carga apropiada en las superficies. En este apartado se discuten los métodos de simulación de la excitación de campo del sistema sometido a ensayo.

5.1.1 Ensayos de campo de impulso

5.1.1.1 Iluminación del sistema a escala real. Los ensayos de impulso a escala real están particularmente adaptados para una evaluación fiable del sistema. Pudiendo dar una cantidad de información mucho más importante concerniente a la respuesta del sistema frente al IEMN-GA, son utilizados raramente para evaluar únicamente el comportamiento del apantallamiento de un simple elemento de protección del sistema, tal como la barrera de apantallamiento exterior.

Los campos IEMN-GA incidentes son producidos generalmente por un generador MARX de descarga capacitiva que almacena energía en un período de tiempo amplio (del orden de algunos minutos) en baterías de condensadores, y después descarga la energía durante un periodo muy corto (de nanosegundos) en una estructura radiante físicamente importante (dimensiones tipos del orden de 50 m a 100 m). La estructura radiante puede comportarse como una guía de onda para conducir los campos hacia el objeto sometido a ensayo, o como una antena radiante libremente en el espacio. En los dos casos, el objeto sometido a ensayo es iluminado por un campo IEMN-GA transitorio respondiendo de manera apropiada. Generalmente, es conveniente que la altura del objeto sometido a ensayo no sea superior de 1/3 a 1/2 de la separación entre las dos placas del volumen de trabajo del simulador, de manera que minimice la interacción de las placas y permita una mejor aproximación a las condiciones en espacio libre. La figura 19 muestra varios tipos de simuladores a escala real.

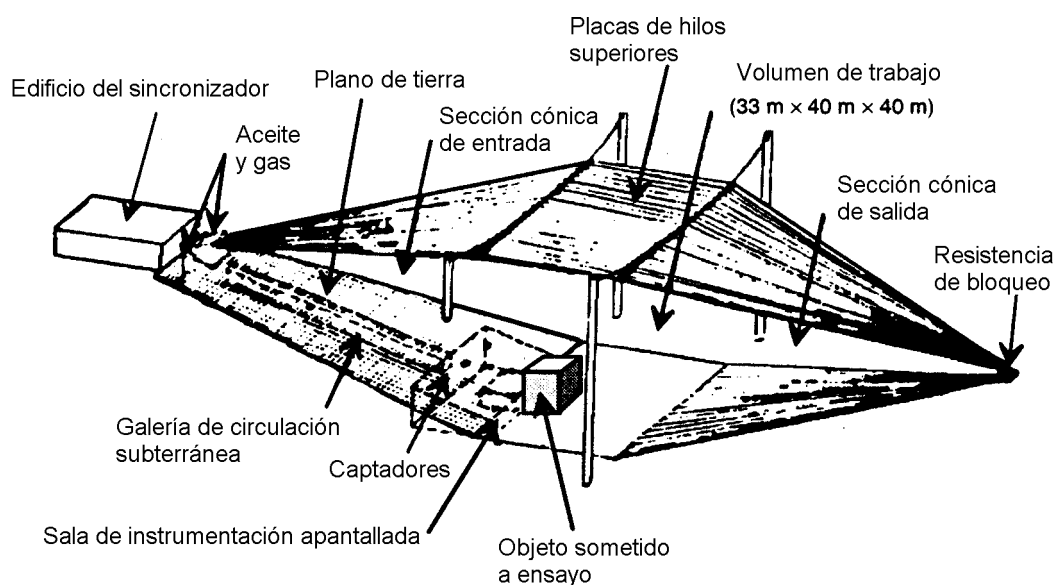


Fig. 19a – Simulador de polarización vertical en campo confinado

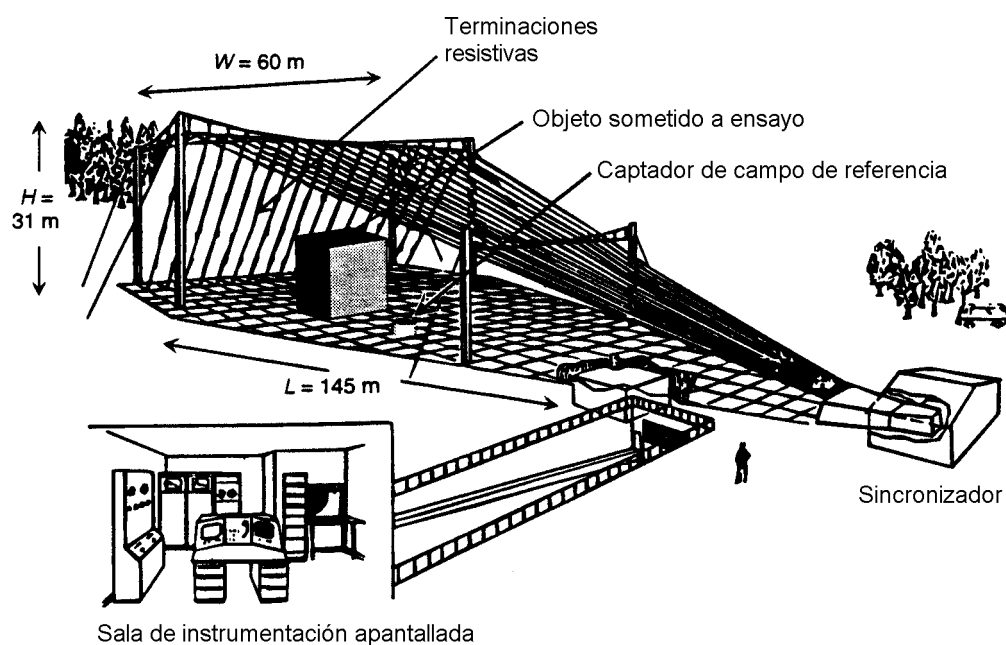


Fig. 19b – Otra configuración del simulador de polarización vertical de campo confinado

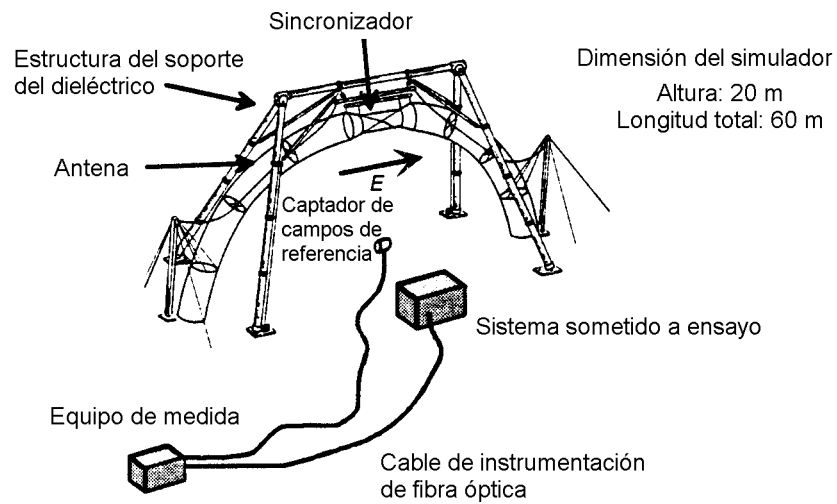


Fig. 19c – Simulador radiante de polarización horizontal

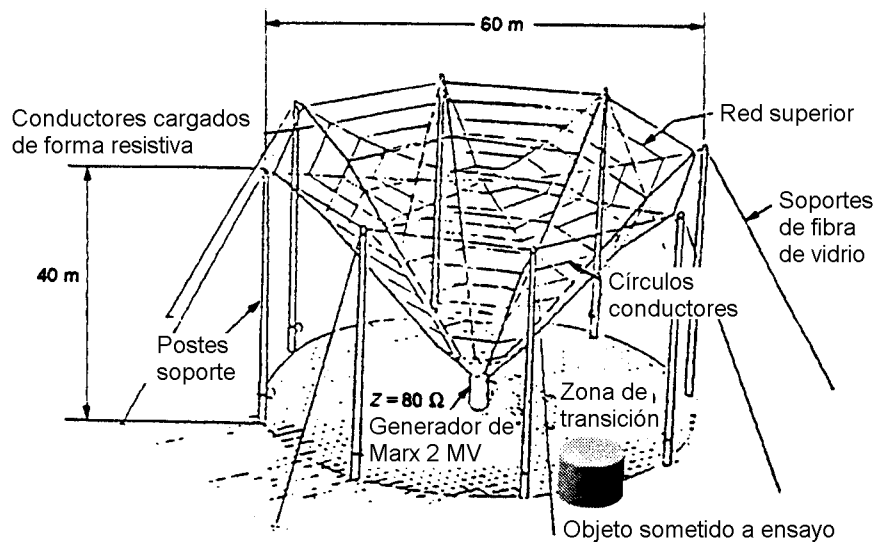


Figura 19d – Simulador radiante de polarización vertical

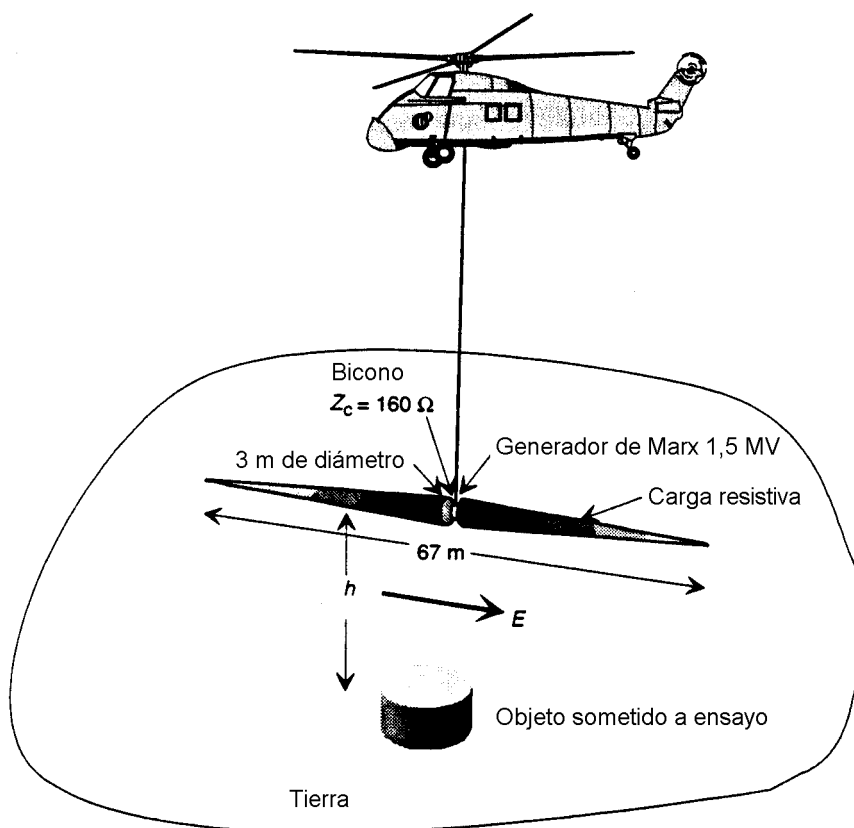


Figura 19e – Simulador radiante de polarización horizontal aerotransportado

Fig. 19 – Ejemplos de simuladores IEMN-GA radiantes de impulsos a escala completa

Disposición de ensayo

La figura 19b muestra la disposición de ensayo típica para este tipo de ensayo IEMN-GA. El objeto sometido a ensayo está situado en el “volumen de trabajo” del simulador. Un captador de campo de referencia está situado en el volumen de trabajo en un punto que no está afectado de manera significativa por los campos difundidos que provienen del objeto sometido a ensayo. (El fabricante de la instalación da informaciones generalmente sobre el emplazamiento optimizado del volumen de trabajo y del captador de referencia).

El objeto sometido a ensayo se instrumenta en función de los objetivos del ensayo particular. Esto implica situar detectores de campo E o H , sondas de corriente o sondas de tensión en puntos preseleccionados en el sistema, y conectarlos a la unidad de adquisición de datos por medio de cables de fibras ópticas no conductores. En función del objetivo del ensayo, la configuración del objeto sometido a ensayo puede implicar un acoplamiento a la red de alimentación y a otros equipos susceptibles de afectar los resultados de ensayo.

El control del sincronizador y del sistema de adquisición de datos se realiza en la sala de máquinas situada en o cerca de la estructura del simulador. Es conveniente que el diseño no perturbe los campos del simulador; usándose generalmente un apantallamiento de manera que no deteriore el registro de datos y el equipo de proceso de datos.

Equipo de ensayo

Además para la instalación del simulador básico necesaria para simular el entorno IEMN-GA, son necesarios los siguientes tipos de equipos para este tipo de ensayo:

- captadores de referencia de campo E y H para la medida de campos del simulador de excitación transitoria;
- captadores de campo E y H para la medida de campos en el sistema sometido a ensayo;
- sondas de corriente y de tensión para la medida de respuestas internas por cables;
- equipo de calibración para todas las sondas;
- emisores, receptores de fibras ópticas y cable para extracción de datos;
- digitalizadores transitorios para cada canal de datos (tiempos de subida 1 ns);
- unidad de adquisición de datos y memoria de gran capacidad;
- unidad de proceso de datos y capacidad de trazado gráfico.

El anexo C da precisiones sobre estos elementos del equipo.

Procedimiento del ensayo

Se trata de un ensayo transitorio: el sincronizador es encendido y la respuesta transitoria del sistema se mide con el equipo digitalizador de forma de onda. Si este ensayo se utiliza para caracterizar la primera capa del apantallamiento del sistema, como se define en el anexo A y en el capítulo 4, es necesario convertir las respuestas transitorias medidas en el dominio frecuencial para evaluar la función de transferencia del sistema $T(\omega)$ o la eficacia del apantallamiento, SE . La figura 20 resume las etapas de este procedimiento de ensayo. Es conveniente observar que después del cálculo de la tasa de respuesta $R(\omega)/F(\omega)$, pueden ser necesarias correcciones de la función de transferencia. Esta situación aparece cuando el diseño del simulador es tal que el espectro $F(\omega)$ presenta un valor muy reducido para algunas frecuencias. Para estas frecuencias, la respuesta $R(\omega)$ es dominada por el ruido y la tasa de respuesta puede presentar una pseudo-resonancia importante.

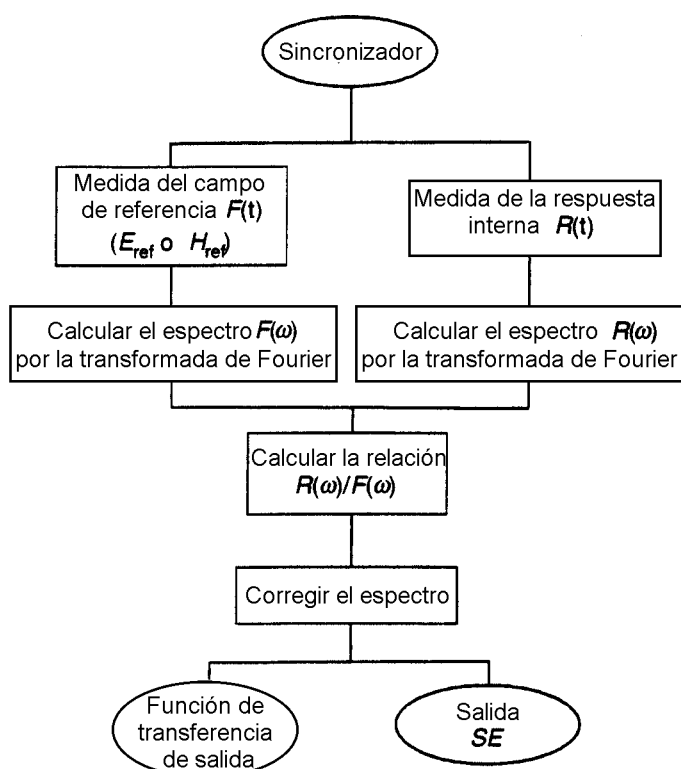


Fig. 20 – Procedimiento de ensayo para el ensayo de impulso

Es importante resaltar que el IEMN-GA pueda aparecer según diferentes ángulos de incidencia con relación al objeto sometido a ensayo. En consecuencia, es conveniente realizar el procedimiento de ensayo de la figura 20 para diferentes polarizaciones del campo de excitación (si el simulador lo permite) y según diferentes orientaciones del objeto sometido a ensayo.

5.1.1.2 Simuladores pequeños IEMN-GA. Versiones reducidas de simuladores de campo IEMN-GA transitorio a escala real, estudiadas en el apartado 5.1.1.1, se encuentran a menudo en los laboratorios universitarios, los organismos de investigación y las empresas de fabricación. Estos simuladores son similares a los equipos más grandes, excepto el hecho de que no es posible ensayar sistemas enteros debido al pequeño volumen de trabajo. Generalmente, estos simuladores se utilizan para ensayos de cajas individuales, pequeños armarios o cables.

El pequeño tamaño de estos simuladores permite obtener tiempos de subida de campo más rápidos que en los simuladores más grandes a escala real. Sin embargo, las tensiones máximas del sincronizador y, en consecuencia, las intensidades máximas de campo E y H están limitadas por las características de corte dieléctricas del aire cerca de la sección de alimentación.

El equipo de ensayo, la disposición y los procedimientos de ensayo para estos simuladores de pequeño tamaño son idénticos a los indicados en el apartado 5.1.1.1.

5.1.2 Ensayos de campo de ondas no moduladas. Como alternativa a los ensayos de impulso, es posible realizar medidas en el dominio frecuencial. Estos ensayos son mucho menos costosos que los ensayos transitorios, debido al coste relativamente bajo del equipo utilizado. Además, dado que es posible permanecer en cada frecuencia durante un periodo largo, este método de ensayo puede utilizarse para sistemas muy apantallados en los que los ensayos de impulso son ineficaces debido a la baja intensidad de la señal.

5.1.2.1 Iluminación global con radiadores activos. La figura 21 presenta una configuración de ensayo típica para un ensayo en régimen continuo. Esta figura muestra la instalación sometida a ensayo, la antena en régimen continuo, el recinto del equipo de medida y las conexiones de cable asociadas. El equipo de medida está situado en el suelo próximo a la instalación. Debido a que se trata de un ensayo de iluminación de campo, es importante situar la antena que irradia en régimen continuo a, al menos, varias longitudes de onda de la instalación, de manera que el campo iluminador aparezca como una onda plana.

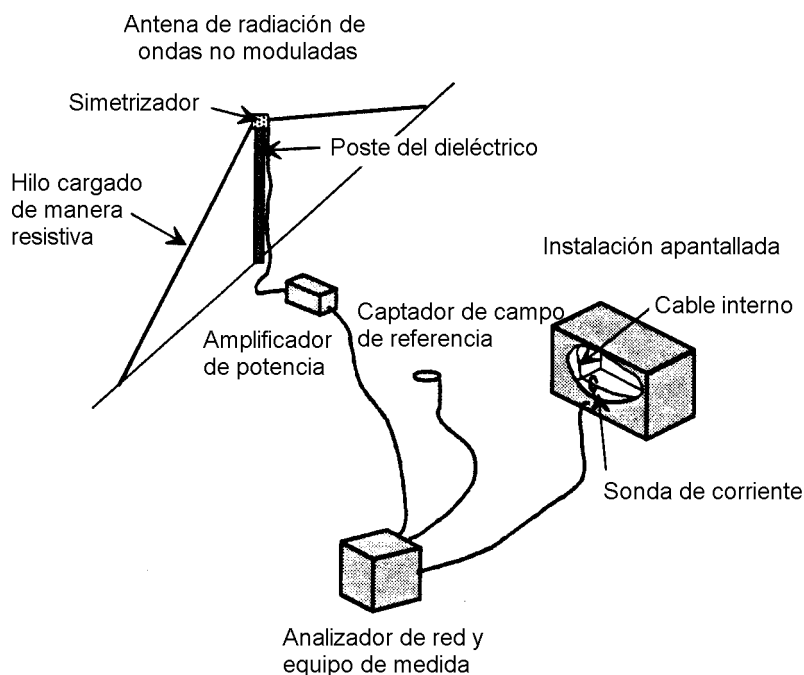
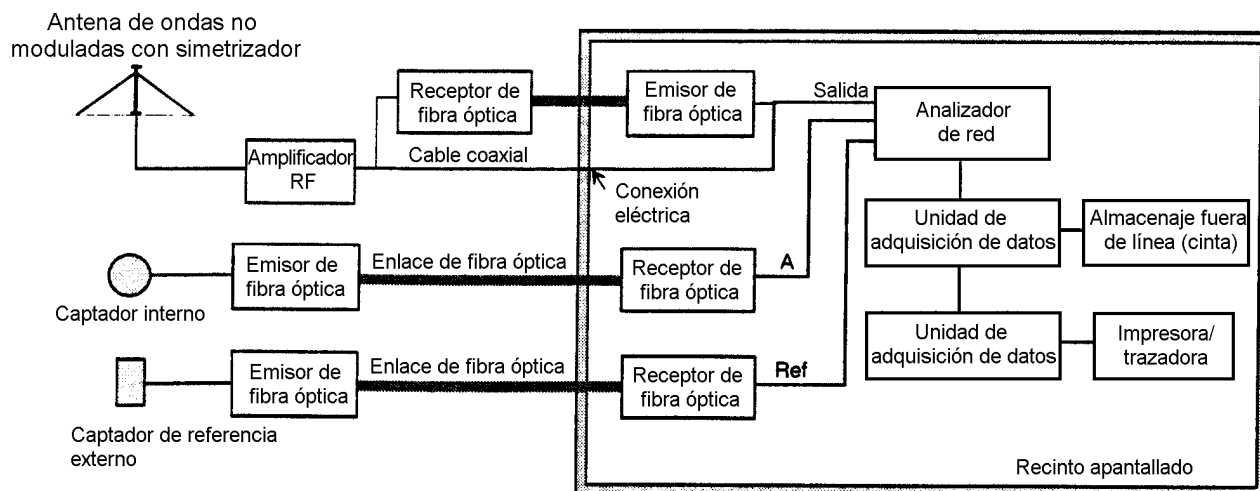


Fig. 21 – Configuración típica de una instalación de ensayo de ondas no moduladas

Disposición de ensayo

La figura 22 muestra las particularidades de la disposición para la medida de ondas no moduladas. En el centro del sistema se encuentra un analizador de red, que posee la capacidad de medir dos respuestas simultáneamente: un canal de referencia y un canal A, que representa la respuesta deseada del sistema. El analizador de red se controla por un ordenador personal (PC) por medio de interfaces de instrumentación normalizadas, por ejemplo el IEEE 488 o CEI 60625. Es conveniente colocar ambas piezas en una zona apantallada, muy lejos del campo radiado producido por el campo incidente de la antena de ondas no moduladas.

Un ordenador de análisis de datos se une al ordenador de medida. Esta función de análisis puede ser integrada en el ordenador de medida o puede ser sustituido por un ordenador distinto, unido directamente al ordenador de medida por un bus RS-232 o IEEE, o indirectamente transfiriendo los datos adquiridos, almacenados en un soporte de registro portátil.



Es conveniente que las sondas de campo externo/corriente para los canales de referencia y de medida no quebranten la topología del apantallamiento alrededor del equipo de medida. Una manera común de asegurar un apantallamiento es utilizar enlaces de fibra óptica para estos dos canales, lo que requiere una conversión de señales eléctricas de las sondas en señales ópticas por medio de un emisor de fibra óptica, la transmisión de señales ópticas por un cable óptico y la reconstitución de la señal eléctrica en el recinto del equipo por un receptor de fibra óptica.

El analizador de red da una señal de salida de radiofrecuencia, barrida en la escala de frecuencias concernida. Esta señal se transmite por un cable coaxial de 50 Ω a un amplificador de potencia de radiofrecuencia, que aumenta el nivel de señal y después la transmite a una antena especialmente diseñada para radiar la señal.

Es conveniente que el apantallamiento del cable coaxial esté eléctricamente unido al recinto del equipo apantallado en el punto de penetración, para aislar las zonas externas e internas, como se indica en la figura 22. Además pueden situarse atenuadores de perlas de ferrita en intervalos de alrededor de 30 cm a lo largo del cable para contribuir a minimizar el acoplamiento del campo exterior parásito y la propagación a lo largo del cable. Un método alternativo a la utilización de una conexión cableada entre el analizador de red y el amplificador es la utilización de un enlace de fibra óptica, como se muestra en la figura 22.

Equipo de ensayo

Para este ensayo, son necesarios los siguientes tipos de equipos:

- antena radiante de ondas no moduladas;
- amplificador de potencia;
- analizador de red;
- sondas de referencias y de respuesta;
- sistema de transmisión de fibra óptica;
- unidad de adquisición de datos y memoria de gran capacidad;
- unidad de proceso de datos y capacidad de trazado gráfico.

El anexo D da informaciones pertinentes sobre este equipo.

Procedimiento de ensayo

Para asegurar que el ensayo de ondas no moduladas se realiza correctamente, es conveniente realizar una serie de etapas de montaje del equipo de medida y de realización de medidas. Como se indica en la figura 23, estos procedimientos conllevan actividades directamente relacionadas con la realización del ensayo (designadas por “actividad de ensayo de ondas no moduladas”). El otro análisis incluye tareas (denominadas “actividad de proceso de datos en régimen continuo”) que sirven para asegurar que la configuración de ensayo es correcta y que los datos de ensayo son de calidad suficiente para el análisis de datos y para realizar finalmente el análisis deseado sobre los datos medidos en ondas no moduladas.

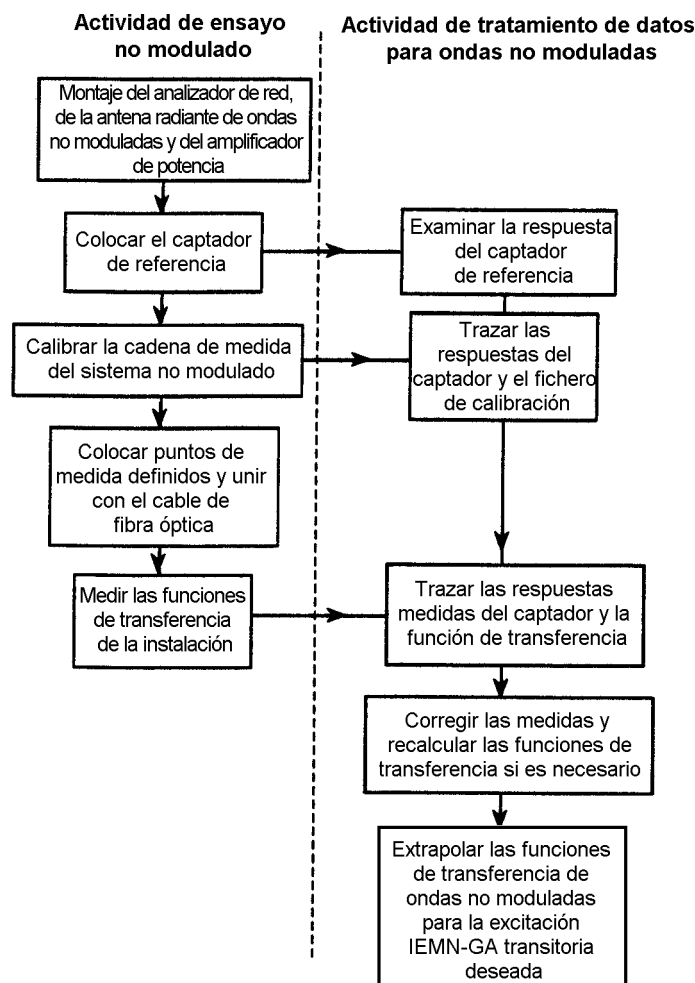


Fig. 23 – Procedimiento de ensayo y de análisis para la realización de un ensayo de ondas no moduladas

La primera etapa, en la realización de un ensayo de ondas no moduladas, consiste en decidir el emplazamiento de la antena de ensayo. En el ancho de la antena, el campo EM radiado presenta una polarización principalmente horizontal. Así, esta antena de ondas no moduladas es adecuada para simular el efecto de un campo IEMN-GA incidente, de polarización horizontal. El anexo D da indicaciones sobre el emplazamiento de la antena.

Una vez que se fija el emplazamiento de la antena, se selecciona la sonda de referencia y se realizan las calibraciones de las sondas de respuesta y de referencia. La etapa siguiente, en el procedimiento de ensayo, consiste en situar los puntos de medida deseados (presumiblemente en la instalación o en el objeto sometido a ensayo), conectar las sondas calibradas anteriormente y encaminar los cables de fibra óptica del transductor próximo al analizador de red hasta el emplazamiento de medida. Para ello, es conveniente vigilar no alterar la topología del apantallamiento del objeto de ensayo. Por ejemplo, incluso si los cables de fibra óptica no transmiten señales eléctricas, si atraviesan una puerta en dirección a un recinto apantallado, esta puerta debe permanecer abierta para dejar pasar el cable. Dicha puerta abierta representa una violación del apantallamiento; es conveniente por tanto evitarlo.

Conectando el equipo apropiado en puntos de medida internos, se puede seguir el proceso de medida, realizando una medida simultánea de las sondas de referencia y de respuesta. Generalmente, la función de transferencia de calibración $T_0(\omega)$ se aplica a estas respuestas durante el proceso de medida y se obtienen tres ficheros de datos para cada una de las medidas:

- el espectro de la sonda de referencia;
- el espectro de la sonda de respuesta;
- la función de transferencia corregida.

Como se indica en la figura 23, es conveniente, paralelamente a las medidas, realizar el análisis de los datos con un trazado gráfico de estos ficheros de datos y un examen preliminar para evaluar si los resultados obtenidos son razonables. Si aparecen puntos negativos en los datos de las respuestas de la sonda, es conveniente verificarlos y calcular una nueva función de transferencia.

Con el resultado de las medidas de las funciones de transferencia, la tarea restante consiste en procesar los datos medidos, como se indica en la figura 23. Generalmente, para un ensayo de ondas no moduladas, se tratará de convertir el espectro de la función de transferencia medida (y corregida) en una respuesta IEMN-GA transitoria del sistema. Para describir este proceso de extrapolación, se puede utilizar el diagrama de la figura 24. Además, si se desea únicamente obtener el valor de la eficacia al apantallamiento del recinto, esta magnitud puede determinarse a partir de la función de transferencia, como se ha indicado anteriormente en el capítulo 4.

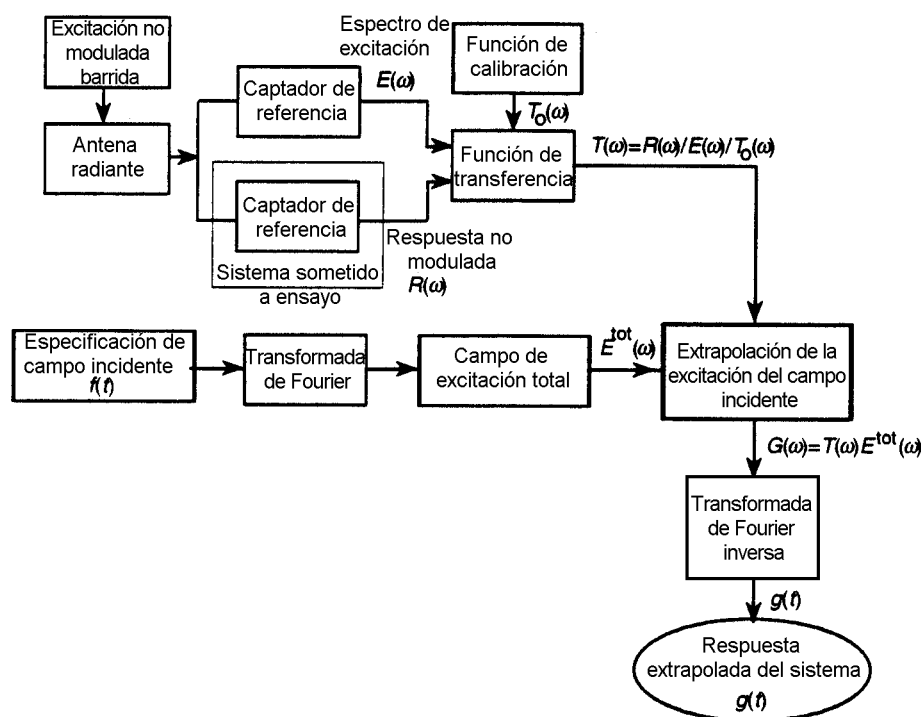


Fig. 24 – Diagrama del análisis para la extrapolación de un espectro de ondas no moduladas medido como respuesta IEMN-GA

5.1.2.2 Iluminación global por fuentes no moduladas existentes. Para sustituir los ensayos de ondas no moduladas o los de impulsos de un sistema que utiliza un emisor activo y una antena, se puede utilizar un procedimiento pasivo, en el que las señales EM ambientales alrededor del sistema dan la excitación. Estas señales son generadas por emisores estacionarios y móviles, pudiendo, por consiguiente, constatar una gran variabilidad de resultados.

La figura 25 muestra un espectro EM hipotético que puede ser utilizado para excitar un objeto de ensayo de esta manera

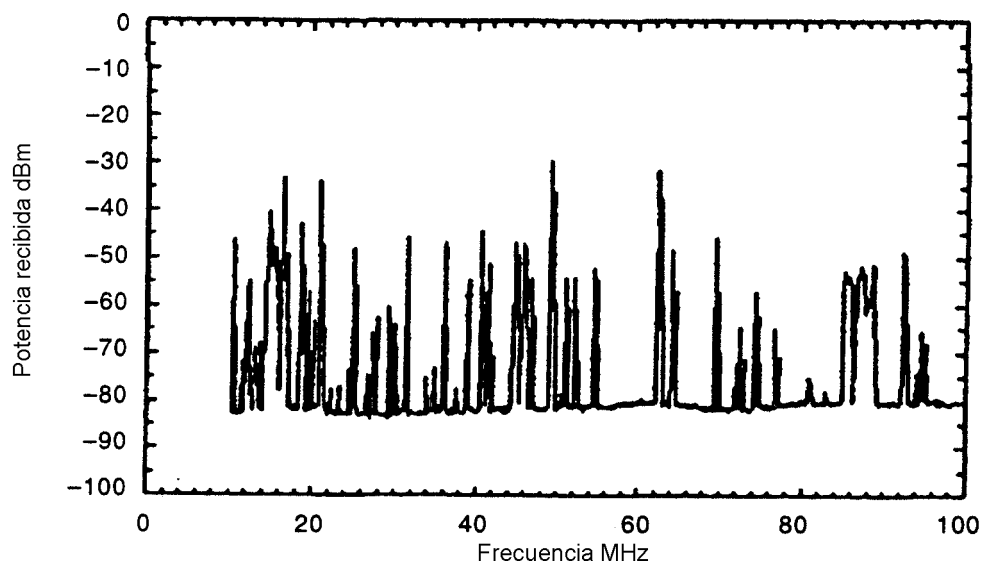


Fig. 25 – Entorno electromagnético ambiente hipotético utilizado para la excitación global

Se obtienen varias ventajas al realizar los ensayos de esta manera:

- el entorno EM incidente es una onda plana, que excita simultáneamente el conjunto del sistema sometido a ensayo;
- no hay interferencias con equipos próximos;
- no es necesario ningún permiso reglamentario (PTT, FCC, etc.);
- el ensayo es poco costoso debido al coste reducido del equipo;
- no existe problema de equipamiento.

Sin embargo este método presenta los inconvenientes siguientes:

- no hay control de las características del entorno EM (amplitud, polarización, etc.);
- la relación señal/ruido es baja, lo que lo hace difícil de medir en las regiones muy apantalladas;
- no hay disponible ninguna información de fase ni ninguna información espectral completa, lo que hace imposible el cálculo de las respuestas transitorias correctas;
- el equipo interno debe ser desconectado porque se dan niveles bajos de señal por las fuentes externas.

Disposición de ensayo

El montaje del ensayo, en este caso, es similar al de la figura 21, a excepción de la antena de emisión y del amplificador de potencia, que no están instalados. Además, el analizador de red puede ser sustituido por un analizador de espectro, dado que las señales de referencia externas y las señales de respuesta internas no son medidas.

Equipo de ensayo

Para este concepto de ensayo, son necesarios los tipos de equipos siguientes:

- analizador de espectro capaz de efectuar medidas simultáneamente en dos canales;
- sondas de referencia y de respuesta;
- sistema de transmisión de fibra óptica;
- unidad de adquisición de datos y memoria de gran capacidad;
- unidad de proceso de datos y capacidad de trazado gráfico.

Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo se muestra en la figura 26. Es importante realizar, antes del ensayo, una evaluación del entorno ambiental EM para determinar si se adapta a la realización del ensayo. Si no existen suficientes emisiones de campo EM en el ancho de banda deseada, es necesario realizar un ensayo de impulso o de ondas no moduladas.

Uno de los aspectos más importantes de este tipo de ensayo consiste en asegurar que las medidas de las respuestas internas y de referencia se realizan simultáneamente. Debido a los cambios de entorno ambiental EM en función del tiempo, no existe ninguna garantía de que los campos incidentes sean constantes. Si las medidas de estas respuestas no son simultáneas, se corre el riesgo de que variaciones de intensidad de la señal recibida den valores erróneos del apantallamiento del sistema.

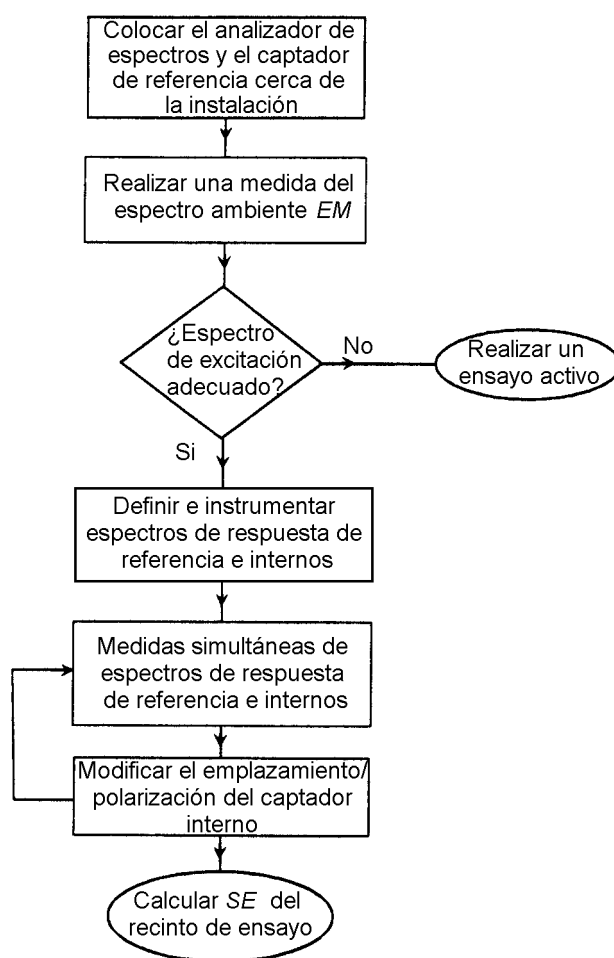


Fig. 26 – Procedimiento de ensayo para el ensayo de excitación EM ambiente

5.1.2.3 Celda TEM de doble extremidad. La celda TEM de doble extremidad permite producir también un entorno de campo EM uniforme y controlado para la excitación global de un recinto apantallado. Este dispositivo es semejante a una línea de transmisión coaxial, con una fuente en un extremo y una carga adaptada en el otro. La fuente produce un campo EM (TEM) transversal en la línea coaxial que presenta una interacción con el objeto sometido a ensayo situado en el interior de la región coaxial y que sufre finalmente una absorción por la impedancia terminal.

La figura 27 muestra una celda TEM de doble extremidad típica, con una vista en sección que muestra el conductor central del sistema coaxial y el objeto sometido a ensayo. Si el objeto sometido a ensayo no es demasiado grande con relación a la sección transversal de la celda, el campo de excitación puede ser considerado como aproximadamente uniforme. Debido a que el modo TEM en esta guía de onda no presenta ningún corte de baja frecuencia, los ensayos pueden ser realizados en muy baja frecuencia – muy por debajo de las frecuencias autorizadas para una estructura de antena radiante. Sin embargo, a medida que la frecuencia de funcionamiento aumenta, pueden aparecer otros modos y resonancias de tipo cavidad; limitan efectivamente la instalación de alta frecuencia del dispositivo. Los proveedores de celdas individuales TEM dan informaciones sobre los anchos de banda utilizables de su equipo, que varían en general de varias decenas de kilohertzios a 100 MHz para celdas que presentan un volumen de trabajo del orden de 1 m de altura.

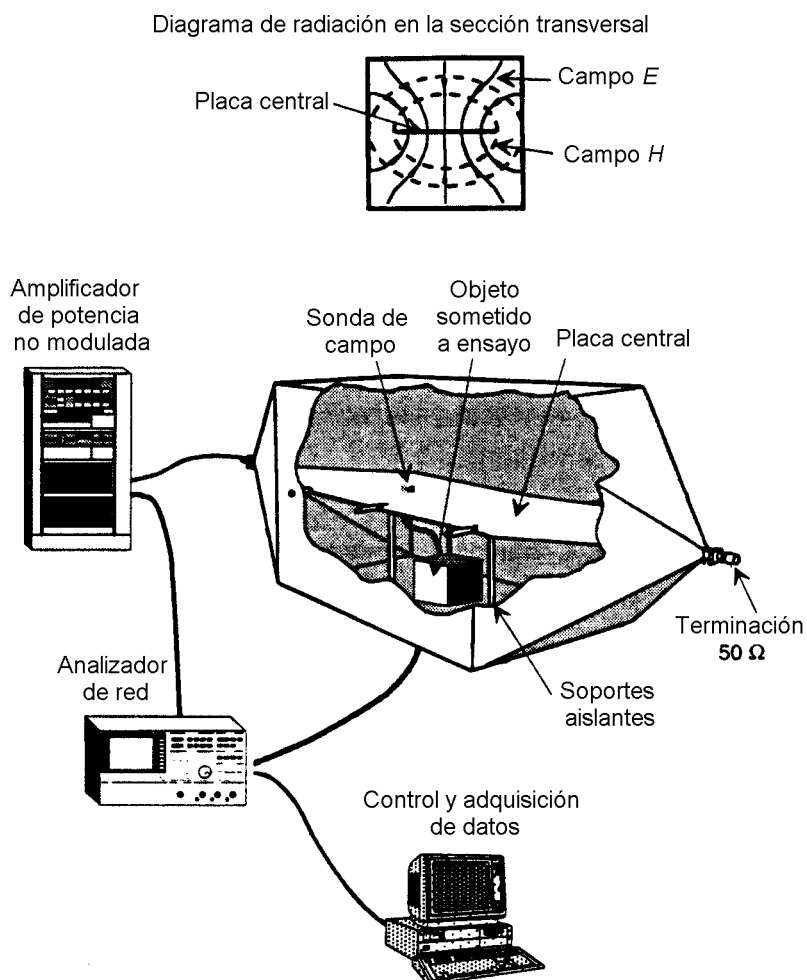


Fig. 27 – Celda TEM de doble extremidad para el ensayo de iluminación de campo en recintos reducidos

Disposición de ensayo

La disposición de ensayo para la celda TEM es similar al utilizado para los ensayos de iluminación de campo de ondas no moduladas estudiadas en el apartado 5.1.2.1, a excepción del recinto apantallado alrededor en el caso de ondas no moduladas, que no es necesario debido a la presencia del apantallamiento alrededor de la celda TEM. La figura 28 muestra las conexiones del equipo para este ensayo.

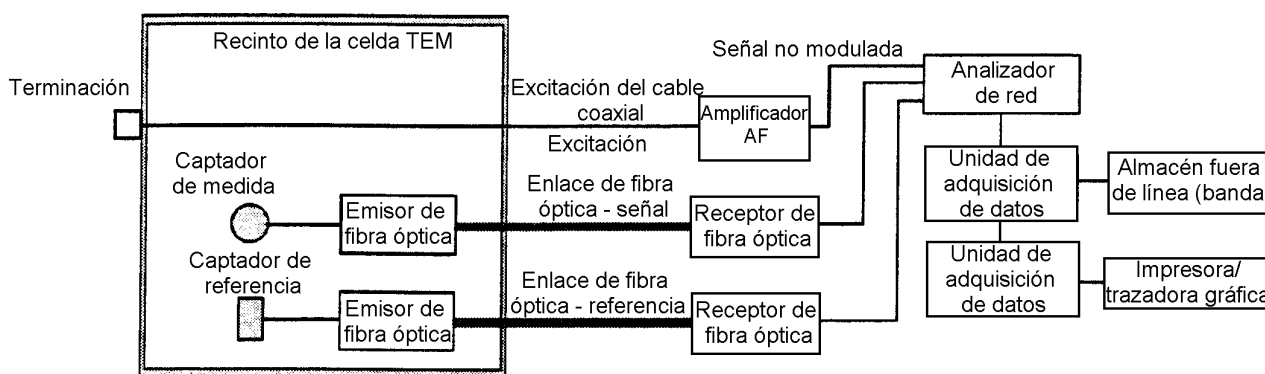


Fig. 28 – Disposición de ensayo para la iluminación del campo en la celda TEM

Equipo de ensayo

Para este concepto de ensayo, son necesarios los tipos de equipos siguientes:

- celda TEM con resistencia de terminación adaptada;
- amplificador de potencia de ondas no moduladas, analizador de red o analizador de espectro capaz de efectuar medidas simultáneamente en dos canales;
- sondas de referencia y de respuesta;
- sistema de transmisión de fibras ópticas;
- unidad de adquisición de datos y memoria de gran capacidad;
- unidad de proceso de datos y capacidad de trazado gráfico.

Procedimiento de ensayo

Los ensayos en la celda TEM se desarrollan de la misma manera que para los otros ensayos descritos anteriormente: el analizador de red controla el amplificador de potencia y hace el barrido entre una baja y alta frecuencia determinada por los límites superiores de funcionamiento de la celda TEM. Se realizan simultáneamente medidas de las sondas de campo de referencia y de la respuesta del sistema interno por el analizador de red, y la función de transferencia entre estas dos magnitudes se desarrolla directamente en el analizador de espectro. Si se desea obtener una respuesta transitoria extrapolada a partir de estas medidas, se utiliza entonces el procedimiento de análisis mostrado en la figura 24. Sin embargo, si se desea obtener la eficacia al apantallamiento del recinto, no se realiza este tipo de análisis detallado: sólo la respuesta SE se forma a partir de la función de transferencia, como lo describe la ecuación (2).

5.1.2.4 Celda TEM de extremidad única. Para sustituir la celda TEM de doble extremidad descrita anteriormente, es posible utilizar la celda TEM cónica como la presentada en la figura 29. En esta cámara de ensayo, el conductor interno es decalado verticalmente para crear un volumen de ensayo más grande, y presenta una sección transversal coaxial rectangular gradualmente abierta, cerrándose en una carga adaptada.

La terminación final comprende una combinación de un elemento de circuito de baja frecuencia con una carga de $50\ \Omega$ y una pared que absorbe alta frecuencia que permite absorber la onda de propagación incidente como en las cámaras anecoicas. El cruzamiento entre estos dos regímenes depende del tamaño de la celda y de la longitud del absorbente. La adaptación de la impedancia de banda ancha dada por la terminación trata de suprimir los modos superiores. El material absorbente reduce de manera considerable el valor Q de la capacidad de la cámara, reduciendo así los efectos de resonancia de los modos de capacidad. Es conveniente que la variabilidad de campo en el interior de la cámara vacía sea inferior a $\pm 4\text{ dB}$, para frecuencias que varían de c.c. a 1 GHz.

Las celdas han sido denominadas celdas “GTEM” para señalar su capacidad en gigaherzios. Las celdas han sido construidas con alturas de cámara de ensayo que varían de 0,5 m a más de 3 m, para ser utilizadas para ensayos de circuitos impresos con un equipo del tamaño de una caja. Están en estudio, celdas más grandes, capaces de servir a ensayos completos de un armario o un vehículo.

Los ensayos, en estas celdas TEM modificadas, son idénticos a los descritos en el apartado anterior, pero la escala de frecuencias superiores es más alta. En consecuencia, se utiliza un equipo similar (pero quizás con un ancho de banda más grande), y se utiliza el mismo procedimiento de ensayo que el presentado en el apartado 5.1.2.3. Véase igualmente la Norma CEI 61000-4-20 para obtener informaciones de los ensayos que utilizan celdas TEM.

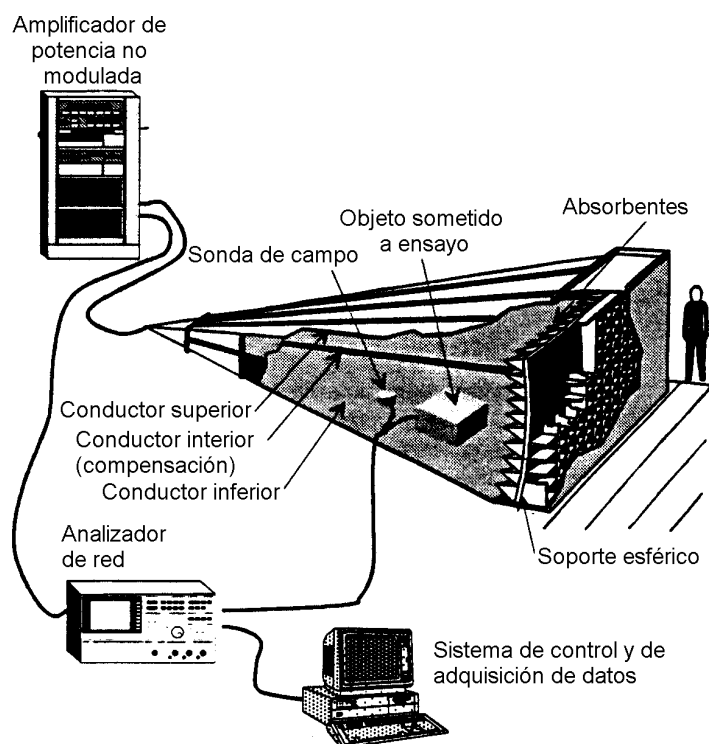


Fig. 29 – Ilustración de la celda TEM de extremidad única y equipo asociado

5.1.2.5 Ensayos en recintos débilmente apantallados. En algunos casos, un recinto apantallado puede no ser considerado como un apantallamiento satisfactorio. Este es el caso cuando existen numerosas aberturas en el apantallamiento o cuando el material del apantallamiento no es muy conductor. En este tipo de casos, los ensayos de apantallamiento pueden realizarse iluminando una barrera local con la ayuda de una pequeña antena que permite una iluminación de campo EM próximo al elemento de penetración de la barrera. Estos ensayos son menos fiables que los ensayos de iluminación del conjunto del sistema porque los valores de eficacia al apantallamiento dependen del emplazamiento de la sonda de medida interna, así como del emplazamiento de la antena exterior. Así, puede obtenerse una escala de valores SE para un sistema particular. Por ejemplo, como muestra el capítulo 4, pueden ser aplicados ensayos de iluminación local a la medida del apantallamiento global del recinto (como en la figura 5), en la medida localizada del apantallamiento dado por una malla o una protección de panel conductor sobre las aberturas (como en la figura 16), o en los ensayos localizados de otros métodos de protección PdE (como se sugiere en la figura 18).

Debido a la naturaleza localizada de la fuente de excitación, esta medida da información únicamente sobre el apantallamiento de la región donde el campo EM de excitación es más fuerte. En el caso de medidas diseñadas para probar el apantallamiento global de una gran instalación, los ensayos son realizados en varios emplazamientos de fuente/receptor diferentes, lo que permite caracterizar de manera adecuada el apantallamiento en su conjunto. Para medidas PdE localizadas, sin embargo, los ensayos se realizan cerca del punto de penetración.

Como se indica en el capítulo 4, el comportamiento del apantallamiento de un recinto de baja frecuencia es diferente para los campos *E* y *H*. Como los campos *E* son relativamente fáciles de apantallar para estas frecuencias, sólo son necesarios ensayos de eficacia del campo magnético. A medida que la frecuencia aumenta, la eficacia al apantallamiento viene a ser idéntica para *E* y *H*, y es equivalente a la eficacia del apantallamiento de onda plana. Esta magnitud también se mide por el método de ensayo.

La barrera electromagnética debe permanecer intacta durante la realización de las medidas de la eficacia al apantallamiento y dado que la utilización de un equipo eléctricamente ruidoso ha de ser restringida, pueden ser afectadas la actividad de construcción u operaciones poco habituales (modificación de instalación, mantenimiento). Los niveles de señales radiadas son bajos y no presentan ningún peligro para el equipo, pero pueden ser necesarias regulaciones de frecuencia para evitar las auto-interferencias y las interferencias con instalaciones próximas. Durante este ensayo se aplican las precauciones de seguridad eléctrica normales.

Disposición de ensayo

Para la realización de estos ensayos de eficacia al apantallamiento del campo magnético de baja frecuencia o de la onda plana en el recinto, se utilizan las disposiciones de ensayo básicas mostradas en las figuras 30 y 31²⁾. Las medidas de las respuestas de la antena de recepción son realizadas con o sin apantallamiento; la relación entre estas respuestas da una indicación sobre la eficacia del apantallamiento de la barrera local según la fórmula siguiente:

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{V_c}{V_m} \right| \text{ dB} \quad (11)$$

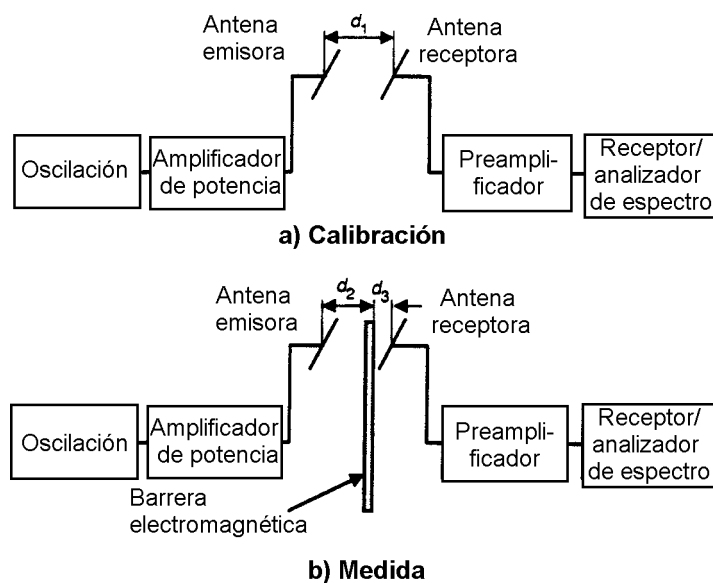
donde

V_c es la respuesta del receptor medido en condiciones de calibración (sin barrera);

V_m es la respuesta medida con la barrera.

NOTA — Se recomienda aplicar este procedimiento a los recintos suficientemente grandes para acomodar el equipo de ensayo dentro.

2) En la MIL-STD 188-125-1, 17 julio 1998 figuran informaciones complementarias.

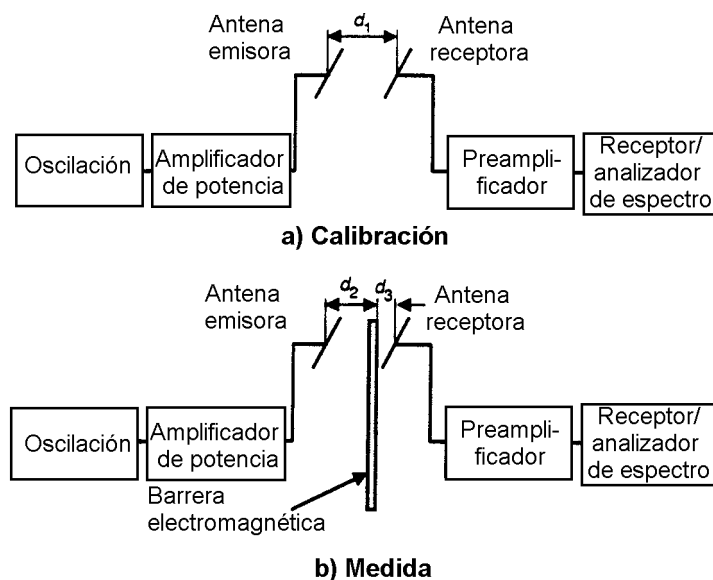
**Dimensiones**

d_1 la mayor posible, respetando las tensiones del rango dinámico, 5 m como mínimo

d_2 d_1 a 30 cm

d_3 5 cm a 60 cm para el barrido de la antena de recepción

Fig. 30 – Disposición de ensayo para las medidas de la eficacia al apantallamiento de onda plana

**Dimensiones**

d_1 diámetro del bucle

d_2 la mayor posible, respetando las tensiones del rango dinámico, $2 \times d_1$ ó 1,255 m al menos, eligiendo el valor mayor

d_3 d_2 a 30 cm

d_4 5 cm a 60 cm para el barrido de la antena de recepción

Fig. 31 – Disposición de ensayo para las medidas de la eficacia al apantallamiento del campo H

Las antenas localizadas se utilizan para iluminar diversas partes del recinto apantallado. Para las medidas al apantallamiento de onda plana y del campo H , el conjunto de la superficie (incluido el suelo, cuando son accesibles los dos lados de la pantalla) de la barrera electromagnética debe dividirse en áreas planas numeradas que no excedan de $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$, según muestra la figura 32. Los círculos de esta figura en el centro de cada área indican los diversos emplazamientos de la antena de emisión para estas medidas.

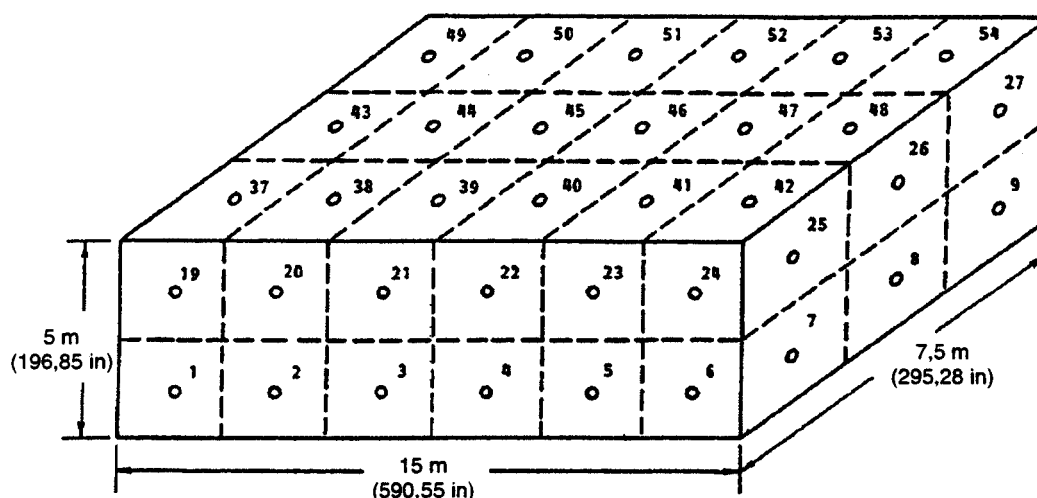


Fig. 32 – Ejemplo de emplazamientos de la antena para los ensayos de antena localizada en un hipotético recinto o instalación apantallada

Equipo de ensayo

El equipo de ensayo requerido para las medidas de la eficacia al apantallamiento comprende los siguientes elementos:

- osciladores de señales RF;
- amplificador(es) de potencia RF con la salida de potencia requerida para la escala dinámica;
- preamplificador(es);
- receptores/analizador(es) de espectro;
- antena(s);
- diversos cables y atenuadores – según los requisitos.

Procedimiento de ensayo

Medidas de la eficacia al apantallamiento de onda plana

Para cada zona de ensayo de onda plana definida en la figura 32, deben realizarse seis medidas de eficacia al apantallamiento barriendo la posición de la antena del receptor. Estas medidas deben realizarse en tres frecuencias distintas en la banda IEMN-GA, para cada una de las dos polarizaciones de antena de emisión, como sigue:

a) Frecuencias

Tres frecuencias en la escala de 50 MHz a 200 MHz, espaciadas de manera aproximadamente igual en este rango de frecuencias.

b) *Polarización de la antena de emisión*

Dipolo (o abertura de antena) paralelo a la superficie de la zona de ensayo según dos orientaciones, a 90° una de otra y paralelo a las principales soldaduras del apantallamiento.

La calibración de la onda plana para cada frecuencia y polarización de antena de emisión debe realizarse conforme a la figura 30a. Las antenas dipolos de emisión y de recepción deben orientarse paralelamente una con relación a otra (o los planos de antenas de abertura radiante paralelos uno con otro). La distancia entre las antenas debe ser lo mayor posible, respetando las tensiones de la escala dinámica, pero debe ser al menos igual a 5 m. La posición de la antena de recepción debe ser modificada en ± 30 cm con relación a su emplazamiento nominal, para asegurar que no está situada en el punto mínimo del diagrama de radiación. El equipo de ensayo debe ser elegido para dar una escala dinámica superior en al menos 20 dB del requisito de eficacia al apantallamiento a la frecuencia de ensayo. Durante la calibración, ningún equipo u otro reflector electromagnético (con excepción del suelo) debe estar a una distancia inferior a tres veces la separación de la antena. Las antenas deben estar situadas al menos a 2 m por encima del suelo. La intensidad de la señal recibida para cada frecuencia y polarización de la antena de emisión debe ser registrada como señal de calibración (V_c) para esta configuración.

Después de la calibración, las medidas de la eficacia al apantallamiento de onda plana para cada zona de ensayo y en cada frecuencia y polarización de la antena de emisión requeridas deben realizarse como se indica en la figura 30b. Equipo, antenas, cable y posiciones idénticas (a excepción de las posiciones de los atenuadores) deben utilizarse para la calibración y las medidas.

La antena de emisión debe estar situada normalmente en el exterior de la barrera electromagnética y debe estar centrada en la zona de ensayo. El eje del dipolo de emisión (o el plano, en el caso de una antena de abertura radiante) debe ser paralelo a la superficie de la zona de ensayo y paralelo a una de las dos direcciones principales de la soldadura. La distancia que separa la antena de emisión de la superficie de la zona de ensayo debe ser inferior en 30 cm a la separación para la cual se efectúa la calibración.

Para realizar las medidas de barrido, la antena receptora debe ser barrida en toda la zona de ensayo a distancias de alrededor de 5 cm a 60 cm de la superficie de la zona de ensayo y debe rotar orientándola hasta obtener una señal de recepción máxima. La intensidad máxima de la señal recibida debe ser registrada como señal de barrido de frecuencia V_m (en V/m) para esta zona de ensayo, esta frecuencia y esta polarización de la antena de emisión³⁾. Los valores de eficacia al apantallamiento se calculan utilizando la ecuación (11).

Medidas de la eficacia al apantallamiento del campo magnético

Para cada zona de ensayo del campo magnético de 2,5 m x 2,5 m mostrada en la figura 32, deben realizarse seis medidas de la eficacia al apantallamiento en tres frecuencias para cada una de las dos polarizaciones de la antena de emisión, como sigue:

a) *Frecuencias*

Una frecuencia en el rango de 15 kHz a 30 kHz, una frecuencia en el rango de 300 kHz a 500 kHz y una frecuencia en el rango de 1 MHz a 20 MHz.

b) *Polarización de la antena*

Plano de la antena de cuadro perpendicular a la superficie del área de ensayo según dos orientaciones, a 90° una de otra y paralela a las principales soldaduras del apantallamiento.

3) Cuando la zona de ensayo comprende un punto de entrada de abertura o de conducción que requiere un volumen de protección específico dentro de la barrera electromagnética, es conveniente también que la antena de recepción sea barrida en toda la superficie exterior de la barrera de protección especial, a distancias de alrededor de 5 cm a 60 cm de la superficie de la barrera, y que sea pivotada. Los criterios de aceptación/rechazo para estas indicaciones son idénticos a los criterios de aceptación/rechazo aplicados a otras medidas de eficacia al apantallamiento.

Para estas medidas, la calibración del campo magnético en cada frecuencia y cada polarización de la antena de emisión debe realizarse conforme a la figura 31a. Los bucles de las antenas de emisión y de recepción deben estar en el mismo plano. La distancia entre las antenas debe ser la mayor posible, respetando las tensiones de la escala dinámica, pero debe corresponder al menos a dos diámetros de bucle, y al menos a 1,25 m. La posición de la antena de recepción debe variarse en ± 30 cm con relación a su emplazamiento nominal, para asegurar que no está situada en el punto mínimo del diagrama de radiación. El equipo de ensayo debe ser elegido para dar una escala dinámica de al menos 20 dB por encima del requisito de la eficacia al apantallamiento a la frecuencia de ensayo. Durante la calibración, ningún equipo u otro reflector electromagnético (con excepción del suelo) debe estar a una distancia inferior a tres veces la separación de la antena. Las antenas deben estar situadas al menos 2 m por encima del suelo. La intensidad de la señal recibida para cada frecuencia y polarización de la antena de emisión debe ser registrada como la señal de calibración V_c (en voltios por metro) para esta configuración.

Después de la calibración, las medidas de la eficacia al apantallamiento del campo magnético para cada zona de ensayo y a cada frecuencia y polarización de la antena de emisión requeridas, deben realizarse como se indica en la figura 31b. Equipo, antenas, cable y posiciones idénticas (con excepción de las posiciones de los atenuadores) deben utilizarse para la calibración y medidas.

La antena de emisión debe estar situada normalmente en el exterior de la barrera electromagnética y debe estar centrada en la zona de ensayo. El plano de la antena de cuadro emisora debe estar perpendicular a la superficie de la zona de ensayo y paralelo a una de las dos principales direcciones de la soldadura. La distancia que separa la antena de emisión de la superficie de la zona de ensayo debe ser inferior en 30 cm a la separación para la cual se efectúa la calibración.

La antena de recepción debe estar situada normalmente en el interior de la barrera. Para realizar las medidas de barrido, la antena receptora debe ser barrida por toda la zona de ensayo a distancias de alrededor de 5 cm a 60 cm con relación a la superficie de la zona de ensayo y debe rotar desde la polarización vertical a la horizontal hasta obtener una señal de recepción máxima. La intensidad máxima de la señal recibida debe ser registrada como señal de barrido de frecuencia V_m (en voltios por metro) para esta zona de ensayo, esta frecuencia y esta polarización de la antena de emisión.

5.2 Procedimientos de ensayo de inyección de corriente

Los ensayos cubiertos por este apartado incluyen la excitación de un dispositivo de protección IEMN-GA o de un material por inyección directa de corriente (y de carga), en oposición a la excitación provocada por un campo electromagnético. Esto corresponde a la excitación de la topología del apantallamiento en puntos de observación en el interior de la superficie del apantallamiento principal, como se indica en el anexo A.

5.2.1 Ensayos de inyección en recintos. En el apartado 4.1.3 se estudian los ensayos de baja frecuencia del apantallamiento dado por un recinto o una caja por inyección de corriente y se muestran conceptualmente en la figura 7. Este diagrama se toma de la figura 33a, que muestra la inyección de corriente en un punto del apantallamiento exterior y la extracción en otro punto. La tensión en circuito abierto interna se mide en dos cables de detección conectados en el interior del recinto.

Este ensayo no está diseñado para simular los efectos de un campo IEMN-GA incidente actuando sobre el recinto; simula más bien los efectos de una corriente inducida por IEMN-GA en cables largos, conducida por el recinto apantallado. Los puntos de inyección de corriente deben corresponder a los puntos en los que la corriente circula en dirección al recinto en una configuración normal de funcionamiento. En algunos casos, pueden existir puntos de fijación de cable múltiples, necesitando varias simulaciones de inyección de corriente diferentes para tener en cuenta las diferentes excitaciones posibles del apantallamiento.

Disposición de ensayo

La figura 33b muestra la disposición relativa a este ensayo. Un analizador de red, controlado por una unidad de adquisición de datos, envía una señal de excitación de nivel bajo a un amplificador de potencia. Este amplificador, que presenta generalmente una salida por cable coaxial, alimenta un divisor de tipo simetrizador que inyecta la corriente en una conexión en el exterior del recinto y suprime la corriente en otro punto. Estos puntos de inyección deben corresponder a los emplazamientos que presentan conexiones eléctricas en la configuración normal de funcionamiento del sistema.

Se mide una tensión adecuada en un cable de detección interna y se reenvía hacia el analizador de red por un enlace de fibra óptica, de manera que no interrumpa el trayecto de la corriente en el exterior del sistema. Con la medida de esta tensión interna, se obtiene una medida de la impedancia de transferencia del apantallamiento Z_t por la ecuación (3).

En la realización de este ensayo, es importante asegurarse de que la frecuencia de funcionamiento es suficientemente baja, de manera que $\lambda = c / 2 \pi f > L$, L representando la dimensión mayor del recinto.

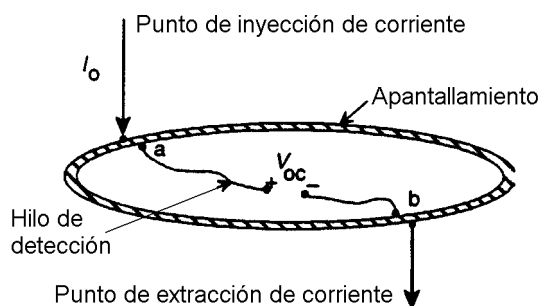


Figura 33a – Concepto de ensayo

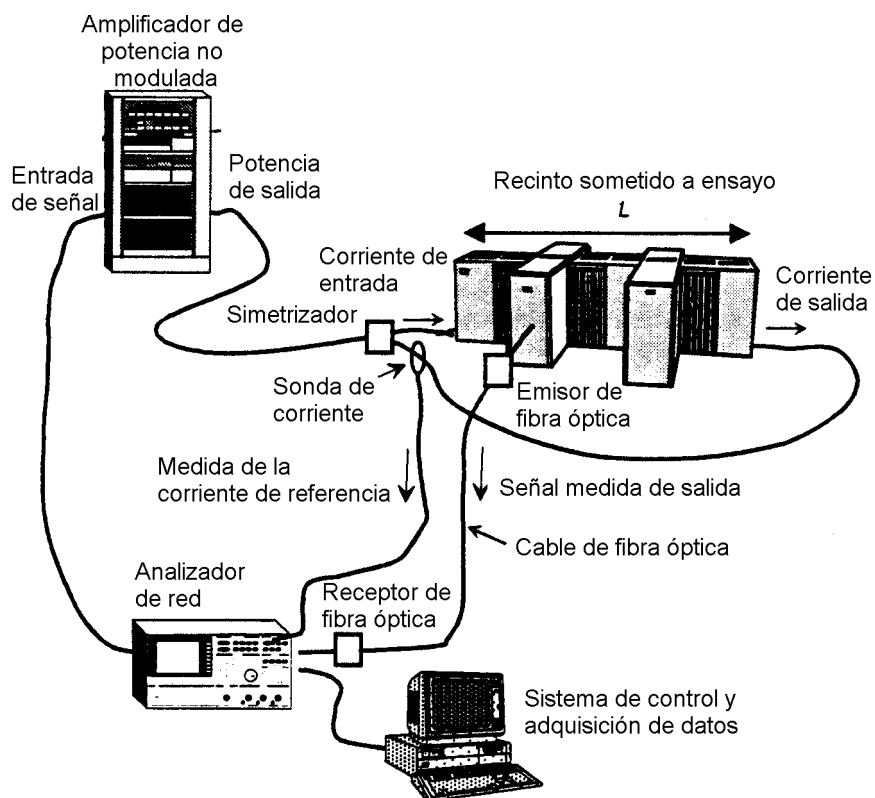


Figura 33b – Configuración del equipo

Fig. 33 – Concepto de ensayo y configuración del equipo para ensayos de inyección de corriente en un recinto o una caja apantallada

Equipo de ensayo

Para este ensayo, son necesarios los tipos de equipo siguientes:

- un analizador de red u otro detector apropiado, capaz de medir la corriente inyectada en el exterior del recinto y la tensión interna;
- amplificador de baja frecuencia adaptado a la inyección de la corriente amplificada en el recinto;
- simetrizador de antena u otro dispositivo de transición de línea equilibrada coaxial para la inyección de corriente en el sistema;
- sondas de tensión y de corriente;
- unidad de transmisión de fibra óptica u otro soporte de transmisión de datos adaptado al paso de la tensión medida interna hacia el analizador de red, sin causar perturbaciones en el trayecto de la corriente exterior;
- ordenador de control y unidad de análisis de datos;
- cables y conectores adecuados.

Procedimiento de ensayo

Este ensayo se realiza primero examinando el sistema para determinar los diversos puntos de inyección de corriente que normalmente se excitan por un suceso IEMN-GA. El tamaño (L) del recinto se mide, y después se determina la frecuencia máxima de funcionamiento ($f_{\text{máx.}}$), de manera que $\lambda_{\text{mín.}} = c/2 \pi f_{\text{máx.}} > L$. A continuación, el analizador de red es barrido desde la frecuencia más baja posible a la frecuencia máxima calculada, y se evalúa la impedancia de transferencia compleja igual a la relación V_{oc}/I .

Esta medida se continúa para diferentes puntos colectores de tensión interna, de manera que se obtenga un muestreo representativo de las variaciones de respuesta interna. Además si son posibles otros puntos de inyección de corriente exterior, estas medidas deben continuarse inyectando la corriente a frecuencia no modulada en estos puntos.

Es conveniente presentar el conjunto de respuestas medidas en forma de curvas resumen que muestren las distribuciones de las respuestas en función de la frecuencia. Además, la eficacia al apantallamiento del recinto puede calcularse según la ecuación (4).

5.2.2 Impedancia y admitancia de transferencia de los apantallamientos en cables y conectores. Los procedimientos de ensayo que permiten determinar la impedancia y la admitancia de transferencia de los apantallamientos de cables se definen en la Norma CEI 60096-1. El anexo A da informaciones sobre estas técnicas de medida.

5.2.3 Ensayo del material de las juntas⁴⁾

5.2.3.1 Medición de la resistividad. Los ensayos de resistividad de un material de junta se describen en el apartado 4.3.1. Estas medidas pueden no revelar la dureza del elemento una vez instalado en un dispositivo o un recinto, pero estos ensayos de resistividad en c.c. son no obstante útiles para caracterizar el material de la junta.

Disposición de ensayo

La disposición de ensayo para esta medida se muestra en la figura 14. En esta figura, el material sometido a ensayo se coloca entre dos electrodos, se provoca una corriente por la fuente de tensión de excitación, y la tensión que resulta se mide en la muestra. En el montaje de un ensayo real, la fuente de excitación y el voltímetro están contenidos en una sola unidad, el voltímetro de cuatro sondas, como se especifica a continuación.

4) Los ensayos del material de junta se describen en la Norma MIL-G83528B, 10 de Junio de 1993.

Equipo de ensayo

Para este ensayo, son necesarios los tipos de equipo siguientes.

- Ohmímetro de cuatro sondas que presenten un rango de medidas de $10^4 \Omega$ a $10^{-5} \Omega$.
- Electrodo chapados en plata u oro que presenten una superficie de contacto $A = 1,6 \text{ cm}^2$ (que corresponden a un diámetro circular de 1,43 cm) para soportar la muestra. Es conveniente que estos electrodos presenten un margen suficiente para fijar los electrodos del ohmímetro.
- Calibre de espesor para la medida por escalones de 0,02 mm.
- Dispositivo o equipo apropiado que pueda soportar los electrodos y la muestra de ensayo, así como medios adecuados para aplicar una presión de $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa}$ en la muestra.

Procedimiento de ensayo

Se deben obtener muestras de junta cuyo espesor varíe entre 0,1 y 0,3 mm y cuya sección transversal sea al menos idéntica a la de los electrodos. Antes del ensayo, es conveniente limpiar las superficies del material y eliminar todo polvo o cuerpo extraño. Es conveniente también limpiar los electrodos. Antes de los ensayos, es conveniente acondicionar la muestra de ensayo y el dispositivo y electrodos de ensayo durante 3 h al menos, a una temperatura normalizada de 23 °C y una humedad relativa del 45% al 75%.

Medir la zona A de los electrodos chapados en plata u oro. Medir y registrar el espesor L del material en el punto de contacto con los electrodos utilizando el calibre de espesor. El material de ensayo debe presentar una superficie de contacto suficiente con el conjunto de la zona de la superficie del electrodo. Posicionar a continuación el material entre los electrodos y aplicar una presión de $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa} \pm 5\%$ en la muestra. Manteniendo una presión constante, medir y registrar la resistencia R de la muestra.

Una vez medidas estas magnitudes, la resistividad en c.c. del material de la junta se calcula según la fórmula:

$$\rho_{DC} = R \frac{A}{L} \quad (12)$$

donde

ρ_{DC} es la resistividad en c.c. ($\Omega \cdot \text{m}$);

R es la resistencia medida (Ω);

A es la sección transversal más pequeña de la parte o de la muestra entre los electrodos de la sonda (m^2);

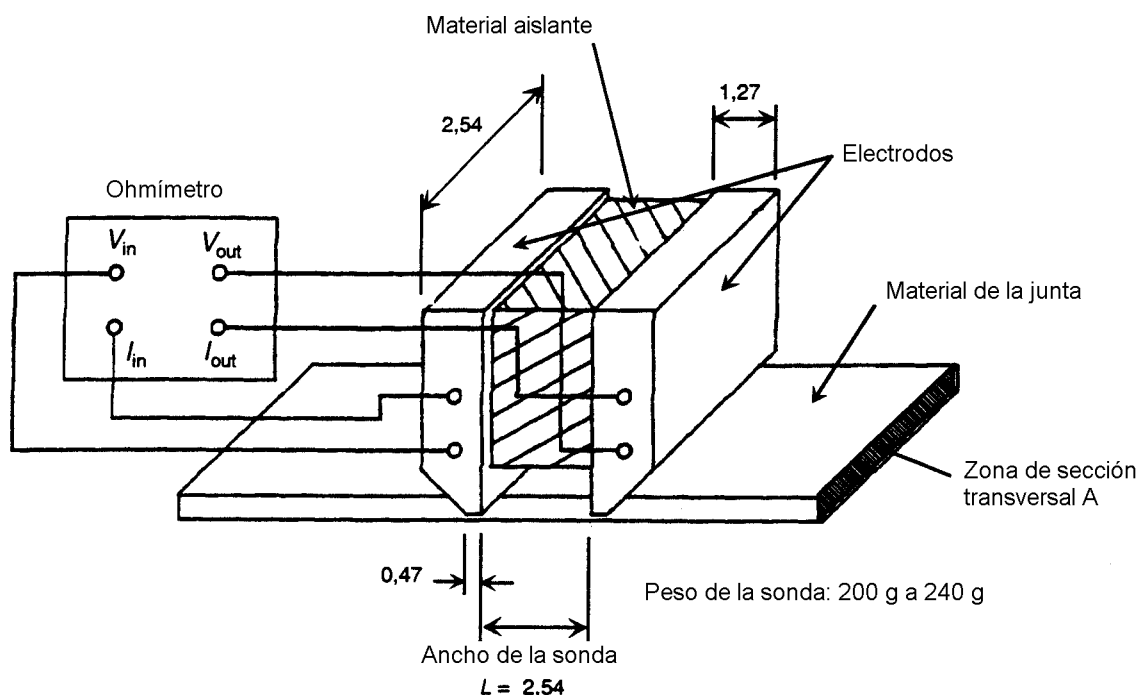
L es la distancia entre los dos electrodos (m).

5.2.3.2 Resistividad del material con la ayuda del método de la sonda de superficie. Otro método alternativo de ensayo de resistividad de una junta puede utilizarse en el caso de que el material de la junta no pueda ser cortado. Implica realizar una medida en superficie de la resistencia de la muestra.

Disposición de ensayo

Para este ensayo, se utiliza la sonda de dos puntos mostrada en la figura 34. Esta sonda presenta una separación entre electrodos igual a $L = 2,54 \text{ mm}$; en la figura se indican otras dimensiones típicas. Para las partes demasiado reducidas para medirse con esta sonda, se puede utilizar una sonda diferente que presente una separación más pequeña entre los electrodos, reduciéndose el ancho y el espacio de los electrodos conjuntamente.

Es conveniente que cada electrodo esté en contacto con la junta en un punto. En el caso de que una parte cuya configuración de la sección transversal haga difícil o imposible la medida con la ayuda de este método, es conveniente utilizar la sonda de ensayo más pequeña descrita anteriormente.



Todas las dimensiones se indican en centímetros

Fig. 34 – Sonda de superficie para la medida de la resistividad volumétrica

Equipo de ensayo

Para este ensayo, son necesarios los tipos de equipo siguientes:

- Ohmímetro de cuatro sondas con una sensibilidad mínima de 1 mΩ.
- Electrodos chapados en plata u oro, que presentan las dimensiones indicadas en la figura, y márgenes suficientes para fijar los electrodos del ohmímetro.

Procedimiento de ensayo

La resistividad volumétrica en c.c. del material debe medirse con la ayuda de un ohmímetro capaz de medir 1 mΩ al menos. La muestra a medir debe colocarse en una superficie no conductora. La sonda de medida debe colocarse en la parte de la junta de ensayo o, en su defecto, en una parte del material de ensayo de 1,27 cm de ancho por 7,62 cm de largo, y de 0,14 cm a 0,3 cm de espesor, de manera que el peso de la sonda de ensayo sea repartido uniformemente en la parte correspondiente o, en la muestra de ensayo. La parte debe estar en contacto en su parte ancha con cada electrodo. Después de un periodo de estabilización de 30 s, debe registrarse la resistencia R en el óhmímetro. La resistividad volumétrica en c.c. debe calcularse aplicando la misma ecuación que en el apartado 5.2.3.

ANEXO A (Informativo)**CONCEPTOS PARA LOS ENSAYOS IEMN-GA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS****A.1 Introducción**

Los ensayos IEMN-GA practicados en un sistema eléctrico son necesarios porque los modelos matemáticos y numéricos no dan resultados suficientemente precisos para dar un nivel de fiabilidad elevado en el marco de la evaluación de la capacidad de supervivencia de un sistema en un entorno IEMN-GA. En la decisión de practicar un ensayo IEMN-GA influyen varios factores:

- la importancia relativa del sistema y de sus requisitos de capacidad de supervivencia;
- el tipo de sistema, su configuración física y su emplazamiento;
- los medios financieros, tiempo y personal disponibles para los ensayos;
- la precisión deseada de los resultados.

Antes de determinar los requisitos de ensayo de un sistema, es preciso que los factores anteriores sean cuidadosamente evaluados para saber si el ensayo es realmente necesario. En efecto, los ensayos pueden ser muy costosos, muy largos y pueden presentar un riesgo de deterioro para el equipo sometido a ensayo.

A.2 Tipos de ensayos IEMN-GA

Se realizan diferentes tipos de ensayo en los sistemas para determinar la respuesta a una excitación IEMN-GA. Algunos casos son más bien simples y sin rodeos, otros necesitan instalaciones importantes y capacidades de tratamiento de datos significativas. Los apartados siguientes describen brevemente los principales tipos de ensayo IEMN-GA.

A.2.1 Ensayos de transitorios en el sistema

El ensayo probablemente más completo efectuado en un sistema (aparte de la utilización de un entorno nuclear real) consiste en realizar un ensayo de nivel peligroso en el sistema entero. Este tipo de ensayo implica la integración de un simulador EMP de impulsos peligroso cerca de la instalación estudiada y la realización de una serie de medidas efectuadas que modifican los parámetros tales como los ángulos de incidencia, la configuración eléctrica del sistema (es decir puertas abiertas o cerradas, etc.).

Generalmente, en este tipo de ensayo, se mide un gran volumen de datos transitorios y se registra para un análisis posterior del ensayo. Los resultados del análisis practicado después del ensayo se expresan generalmente en forma de una probabilidad de supervivencia del sistema en el caso de una IEMN-GA, e implican el concepto de normas de forma de onda.

La principal ventaja de este tipo de ensayo es que el conjunto del sistema es sometido al entorno de nivel peligroso deseado. En consecuencia, los dispositivos de protección no lineales son sometidos a tensiones, y la respuesta del sistema integra los efectos de estos elementos. Además, serán incluidos los efectos de otras no linealidades no previstas tales como los contorneos en cables, que son muy difíciles de prever de manera analítica.

Por otra parte, el equipo utilizado en estos ensayos es voluminoso, costoso y difícilmente transportable. En consecuencia, se utiliza generalmente un simulador de emplazamiento fijo para este tipo de ensayo. Si el sistema a ensayar es difícil de desplazar, este ensayo no es fácil de realizar. Además, en este tipo de ensayo se produce un gran volumen de datos, y el esfuerzo de análisis después del ensayo puede ser considerable.

A.2.2 Ensayos de iluminación de campo de ondas no moduladas

Para sustituir los ensayos de impulso peligroso a escala real, es posible aplicar el concepto de ensayo de iluminación de campo de ondas no moduladas. Este concepto de ensayo es similar al del ensayo de impulso en el sistema en la medida en que una estructura radiante (es decir una antena) se sitúa cerca del sistema sometido a ensayo. Sin embargo, al contrario que en el ensayo de impulso, la excitación de la antena es armónica en el tiempo (por ejemplo, ondas no moduladas) y es barrida o escalonada en un rango de frecuencias, comenzando por una frecuencia baja, de 10 kHz a 100 kHz, hasta una frecuencia elevada, de 100 MHz a 200 MHz. Algunos sistemas de ensayo de ondas no moduladas más recientes funcionan hasta el rango de frecuencias en gigahertzios (GHz).

El objetivo básico del ensayo de ondas no moduladas consiste en medir una función de transferencia a partir de una magnitud de campo EM apropiada, en el exterior de la instalación y según una respuesta en el interior de la instalación. Como esta medida se realiza en el campo frecuencial, la función de transferencia es una función de valor complejo, caracterizado por su amplitud y su fase o, inversamente, por sus partes reales e imaginarias.

Las magnitudes de referencia exteriores correspondientes conllevan una componente de campo E o H incidente o global, una corriente inducida a lo largo de un cable exterior o puede que la corriente de entrada en la antena de ondas no moduladas misma. Si la respuesta medida debe ser extrapolada a partir de una respuesta IEMN-GA, la elección de la referencia exterior debe hacerse de manera que pueda relacionarse con un campo IEMN-GA incidente. Las magnitudes de respuesta interna pueden incluir los campos E y H en el interior de la instalación, las corrientes en los cables interiores y las tensiones en los bornes del equipo.

Esta forma de ensayo presenta varias ventajas con relación a los ensayos de impulso a escala real descritos anteriormente. El equipo utilizado es fácilmente disponible y es mucho menos costoso que el equipo utilizado para los ensayos de impulso. Además, el conjunto del sistema puede ser fácilmente transportado hacia sitios remotos y puede montarse rápidamente. Debido a las características de banda estrecha del proceso de excitación y de medida, los efectos del ruido pueden ser reducidos. Generalmente, es más fácil obtener un espectro de ondas no moduladas “limpio” que obtener una forma de onda transitoria limpia.

El principal inconveniente de los ensayos de ondas no moduladas es que, debido al bajo nivel de potencia y al modo de funcionamiento no transitorio, no son desconectados los dispositivos de protección no lineales en el sistema. Además, no son examinados otros dispositivos no lineales imprevisibles, tales como el contorno del aislamiento de cable. En consecuencia, este método de ensayo da únicamente la respuesta lineal (o de nivel bajo) y los sistemas ensayados de esta manera pueden parecer más vulnerables de lo que son realmente, ya que los efectos no lineales pueden añadir una protección adicional – si funcionan.

Este inconveniente puede no tener importancia en algunos casos, como el de numerosos sistemas que utilizan dispositivos no lineales con filtros eléctricos. Los ensayos de ondas no moduladas en estos sistemas dan una estimación razonable de la respuesta en el caso más desfavorable – especialmente la respuesta obtenida si el dispositivo no lineal no funcionara correctamente. Además, existen métodos que permiten efectuar una combinación analítica de medidas de ondas no moduladas de nivel bajo, efectuadas por un sistema que presenta características de dispositivo no lineal, para permitir el cálculo del comportamiento no lineal de impulsos del sistema.

Otro inconveniente de este procedimiento de ensayo es que el resultado final medido no es generalmente el resultado final deseado. Para obtener la respuesta IEMN-GA transitoria extrapolada, es preciso acometer algunos tratamientos de datos adicionales, lo que puede provocar errores en la respuesta transitoria resultante.

A.2.3 Ensayo de inyección de corriente

Los dos ensayos precedentes se aplican al conjunto del sistema. Otro concepto de ensayo consiste en excitar únicamente algunas partes del sistema. Para ello, se pueden identificar conductores eléctricos importantes que penetran en una instalación e inyectar corrientes de impulso o de ondas no moduladas en los cables. Las corrientes inyectadas se redistribuyen rápidamente en la instalación e indican la respuesta del sistema en condiciones de excitación del campo exterior.

Generalmente, para este tipo de ensayo, debe realizarse un análisis previo para identificar los trayectos de corriente conductores importantes que penetran en la instalación o el sistema considerado. Pueden incluir líneas de alimentación, cables de comunicación o conductores mecánicos. Para cada uno de estos conductores, debe realizarse un análisis del acoplamiento del campo EM para estimar la amplitud y la forma de onda de la respuesta IEMN-GA. Entonces, se aplica una fuente de inyección de corriente que presenta características transitorias (o espectrales) correctas a cada uno de los conductores seleccionados y son medidas las respuestas internas.

La ventaja de este tipo de ensayo es que el equipo de inyección de impulso es generalmente más pequeño y menos costoso que el simulador de magnitud real y el equipo asociado. Además, son más fáciles de inducir corrientes peligrosas por métodos de inyección de impulso que por una iluminación del campo EM. Realizado en modo de impulsos, este tipo de ensayo da también la posibilidad de excitar dispositivos no lineales situados a lo largo de los trayectos conductores excitados. Así, pueden completarse mutuamente un ensayo de inyección de impulso de corriente y un ensayo de iluminación de campo de ondas no moduladas.

Este tipo de ensayo es fundamentalmente incompleto, ya que no son tomados en cuenta los efectos sinérgicos posibles de una excitación simultánea del conjunto del sistema. Existe pues siempre un error desconocido en esta técnica de simulación. Además, el establecimiento de la relación entre los niveles de corriente inyectada en los conductores exteriores y el campo IEMN-GA incidente se realiza a menudo por análisis. Esta etapa puede introducir incertidumbres en los resultados.

A.2.4 Ensayo de iluminación parcial

Los ensayos de iluminación parcial son equivalentes a los ensayos de inyección de impulso, pero se considera que la excitación del sistema proviene de una excitación del campo EM parcial del sistema y no de una inyección de corriente en uno de los conductores del sistema. Esta aproximación de ensayo se designa a veces como el concepto PARTES.

Este ensayo se realiza utilizando pequeñas antenas de dipolos eléctricos o magnéticos denominadas “excitadores”, en diversos emplazamientos en la superficie exterior del sistema de ensayo. Localmente, estos excitadores producen una excitación del campo EM del sistema y puede ser medida la respuesta interna correspondiente. Se puede utilizar ensayos de ondas no moduladas o de impulso según este concepto. Estudiando un gran número de emplazamientos de excitadores y combinando de manera analítica las respuestas medidas para cada uno, es posible deducir la respuesta de una excitación de onda plana del sistema.

La principal ventaja de este procedimiento es que permite realizar ensayos en sistemas eléctricamente importantes. Aunque estos sistemas puedan necesitar numerosas medidas en un cambio de implantación del excitador, este método permite estos ensayos.

El principal inconveniente de estos ensayos es que es necesario efectuar un trabajo analítico considerable para combinar correctamente los ficheros de datos medidos para obtener el resultado final deseado. Por otra parte, siempre puede preguntarse sobre los emplazamientos mejores para las fuentes del excitador. Finalmente, la cuestión del funcionamiento de un dispositivo no lineal no se trata completamente en este tipo de ensayo.

A.2.5 Ensayo en subsistemas y componentes

Junto a ensayos de sistema global, se practican ensayos en el subsistema (es decir de la “caja negra”) y en el componente. En este ensayo, una pieza electrónica o quizás incluso una componente discreta, en el seno de un equipo, se somete a estos ensayos para verificar su respuesta. La tensión IEMN-GA en el componente debe ser determinada así, bien por un ensayo, o por un análisis.

Este tipo de ensayo es ventajoso porque los ensayos de componentes son relativamente poco costosos y se realizan rápidamente. Además, en caso de fallo del componente o del equipo, pueden determinarse procedimientos de consolidación analizando el modo de fallo del dispositivo.

Sin embargo, el principal inconveniente de este tipo de ensayo es que es difícil de asegurar que el componente esté sometido a la misma tensión eléctrica que la existente en condiciones de excitación IEMN-GA. La tensión IEMN-GA en un sistema es difícil de determinar exactamente sin realizar un ensayo en el sistema. (Si se realizara este tipo de ensayo, no sería necesario realizar un ensayo del componente). Generalmente, la tensión en el componente se determina por análisis, que es utilizado entonces para determinar la excitación correcta por impulso u ondas no moduladas en el componente.

A.2.6 Ensayo de humo

El ensayo de humo, también llamado “ensayo general”, es el ensayo IEMN-GA más simple a realizar. Se trata de un ensayo de sistema transitorio, peligroso, diseñado para ver como resiste un sistema excitado por un IEMN-GA. En este concepto de ensayo, el sistema se localiza en el volumen de trabajo de un simulador peligroso y el simulador es pulsado una o varias veces. Aparte de la sonda de referencia de campo y el equipo de registro unido, no es necesario ningún otro elemento de adquisición de datos. Se trata principalmente de un ensayo de aceptación/rechazo, a veces denominado ensayo “sí o no”.

La ventaja de este ensayo es que es rápido de realizar, necesita un personal y una planificación mínima y, excepción hecha de los costes fijos del sistema de ensayo y de instalación de simulación, es relativamente poco costoso.

Existen varios inconvenientes en este tipo de ensayo, que es necesario considerar a la vista de la simplicidad del ensayo. En primer lugar, el sistema corre el riesgo de ser deteriorado de forma permanente por los ensayos y necesitar reparaciones costosas. En segundo lugar, existe generalmente un solo “ejemplo” de sistema probado. Si soporta el ensayo, no hay garantía de que otro sistema del mismo tipo tenga el mismo comportamiento. Finalmente, con este tipo de ensayo, no se da ninguna información relativa al margen de seguridad.

A.3 Definición de la interfaz del ensayo

La definición de la interfaz de ensayo en el sistema es uno de los aspectos claves de los ensayos. Puede considerarse como el emplazamiento en que la tensión IEMN-GA simulada debe aplicarse al sistema. Se considera generalmente que un sistema eléctricamente complejo puede ser representado por una serie de superficies de apantallamiento, o “barreras EM”, penetradas en puntos seleccionados por uno de los numerosos “mecanismos de penetración EM”, tales como por difusión, la penetración por abertura o la penetración conductora. La figura A.1 muestra este tipo de esquema para un sistema eléctrico genérico, que presenta zonas de tensiones eléctricas diferentes inducidas por IEMN-GA (en líneas horizontales), así como los diversos trayectos de acoplamiento y mecanismos de penetración.

Es conveniente observar que en la figura A.1, la interacción IEMN-GA con el sistema se ha dividido en dos partes: una corresponde a las penetraciones de la barrera del apantallamiento por difusión y por aberturas, y la otra a las penetraciones a lo largo de los trayectos conductores deliberadamente dispuestos, tales como líneas de señal, de control, de alimentación, etc. Esta norma expone los conceptos de ensayo para el primer tipo de penetraciones, especialmente los métodos de ensayo para recintos de apantallamiento. La Norma CEI 61000-4-24 expone los métodos de ensayo para dispositivos de protección contra las perturbaciones conducidas IEMN-GA y se concentra en los métodos de ensayo para inyección de señal apropiada en las salidas de señal y/o de potencia del equipo, como se indica en la figura A.1.

Los ensayos practicados en el apantallamiento del sistema pueden realizarse en cualquiera de los emplazamientos de la interfaz⁵⁾ designados por las letras A a H, que se desplazan progresivamente en el sistema. Los ensayos más directos se efectúan en el punto de la interfaz A en el exterior del sistema, donde la excitación se debe a los campos exteriores E y H producidos por IEMN-GA. En este emplazamiento, es necesario simular el comportamiento de los campos IEMN-GA incidentes en el conjunto del sistema (más los campos eventuales repercutidos por objetos próximos tales como un plano de tierra). Si esta simulación se efectúa correctamente, la respuesta del sistema es comparable a la del sistema sometido a una iluminación IEMN-GA.

5) Obsérvese que estos emplazamientos de interfaz no son realmente “puntos de ensayo”, porque no hacen referencia a emplazamientos específicos en cables o componentes del sistema. Designan más bien emplazamientos genéricos de puntos de ensayo eventuales en el sistema.

El punto de interfaz B está siempre situado en el exterior del sistema, pero aparecerá después del acoplamiento del campo incidente con el exterior del sistema, así como las corrientes y las cargas inducidas en el apantallamiento exterior. Así, la excitación del sistema en este punto se efectúa quitando una etapa con relación al campo incidente. Como se indica en la figura A.1, la tensión IEMN-GA en el diagrama de interacción puede penetrar en el sistema a través de aberturas, elementos de difusión o penetraciones conductoras, a menudo denominados puntos de entrada (PdE). En el caso de una iluminación de campo, todos estos mecanismos de penetración se excitan simultáneamente por el campo incidente. Sin embargo, para los ensayos practicados en la interfaz B, cada penetración está generalmente sometida de forma separada en los ensayos debido al tamaño del sistema. En consecuencia, los ensayos en este nivel provocan errores potenciales, no solamente debido a un requisito más complejo relativo al comportamiento temporal de las fuentes de excitación, sino también porque los puntos de entrada no pueden ser ensayados todos al mismo tiempo.

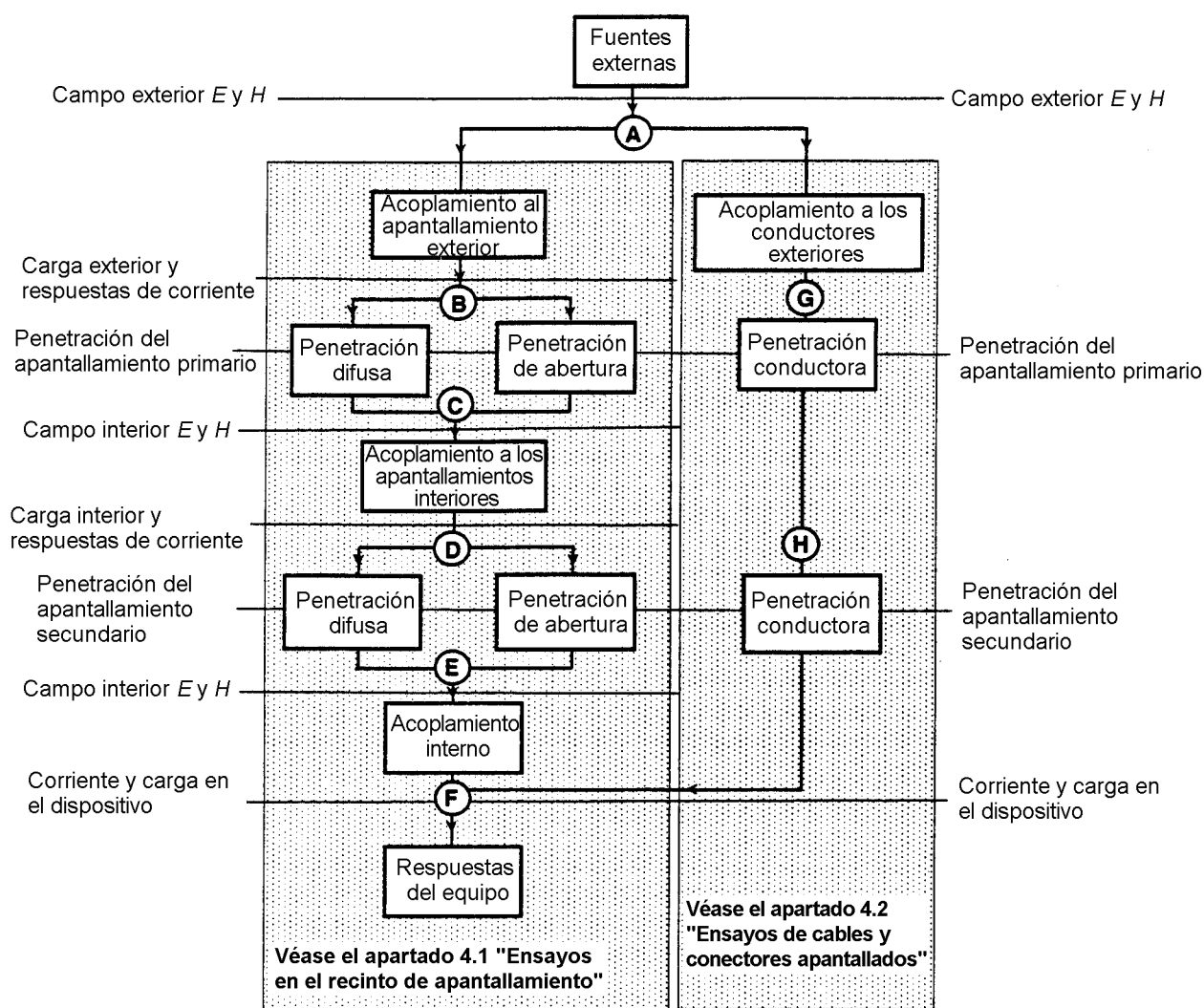


Fig. A.1 – Esquema de la interacción IEMN-GA que muestra los mecanismos de penetración, las respuestas del sistema y los emplazamientos de la interfaz en ensayo genéricos

Las excitaciones de ensayo necesarias en este emplazamiento pueden describirse en términos de densidad de corriente inyectada y de una correspondiente densidad de carga en la superficie del apantallamiento o, si se consideran conductores largos, las fuentes son corrientes y tensiones exteriores relativas a un conductor de referencia adaptado (plano de tierra). Dado que el comportamiento de estas respuestas eléctricas depende de la naturaleza de la excitación IEMN-GA y de la naturaleza eléctrica de la parte exterior del sistema, estas respuestas son más complicadas que las fuentes de simulación requeridas en el emplazamiento A.

Siguiendo en el sistema, el punto de interfaz C es un punto del campo situado en el interior de los puntos de penetración de la barrera EM primaria. En este emplazamiento, las respuestas IEMN-GA comprenden los campos *E* y *H* locales en el apantallamiento. Estos campos se propagan en el interior del sistema y forman un acoplamiento en las superficies de los apantallamientos secundarios del sistema. Estos apantallamientos comprenden generalmente los recintos de las cajas individuales o armarios y apantallamientos de cables. Aparecen corrientes y cargas locales en las superficies del apantallamiento interiores, indicados por la interfaz D. Las respuestas en D contienen todos los efectos de resonancias de cavidad internas, resonancias de cable internas, perturbaciones de campo locales debidas a las cargas internas y una miriada de otras complicaciones provocadas por un sistema realista.

Finalmente las corrientes y cargas en D penetran a través de la capa del apantallamiento secundaria, siempre por penetraciones difusas o de tipo de abertura, para generar campos *E* y *H* de excitación internos en el emplazamiento E. Estos campos son acoplados con cables o hilos internos y conducen finalmente a la interfaz de ensayo F en el componente o en la “caja negra”.

Los ensayos IEMN-GA pueden realizarse en cualquier emplazamiento de la interfaz mencionada anteriormente. Sin embargo, cuanto más profundamente esté situada la interfaz del ensayo en el sistema, es más difícil describir con precisión la tensión IEMN-GA a aplicar en el ensayo. Así, se constatará un importante grado de incertidumbre en los resultados de ensayo para las interfaces de ensayo internas. Por otra parte, cuanto más cercano está el emplazamiento de ensayo de los componentes, se podrá definir con mas precisión el comportamiento de los componentes o de las cajas negras en respuesta a la tensión. En consecuencia, se adopta un compromiso en el marco de los ensayos IEMN-GA entre la facilidad de descripción y de simulación de la tensión deseada en el sistema, y la precisión para la determinación de la respuesta del sistema frente a esta tensión.

Como se ha mencionado anteriormente, aparecerá un trayecto de acoplamiento suplementario debido a penetraciones conductoras a través de los apantallamientos, lo que hace aparecer los puntos de interfaz del ensayo G y H. Aunque no se haga mención en esta norma, se indica en la figura A.1 para más precisión.

A.4 Utilización de los datos del ensayo

Los datos adquiridos en el marco de los programas del ensayo pueden tener diferentes utilizaciones, en función de la naturaleza del ensayo y de los requisitos funcionales del sistema. Se resumen a continuación las diferentes utilizaciones de datos de ensayo.

A.4.1 Aceptación de nuevos sistemas

Un sistema nuevo diseñado para ser reforzado contra los efectos IEMN-GA presentará una o varias especificaciones de reforzamiento en el diseño. Al final de la construcción del sistema y antes de la entrega por el fabricante, es habitual recomendar un ensayo de aceptación para demostrar que el sistema responde a las especificaciones IEMN-GA prescritas.

Los datos adquiridos en los programas de ensayo pueden utilizarse para la aceptación. Estos ensayos pueden ser simples ensayos de “prueba” en que la capacidad de supervivencia del sistema es validada, o se pueden dar medidas detalladas de niveles de tensión en las interfaces definidas y una verificación de los márgenes de seguridad que determinan la resistencia de los componentes críticos o entradas críticas de los subsistemas.

A.4.2 Evaluaciones del sistema

Para un sistema no sometido a los requisitos de capacidad de supervivencia IEMN-GA, o no habiendo sido objeto de ningún ensayo previo, un programa de ensayo puede dar datos útiles para la evaluación de la condición corriente de resistencia IEMN-GA. Se trata de realizar medidas detalladas de una tensión inducida por el IEMN-GA en puntos de interfaz definidos, y después comparar estas tensiones con la sensibilidad conocida (o estimada) de los componentes. Esta comparación de las características de tensión /respuesta permite una estimación del comportamiento del sistema

A.4.3 Control de la resistencia

Cuando un sistema se considera reforzado para resistir a los IEMN-GA, pueden realizarse medidas periódicas del sistema para asegurar que el estado de resistencia permanece intacto. Frecuentemente, estas medidas comprenden funciones de transferencia de ondas no moduladas entre un punto de observación exterior en el sistema y un punto interior. Las modificaciones de esta función de transferencia en un periodo de tiempo dado indican un deterioro de la resistencia del sistema o una reducción del margen de seguridad.

A.4.4 Diseño del sistema

El diseño de un nuevo sistema es una de las aplicaciones finales de datos de ensayo. La experiencia de ensayos de sistema puede permitir comprender como mejorar la resistencia del equipo y como diseñar, a partir del estado de construcción, un sistema resistente a los IEMN-GA. Por otra parte, un ensayo de un componente (o banco de ensayo) puede dar informaciones sobre las respuestas de componentes y subsistemas a los transitorios IEMN-GA, que puedan ser útiles para los ensayos y evaluaciones del sistema.

A.5 Incertidumbres de ensayo

En cada uno de los conceptos de ensayo descritos anteriormente, las incertidumbres añaden errores en los resultados finales del ensayo. Generalmente, estos errores son difíciles de evaluar de manera cuantitativa, pero una relación de incertidumbres ayuda al menos al personal de ensayo para tomar conciencia de las dificultades potenciales relacionadas con los ensayos. Las incertidumbres significativas pueden resultar en los puntos siguientes:

- a) Falta de conocimiento del entorno IEMN-GA incidente, descrito por su ángulo de incidencia y la polarización con relación a la tierra
- b) Variabilidad de la forma de onda IEMN-GA en función del emplazamiento del sistema sobre la tierra, e incapacidad de simular esta forma de onda de manera precisa debido a:
 - 1) variaciones espaciales no ideales del campo IEMN-GA simulado;
 - 2) conocimiento impreciso de las propiedades eléctricas del suelo;
 - 3) errores en los cálculos por extrapolación de una respuesta de bajo nivel a niveles IEMN-GA;
 - 4) errores de medida;
 - 5) falta de informaciones precisas de los niveles de fallo de los componentes;
 - 6) deterioro desconocido de la resistencia del sistema en el tiempo.
- c) Se introduce una fuente final de incertidumbre en el proceso de ensayo por deseo de conocer demasiados elementos a partir de un simple ensayo limitado. Sólo un número finito de excitaciones puede ser considerado en un ensayo y, en consecuencia, cualquier deducción estadística concerniente a la probabilidad de supervivencia de un sistema frente a los IEMN-GA será incompleta. Además, incluso si un sistema está totalmente ensayado y caracterizado, es difícil de extrapolar los resultados a un conjunto de sistemas similares. Cada sistema puede ser (y es generalmente) eléctricamente distinto de otros y, en consecuencia, los detalles de las respuestas IEMN-GA pueden variar considerablemente entre los sistemas. Es por lo que la utilización de un margen de seguridad es útil para el reforzamiento.

ANEXO B (Informativo)

CARACTERIZACIÓN DE LOS CABLES APANTALLADOS

B.1 Nociones fundamentales relativas al apantallamiento de cables

En su configuración más sencilla, una línea de transmisión apantallada comprende un cable cuyo apantallamiento se conecta a cada uno de los recintos. Los recintos y el cable están situados generalmente sobre un plano de tierra conductor, situándose el cable a una altura h . Como se indica en la figura B.1, los dos recintos están conectados al plano de tierra por dos impedancias externas $Z^{(e)}$ de manera que se pueda estudiar a la vez una configuración de circuito puesto a tierra y de circuito abierto.

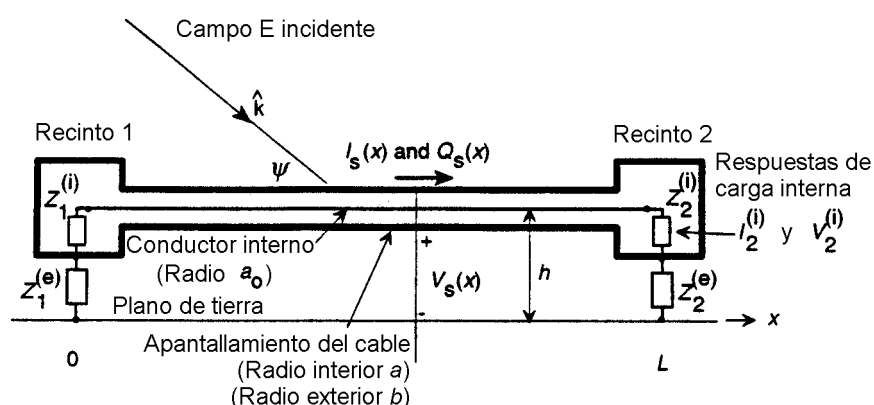


Fig. B.1 – Geometría de una línea coaxial apantallada con un circuito interno

Para un cable apantallado iluminado por un campo electromagnético, los campos eléctricos y magnéticos exteriores pueden penetrar a través de imperfecciones en la envolvente del cable y provocar corrientes y tensiones parásitas en los conductores internos. Este anexo no cubre las penetraciones de campo suplementarias susceptibles de sobrevenir a través de los recintos de uno u otro extremo de la línea.

El acoplamiento por el apantallamiento del cable entre el campo electromagnético exterior y los conductores internos se produce según tres fenómenos básicos:

- la difusión de los campos E y H a través del material de la envolvente;
- la penetración de campos a través de pequeñas aberturas de apantallamientos trenzados;
- un fenómeno de inducción más complejo debido al calentamiento de los hilos individuales (o soportes) del apantallamiento.

Los dos últimos fenómenos sobrevienen únicamente para apantallamientos trenzados.

El comportamiento de la respuesta inducida en conductores internos de un cable apantallado puede ser descrito en términos de una impedancia de transferencia Z_t y de una admitancia de transferencia Y_t del apantallamiento. Para comprender los conceptos de impedancia y de admitancia de transferencia, se considera un campo EM exterior con variación temporal que induce una corriente de envolvente del cable I_s y una tensión envolvente/tierra V_s (o, de manera equivalente, una densidad de carga de la envolvente). Algunas porciones de los campos eléctricos y magnéticos exteriores pueden penetrar a través del apantallamiento e inducir respuestas de tensión y de corriente internas, V_i e I_i respectivamente. Estas magnitudes y sus polaridades supuestas se indican en la figura B.1. Para este sistema de conductor, circula en el suelo una corriente de retorno I_g ; siendo esta corriente la suma de I_s e I_i .

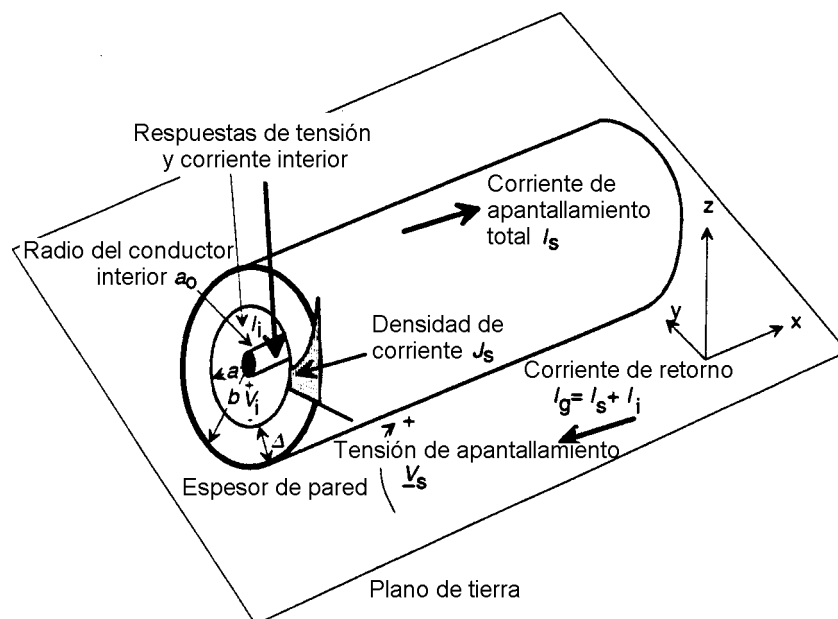


Fig. B.2 – Cable coaxial situado sobre un plano de tierra conductor

El flujo de corriente en la envuelta del cable crea un campo eléctrico axial en el interior de la envuelta. Debido al efecto de la capa superficial, el reparto de la corriente y del campo eléctrico asociado en la sección transversal de la envuelta no es uniforme. Si I_s es la corriente total que circula en la envuelta, el campo eléctrico E_i en la superficie interior del apantallamiento se produce por una densidad de corriente atenuada, siendo la reducción determinada aproximadamente por δ , la profundidad de la capa superficial en el material de apantallamiento, dado por:

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \sigma \mu)} \text{ m} \quad (\text{B.1})$$

donde

σ es la conductividad del material de la envuelta;

f es la frecuencia de la corriente inducida;

μ es la permeabilidad del material de la envuelta.

Esta componente del campo eléctrico axial en la superficie interior de la envuelta crea una tensión entre los conductores internos y la envuelta y, en función de las impedancias terminales del conductor de señal interno, puede circular una corriente. La capacidad de protección del apantallamiento del cable se determina por la reducción de la componente del campo eléctrico debida a la atenuación de la profundidad de la capa superficial. Esta capacidad de reducción se determina más precisamente en el capítulo B.2 gracias al concepto de impedancia de transferencia, definido como la relación entre el campo eléctrico interior E_i y la corriente del apantallamiento total I_s en el campo frecuencial.

La dualidad en términos de efecto del campo eléctrico de la impedancia de transferencia es la admitancia de transferencia. Describe el proceso por el que una parte de la carga inducida sobre la envuelta del cable se encamina hacia el cable interno en el interior del apantallamiento. Esta inducción de carga en el conductor interno se suma a una corriente inyectada en el cable interno. Este efecto puede estar ligado a la tensión apantallamiento/suelo exterior V_s por una admitancia de transferencia.

B.2 Definiciones de la impedancia y de la admitancia de transferencia

La envolvente del cable y su retorno exterior (generalmente un plano de tierra) así como el conductor interno forman dos circuitos acoplados, como se indica en la figura B.2. Se asume, en este desarrollo, que el circuito externo es independiente del comportamiento del circuito interno, y que el circuito interno conlleva una fuente controlada de tensión y de corriente que da la excitación a partir del circuito externo. Esta configuración del circuito parte del principio de que el circuito constituye un apantallamiento satisfactorio.

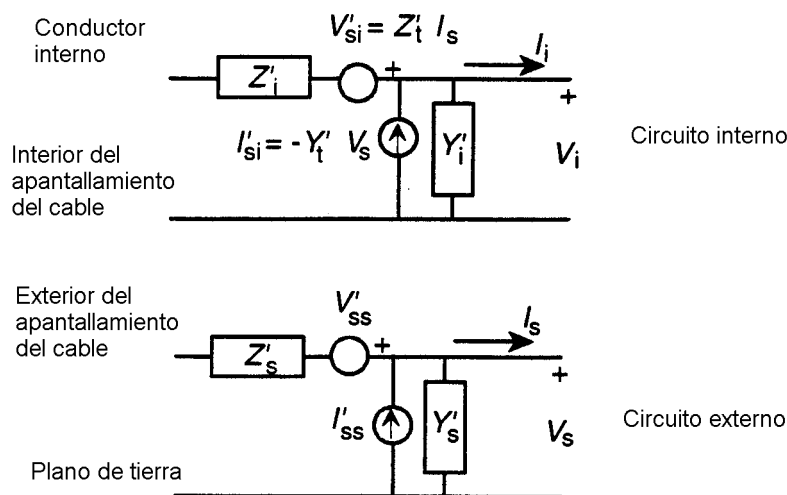


Fig. B.3 – Dos circuitos por unidad de longitud formados por la envolvente y su retorno a tierra así como la envolvente y el conductor interno

Para estas dos líneas acopladas, la corriente y la tensión I_s y V_s del apantallamiento exterior así como la corriente y la tensión I_i y V_i del conductor interno son descritas por el conjunto de ecuaciones diferenciales siguiente:

$$\text{Circuito externo:} \quad \frac{dV_s}{dx} + Z'_s I_s = V'_ss \quad \text{V / m} \quad (\text{B.2a})$$

$$\frac{dI_s}{dx} + Y'_s V_s = I'_ss \quad \text{A / m} \quad (\text{B.2b})$$

$$\text{Circuito interno:} \quad \frac{dV_i}{dx} + Z'_i I_i = V_{si} \quad \text{V / m} \quad (\text{B.3a})$$

$$\frac{dI_i}{dx} + Y'_i V_i = I_{si} \quad \text{A / m} \quad (\text{B.3b})$$

En estas expresiones, la línea de transmisión exterior se describe por los parámetros de impedancia y de admitancia por unidad de longitud Z'_s y Y'_s que, para una línea sin pérdida, están relacionados con las magnitudes de inductancia y de capacidad de línea por unidad de longitud según las ecuaciones $Z'_s = j\omega L'_s$ e $Y'_s = j\omega C'_s$. De manera similar, para un cable sin pérdida, los parámetros de la línea interna Z'_i e Y'_i están unidos a la inductancia y capacidad de línea interna por unidad de longitud, según las fórmulas $Z'_i = j\omega L'_i$ e $Y'_i = j\omega C'_i$.

Las fuentes de excitación primarias en este problema son las fuentes de tensión y de corriente V'_{ss} e I'_{ss} distribuidas en el circuito exterior. Las fuentes de excitación para el circuito interior son las fuentes de tensión y de corriente presentadas en la figura B.1 y son designadas respectivamente por V'_{si} e I'_{si} . Estas fuentes internas están relacionadas con las respuestas de líneas externas por las fórmulas siguientes:

$$V'_{si} = Z'_t I_s \quad \text{V / m} \quad (\text{B.4a})$$

$$I'_{si} = Y'_t V_s \quad \text{A / m} \quad (\text{B.4b})$$

donde Z'_t e Y'_t son la impedancia de transferencia por unidad de longitud y la admitancia de transferencia por unidad de longitud del apantallamiento. Estas magnitudes pueden definirse de manera formal a partir de las ecuaciones (B.3a) y (B.3b) atribuyendo a I_i y V_i valores nulos, como sigue:

$$Z'_t = \frac{1}{I_s} \left. \frac{dV_i}{dx} \right|_{I_i=0} \quad \Omega / \text{m} \quad (\text{B.5a})$$

$$Y'_t = - \frac{1}{V_s} \left. \frac{dI_i}{dx} \right|_{V_i=0} \quad \text{S / m} \quad (\text{B.5b})$$

En la definición de la impedancia de transferencia de la ecuación (B.5a), el parámetro que resulta Z'_t depende únicamente de la composición eléctrica y física del cable apantallado. Sin embargo, eso no se aplica a la admitancia de transferencia en la ecuación (B.5b) porque la tensión del apantallamiento exterior V_s depende de la geometría del conductor exterior. Más específicamente, la impedancia de transferencia depende de la capacidad externa del apantallamiento del cable con relación al plano de tierra de referencia.

Para sustituir una evaluación de la fuente de excitación de corriente interna utilizando la ecuación (B.4b), es posible asimilar la respuesta externa pertinente a la densidad de carga externa en el apantallamiento del cable, q'_e , en lugar de la tensión apantallamiento/suelo externa. De esta manera, la fuente de corriente interna puede expresarse por:

$$I'_{si} = -j\omega C'_i S_s q'_e \quad (\text{B.6})$$

donde

C'_i es la capacidad por unidad de longitud de la línea interna;

S_s es un coeficiente de fuga del apantallamiento (medido en metros por faradio) que depende únicamente de las características del apantallamiento.

Generalmente, el coeficiente de fuga del apantallamiento S_s es el mejor indicador del comportamiento del apantallamiento del cable porque es independiente de la geometría de la línea externa. Sin embargo, las técnicas de medida permiten a menudo conocer directamente Y'_t en lugar de S_s . Una vez que Y'_t es conocido para una disposición de ensayo particular, el parámetro del apantallamiento del cable real puede determinarse por la expresión:

$$S_s = \frac{1}{j\omega C'_i} \frac{Y'_t}{C'_e} \quad (\text{B.7})$$

B.3 Importancia relativa de Z'_t e Y'_t

Las definiciones de la impedancia y de la admitancia de transferencia del apantallamiento del cable de las ecuaciones (B.5a) y (B.5b) descritas anteriormente se aplican a la vez a los cables sólidos tubulares y trenzados. Para un apantallamiento tubular sólido, el apantallamiento electrostático es muy superior al apantallamiento magnetostático y, en consecuencia, la impedancia de transferencia domina a bajas frecuencias. Esto ha inducido a algunos investigadores a despreciar la admitancia de transferencia en los problemas de acoplamiento CEM.

Para cables trenzados, se pone el acento en los mecanismos de acoplamiento que generan la impedancia y la admitancia de transferencia, debido a la penetración de los campos E y H a través de las aberturas del apantallamiento. Una vez más, a frecuencias bajas, el apantallamiento electrostático de la trenza es muy superior al apantallamiento del campo magnético, e Y_t es generalmente pequeño con relación a Z'_t . Sin embargo, cuando la frecuencia aumenta, ambos campos E y H pueden penetrar a través de las aberturas de la trenza. En este caso, los efectos inducidos en el conductor interno por las componentes de ambos campos pueden ser del mismo orden de magnitud. Para los apantallamientos que no están diseñados correctamente para excluir el campo E , el hecho de despreciar la admitancia de transferencia puede provocar factores aproximados de 2 errores en las respuestas internas estimadas.

ANEXO C (Informativo)**EQUIPO DE MEDIDA DE IMPULSOS IEMN-GA****C.1 Introducción**

Al paso de los años, se ha desarrollado un equipo específico para la medida de transitorios rápidos en los sistemas. Este equipo se divide en tres grandes categorías:

- los captadores diseñados para medir una respuesta transitoria;
- los enlaces de datos para la transmisión de informaciones de medida entre el punto de ensayo y una unidad de análisis;
- un dispositivo de registro transitorio capaz de almacenar los datos medidos.

Para cada uno de estos componentes, se ha aportado un esfuerzo considerable para optimizar su diseño y su funcionamiento. Se incluyen las siguientes consideraciones:

- ancho de banda suficiente para medir de manera precisa los transitorios rápidos inducidos por los IEMN-GA;
- distorsión de fase mínima que permite mantener la integridad de las formas de impulso medidas;
- pérdida mínima entre extremos en la cadena de medida para obtener una relación señal/ruido elevada;
- calibrado normalizado de sondas y captadores de medida.

Este anexo da informaciones básicas sobre los elementos claves de un sistema de medida de impulso IEMN-GA.

C.2 Captadores para medidas IEMN-GA**C.2.1 Captadores de campo B y H**

Los captadores utilizados para la medida del campo magnético transitorio son esencialmente pequeños bucles que pueden configurarse de manera que minimicen una eventual respuesta suplementaria inducida por el campo E en el captador. Todos los captadores crean una tensión en los bornes de los bucles proporcional a la velocidad de la variación temporal del flujo magnético que pasa a través de los bucles. Se les designa a menudo por el término de captador de punto B , porque responden efectivamente a la derivada del campo B .

La figura C.1 muestra varias configuraciones corrientes para estos bucles de medida. Las dos primeras (en la parte superior de la figura) se configuran para funcionar conjuntamente con un conductor de referencia que representa una plano de tierra. Pueden dar una indicación sobre la corriente de superficie inducida que circula en el conductor. Las otras están destinadas a funcionar fuera de un conductor de referencia, midiendo así la respuesta en “campo libre” del campo H .



Los captadores IEMN-GA del campo H presentan también otros tipos de configuraciones de bobina. La figura C.2 muestra un captador de bobina cilíndrica que presenta una sola hendidura en la que la tensión inducida se mide con dos cables coaxiales apantallados, dando una salida simétrica. La figura C.3 presenta las configuraciones de dos y cuatro entrehierros para la bobina cilíndrica.

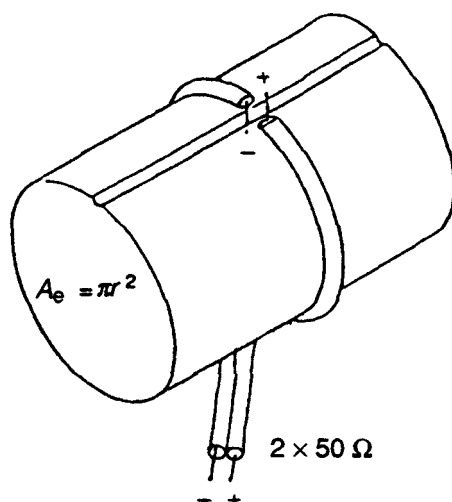


Fig. C.2 – Captador de hendidura única, de bobina cilíndrica [22]

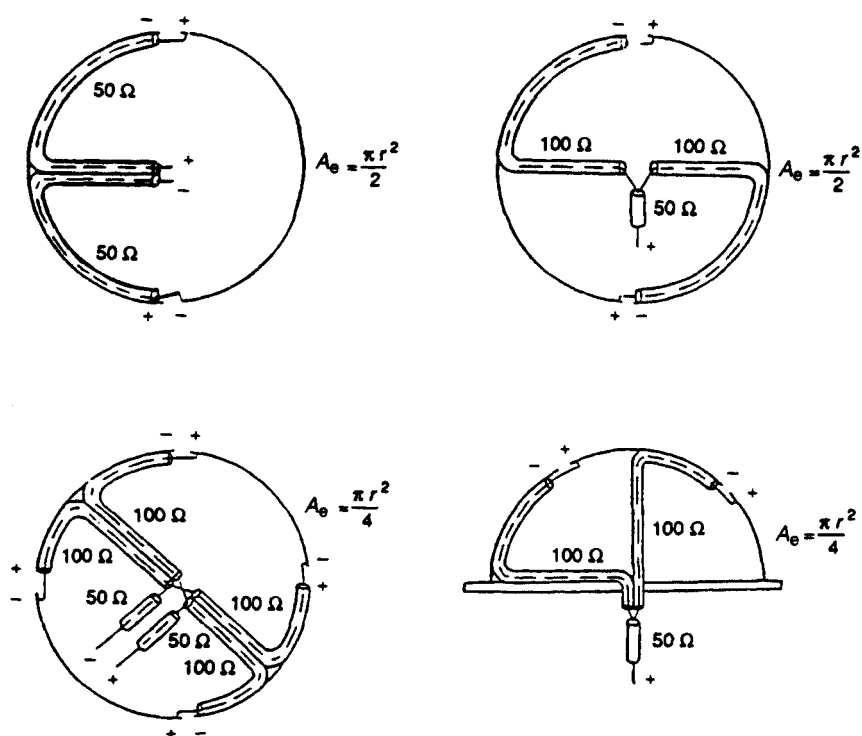


Fig. C.3 – Captadores de dos y cuatro hendiduras, de bobina cilíndrica [22]

El factor limitativo básico para este tipo de captadores es su tamaño, porque es preciso que el captador sea eléctricamente pequeño para funcionar correctamente en el marco de los ensayos IEMN-GA. Se dispone de grandes captadores (alrededor de 0,5 m de diámetro) para medir los campos B en la escala de 10 kHz a 30 MHz. Pueden utilizarse captadores más pequeños (alrededor de 10 cm de diámetro) para medidas de más alta frecuencia, generalmente con un ancho de banda efectiva de 9 kHz a 150 MHz.

C.2.2 Captadores de campo D y E

La configuración básica de un captador de campo E se presenta en la figura C.4. Las dos placas, cuando son sumergidas en un campo E de variación temporal, producen una corriente de cortocircuito proporcional a la velocidad de variación temporal del campo. Esta señal se integra a menudo (bien de manera pasiva, como se indica, o por un integrador activo) para dar una indicación del campo E real.

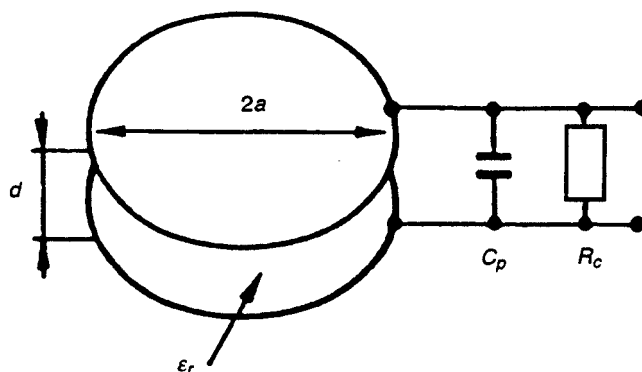


Fig. C.4 – Configuración eléctrica de un captador de campo E [22]

Las medidas del campo E realizadas en espacio libre utilizan generalmente una antena (o un captador) similar al mostrado en la figura C.5. Este captador mide la componente del campo E paralela a la dimensión longitudinal de la antena. Este tipo de antena puede ser de tamaño relativamente grande (alrededor de 1,4 m de longitud total), y este tamaño limita la respuesta máxima en frecuencia de la antena de alrededor de 30 MHz si no se dan curvas de calibración en función de la frecuencia. Sin embargo, si el fabricante de antenas da ese factor de calibración que permite establecer una correspondencia entre la tensión medida en los bornes de la antena y el campo E incidente de una frecuencia determinada, este tipo de antenas puede ser utilizado hasta frecuencias de alrededor de 200 MHz.

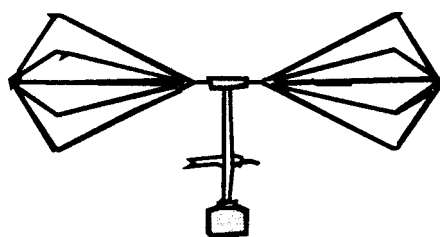


Fig. C.5 – Captador de campo E bicónico

Son posibles otros tipos de captadores más pequeños de campo E . La figura C.6 muestra un captador de dipolo esférico utilizado para medir el campo E en una superficie conductora. Los captadores más grandes de este tipo presentan una frecuencia máxima de alrededor de 45 MHz con una capacidad de medida del tiempo de subida de alrededor de 7,4 ns. Las unidades más pequeñas de este tipo presentan una frecuencia máxima de 150 MHz y un tiempo de subida de 2,3 ns.

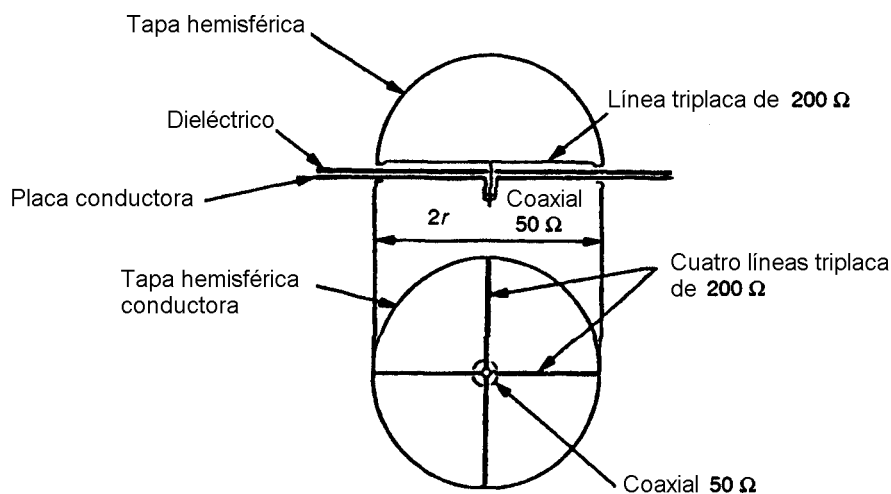


Fig. C.6 – Captador de campo E dispuesto sobre un plano de tierra conductor [22]

Otros tipos de captadores del campo E presentan formas de sección transversal bastante especiales, como se muestra en la figura C.7. Se trata del captador de dipolo cónico asintótico (ACD) diseñado para dar una respuesta conocida por una simple medida de un factor geométrico. Esta “calibración por la regla” es posible únicamente para un número limitado de formas de antena.

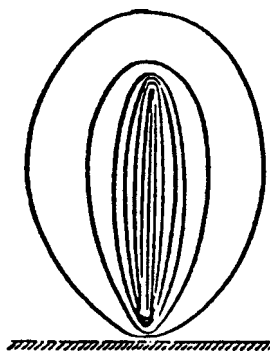


Fig. C.7 – Formas equipotenciales de un captador de campo E de diseño óptimo [22]

C.2.3 Sondas de corriente

Las sondas (o captadores) de corriente son esencialmente pequeños transformadores fijados en un cable que transporta una corriente y producen una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable. El funcionamiento de estos dispositivos es similar al de una bobina Rogowski, representada en la figura C.8.

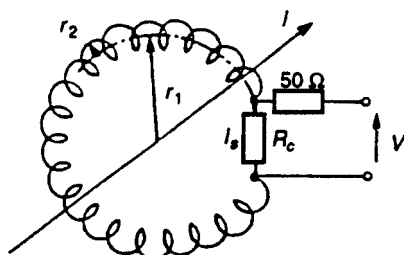


Fig. C.8 – Bobina Rogowski utilizada para medidas de corriente [22]

Generalmente estas bobinas forman un bucle de una vuelta realizado en un material de gran permisividad para aumentar la sensibilidad de la medida. La figura C.9 muestra esta configuración, en la que es inducida una tensión en la hendidura del toroide de alta permeabilidad por la corriente en un hilo que atraviesa el orificio de la sonda.

Las sondas que utilizan puntos de toma de tensión múltiples, como se indica en la figura C.10, constituyen ejemplos típicos de estos dispositivos. Las versiones de gran formato de estas sondas tienen un ancho de banda de 100 kHz a 100 MHz. Las versiones más reducidas de estas sondas son del tipo “de pinza” y pueden funcionar generalmente de 200 kHz a 300 MHz.

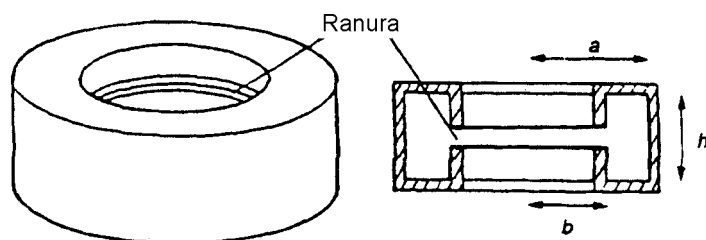


Fig. C.9 – Sonda de corriente tórica realizada en un material magnético [22]

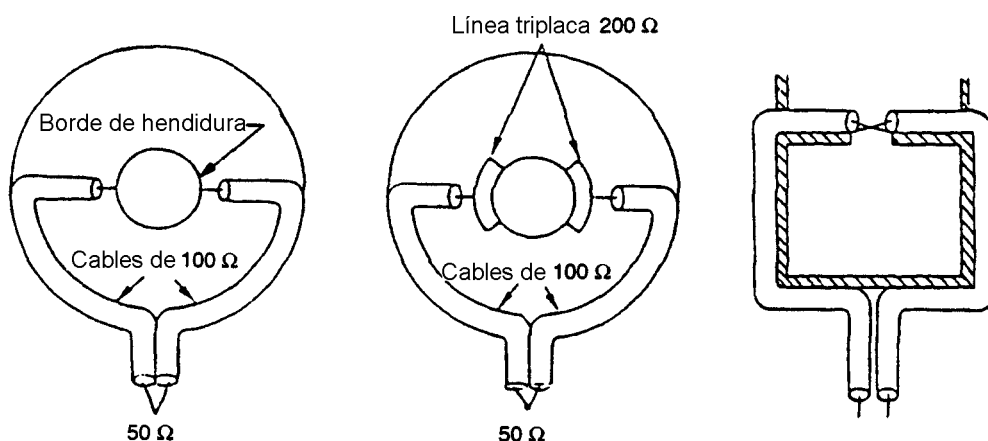


Fig. C.10a – Asimétrica en dos puntos

Fig. C.10b – Asimétrica en 4 puntos

Fig. C.10c – Toma simétrica

Fig. C.10 – Puntos de toma de tensión en los bordes de la sonda tórica [22]

C.3 Transmisión de la señal

Es preciso que las respuestas medidas a partir de los captadores sean transmitidas entre el captador y el equipo de medida. La técnica recomendada para ello consiste en emplear enlaces por fibra óptica, porque ejercen una influencia mínima en el entorno EM que envuelve el equipo de ensayo.

C.3.1 Enlaces por fibra óptica

Se utilizan numerosos métodos diferentes para transmitir informaciones en los ensayos IEMN-GA: por ejemplo hilos, cables coaxiales, guías de onda y radio. Para una transmisión de señal de calidad superior, es conveniente utilizar conexiones eléctricas cableadas entre los captadores y los digitalizadores de transitorios. Sin embargo, estos cables pueden también recoger una parte de la señal IEMN-GA y corromper las respuestas de los captadores. Además, la presencia de cables eléctricos largos en el interior de una instalación puede deformar los campos EM normales y puede incluso introducir un camino de acoplamiento EM por inadvertencia.

El peso es uno de los principales inconvenientes de los cables coaxiales: los cables RG14 y RG19 pesan respectivamente 350 kg/km y 1 100 kg/km: un cable monofibra tipo pesa solamente 12 kg/km. Esta diferencia puede llegar a ser mucho más importante en los cables multicanales. La inmunidad al ruido presenta también un problema para los cables coaxiales. Son sensibles a los campos eléctricos y magnéticos generados por las máquinas, el alumbrado o los IEMN-GA. Los bucles de tierra y las oscilaciones presentan también graves problemas potenciales en los sistemas de cables coaxiales.

Debido a estas dificultades, se recomienda a menudo la utilización de enlaces por fibra óptica para los ensayos IEMN-GA. La utilización de estos enlaces elimina los problemas de filtrado y la toma de tierra, y reduce en algunos milímetros los tamaños de abertura para los conectores que atraviesan la estructura del apantallamiento. Otra ventaja: las fibras no presentan casi ninguna interferencia; incluso si la luz es radiada por una fibra, no puede volver a ser capturada por otras fibras.

La figura C.11 muestra un sistema de transmisión por fibra óptica monocanal. Generalmente, existen en realidad dos canales: uno para la transmisión de la señal y otro para el control de los ajustes de un atenuador de señal situado en la unidad del emisor, cerca de los captadores.

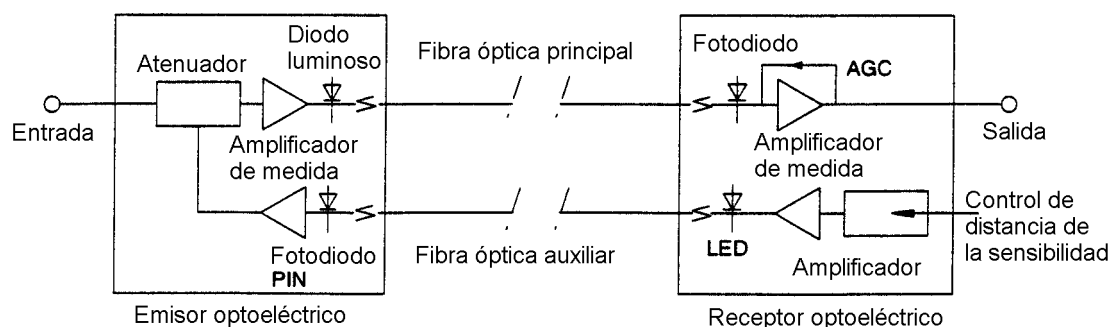


Fig. C.11 – Ejemplo de sistema de transmisión de fibras ópticas monocanal [22]

La figura C.12 compara las características de atenuación y de ancho de banda de dos cables de tipo RG con las de fibras típicas. El efecto de la capa superficial en un cable coaxial provoca un aumento de la atenuación en función de la raíz cuadrada de la frecuencia, comenzando generalmente por debajo de 1 MHz. En consecuencia, para líneas coaxiales muy largas, aparecen efectos de dispersión importantes, que es preciso corregir con filtros.

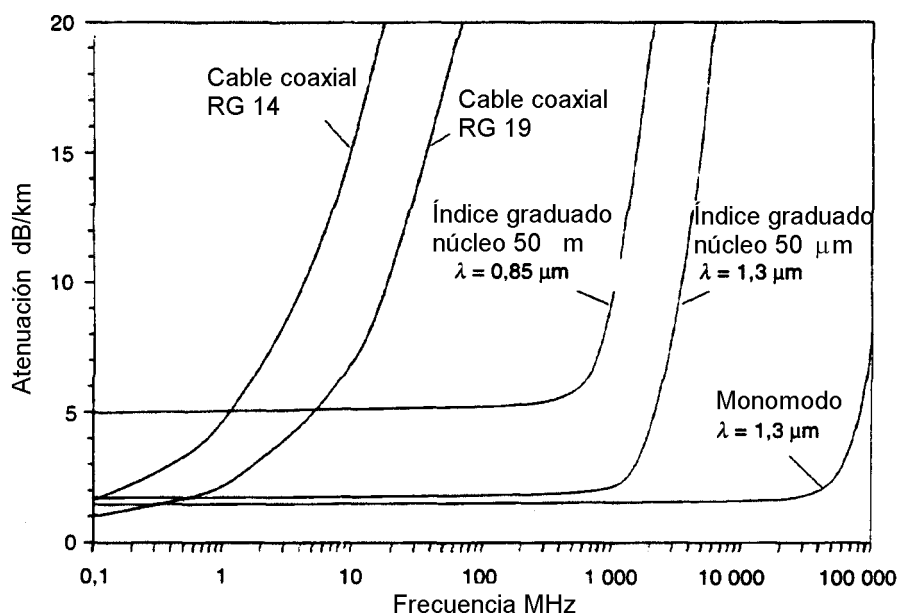


Fig. C.12 – Atenuación de líneas coaxiales y de cables de fibra óptica en función de la frecuencia

C.3.2 Transductores de fibra óptica

Es preciso que los transductores estén situados en cada extremo del cable de fibra óptica para convertir las señales eléctricas en haces luminosos modulados, y después reconvertir la luz en señales eléctricas. Estas unidades pueden tomar varias formas, pero las unidades más modernas comprenden un controlador por microprocesador y un sistema de bus interno que resguarda, alimenta y controla diferentes módulos. Eso permite adaptar el sistema a aplicaciones específicas.

Un sistema de conector típico comprende un módulo básico que se adapta a una unidad principal, un cable de fibra óptica para las señales, un cable de fibra óptica para el control, si fuere necesario, uno o dos módulos apantallados (campos electromagnéticos superiores a 200 V/m de ondas no moduladas y 100 kV/m de impulsos) de pequeño tamaño y alimentados por batería, así como uno o dos cargadores de batería. Cada conector puede ser manejado individualmente por el sistema de control del microprocesador en el procesador central. La mayor parte de los módulos se controlan a distancia por un enlace óptico de control especial. Estos módulos se alimentan por baterías que aseguran un funcionamiento de más de 8 h continuadas. La longitud máxima del enlace óptico para los modelos normalizados es de 1 Km.

Existe un amplio rango de conectores de fibras ópticas, que presentan una gran selección de modos de trabajo (adquisición, telemetría, estimulación, monitorización del campo EM, transmisiones audio y vídeo), escalas de frecuencias (desde la c.c. hasta 1 GHz) y una atenuación de la ganancia variable.

C.4 Detección y tratamiento de la señal

La señal detectada desde un transductor de fibra óptica es digitalizada, procesada y después archivada. Un cierto número de digitalizadores de transitorios diferentes está disponible actualmente en el mercado. Es conveniente que el digitalizador seleccionado pueda medir el frente de la forma de onda IEMN-GA más rápido posible. Generalmente, los requisitos de tiempo de subida son del orden de 1 ns. Además, es conveniente que el digitalizador posea un rango dinámico adecuada (número de bits en la representación de datos digitales) de manera que evite los errores de digitalización de las respuestas. Finalmente, es conveniente que el digitalizador posea una memoria suficiente para medir la respuesta transitoria completa, desde el principio al fin, sin requerir digitalizadores múltiples para comprobar partes diferentes de la misma forma de onda.

Las capacidades actuales de los ordenadores personales hacen inútil la utilización de ordenadores más antiguos, más grandes y más lentos, tradicionalmente utilizados para la adquisición y el análisis de datos, para los ensayos de impulso y de ondas no moduladas. Igualmente, los tratamientos de datos iniciales (trazado gráfico y corrección) de los datos brutos y el consiguiente análisis de extrapolación pueden realizarse en un PC utilizando programas de tratamiento de señal normalizados.

ANEXO D (Informativo)**EQUIPO DE ENSAYO DE ONDAS NO MODULADAS****D.1 Introducción**

Este anexo estudia el equipo y las técnicas de calibración necesarias para realizar un ensayo de ondas no moduladas. Una parte del equipo, tal como los captadores de campo y los enlaces por fibra óptica, es idéntica al equipo utilizado para los ensayos de transitorios. Sin embargo, otros elementos son diferentes tales como el analizador de red de ondas no moduladas y las antenas radiantes.

D.2 El sistema de antena

Son posibles varios tipos diferentes de antena radiante, en función de las polarizaciones deseadas y de la escala de frecuencias de funcionamiento. Para frecuencias comprendidas entre aproximadamente 1 MHz y 100 MHz, la antena presentada en la figura D.1a radia un campo E en la dirección transversal con relación a la antena, polarizada principalmente en horizontal. Para frecuencias inferiores, la eficacia de la radiación disminuye y, a la frecuencia máxima, el campo de radiación incluye lóbulos secundarios debido al importante tamaño eléctrico de la antena.

La antena está unida a tierra en los dos extremos, a través de una resistencia del orden de 400 Ω a 500 Ω . Este enlace eléctrico sirve para reforzar las características de radiación de baja frecuencia de la antena. La antena se alimenta en su cima por un amplificador de potencia unido por un cable coaxial. Es preciso que esta línea no equilibrada sea adaptada a la entrada de la antena equilibrada en la cima del poste dieléctrico de soporte por un transformador de equilibrio, denominado simetrizador de antena. Es preciso asegurar en lo que duran los ensayos, que el nivel de potencia del amplificador no sobrepase el nivel de potencia de funcionamiento asignado del simetrizador de antena.

Si se desea un campo E incidente vertical, se puede utilizar una antena vertical, como muestra la figura D.1b. Un conductor vertical se alimenta por una fuente de tensión entre la base de la antena y tierra, produciendo un campo E de polarización vertical. En baja frecuencia (es decir para frecuencias tales como $\lambda >$ longitud de la antena), la radiación de este tipo de antena es muy baja.

La figura D.1c muestra otro tipo de antena radiante, conocida como antena P x M. Aparece como una simple línea de transmisión alimentada en un extremo, que presenta una carga, en este extremo, igual a la impedancia característica de la línea. Esta línea presenta la propiedad útil de radiar un campo EM que posee una impedancia característica de exactamente 377 Ω - incluso a muy bajas frecuencias. Esta radiación se produce en el sentido "hacia atrás", es decir, a la derecha de la fuente en la figura D.1c. Sin embargo, esta antena es eficaz de esta manera únicamente para bajas frecuencias. Cuando la frecuencia comienza a aumentar de manera que $\lambda >$ la longitud de línea, el haz de la radiación comienza a desplazarse hacia delante y la antena llega a ser la conocida antena Beverage.

Para las antenas horizontales y verticales, es importante añadir una carga resistiva a lo largo de los cables. Esta resistencia sirve para amortiguar resonancias de antena naturales, creando así un espectro de campo radiado más liso. Además, eligiendo correctamente el nivel de impedancia de carga en la antena, la relación E/H de los campos cerca de la antena puede estar más próxima a la de una onda plana en espacio libre, es decir 377 Ω .

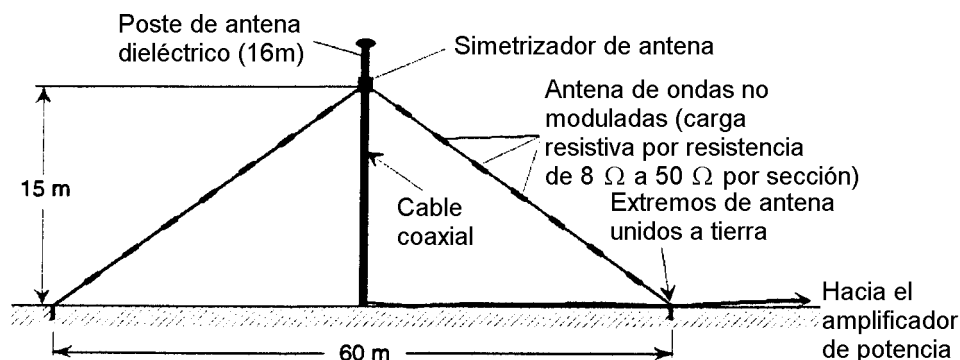


Fig. D.1a – Antena de polarización horizontal

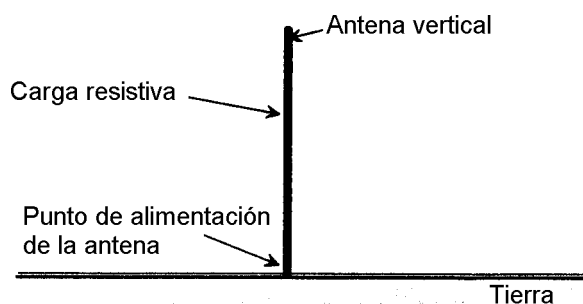


Fig. D.1b – Antena de polarización vertical

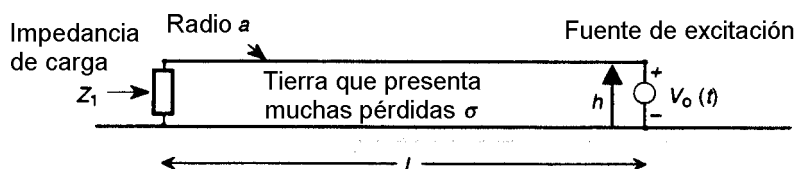


Fig. D.1c – Antena P x M

Fig. D.1 – Diversas antena utilizadas para ensayos de ondas no moduladas

Dado que la presencia del cable de alimentación de la antena puede perturbar los campos radiados, es conveniente tener un cuidado especial en emplazar el cable cerca de la antena. Para obtener resultados óptimos, se recomienda que el cable baje directamente a lo largo del poste soporte, y después salga de la antena en una dirección perpendicular a la radiación transversal de la antena. Perlas de ferrita situadas regularmente en el exterior del cable coaxial pueden ayudar a eliminar los efectos de acoplamiento indeseables en este cable.

Se utilizan antenas de ondas no moduladas para generar un campo no modulado incidente en el sistema sometido a ensayo que se aproxima a una onda plana. Como se indica en la figura D.2, el ángulo de incidencia del campo IEMN-GA simulado, designado por el ángulo ψ , se define por el ángulo comprendido entre la cima de la antena y la instalación de ensayo. Así, el emplazamiento de la antena está relacionado con el ángulo de incidencia de IEMN-GA simulado.

Para que el campo EM simulado aparezca como una onda plana, es conveniente situar la antena lo mas lejos posible de la instalación. Más específicamente, es conveniente que la distancia d en la figura D.2 sea superior a las dimensiones típicas de la instalación de ensayo. Además, es conveniente que la distancia d sea superior a las dimensiones de la antena. A menudo estos requisitos no pueden ser respetados debido al gran tamaño de la instalación. Es conveniente observar que esta dificultad en el emplazamiento de la antena se presenta también para los ensayos de impulso.

Si la instalación de ensayo es muy grande y la antena no puede ser colocada de manera que d sea superior a la dimensión de la instalación, el ensayo de ondas no moduladas puede realizarse empleando el concepto PARTES estudiado en el anexo A, lo que implica determinar los principales puntos de entrada (PdE) de la instalación y de colocar la antena de manera que esta parte de la instalación esté correctamente iluminada por la excitación de la onda plana simulada que proviene de la antena.

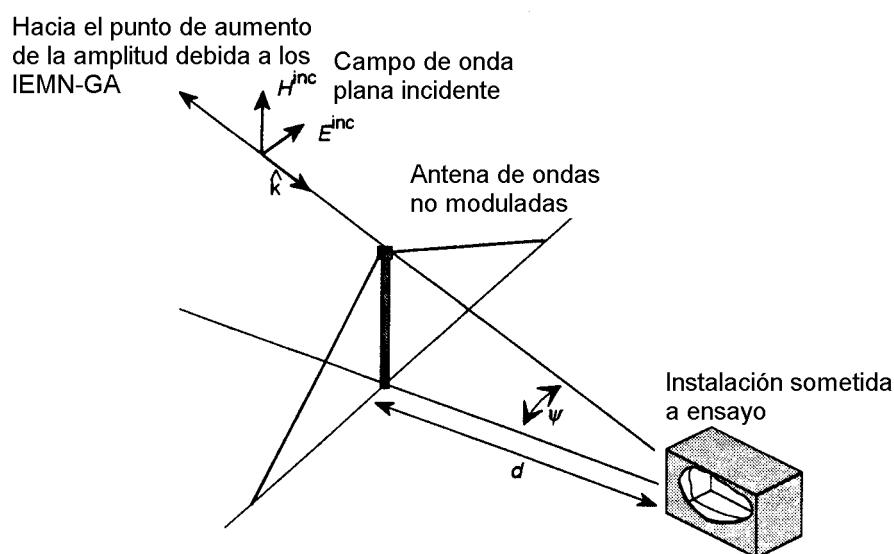


Fig. D.2 – Relación entre la antena de ondas no moduladas y el campo IEMN-GA incidente

Además del propio emplazamiento de la antena, es necesario colocar el amplificador de potencia de la antena, la unidad del moto-generator y el equipo de medida (analizador de red). Como se indicó anteriormente, es conveniente elegir los emplazamientos de este equipo de manera que los campos EM producidos por la antena no provoquen una interacción importante con el equipo y no produzcan perturbaciones en los resultados de medida. Eso implica que todos los cables conductores caminen cerca del suelo y en una dirección ortogonal con relación a los campos E producidos por la antena. En lo posible, se recomienda colocar el equipo de medida fuera de la instalación o en un recinto apantallado separado para minimizar los efectos de la interacción directa EM con los campos de la antena.

D.3 Amplificador de potencia

El amplificador de potencia toma como entrada una señal no modulada de bajo nivel del analizador de red, la amplifica para alcanzar un nivel de potencia del orden de 50 W a 100 W, y después envía la señal en dirección a la antena de ondas no moduladas por un cable coaxial de 50 Ω . Un amplificador típico funciona entre una frecuencia baja de 10 kHz y una frecuencia elevada de 250 MHz. La frecuencia de la señal dada al amplificador es barrida en un rango de frecuencias por el analizador de red. Se recomienda que el analizador no sobremodule el amplificador en su entrada, y que la potencia de salida no provoque sobremodulación del simetrizador de antena, lo que provocaría un eventual deterioro de las bobinas del simetrizador.

El amplificador de potencia está situado cerca de la base de la antena, de manera que el cable de alimentación entre el amplificador y el simetrizador de antena sea lo más corto posible.

D.4 Receptor (analizador de red)

El receptor de este sistema es generalmente un analizador de red. Para esta aplicación, el analizador de red es barrido entre aproximadamente 10 kHz y 200 MHz en un modo controlado por el ordenador conectado al analizador por el bus IEEE. El analizador de red da una salida sinusoidal de bajo nivel, igual a 50 Ω cuando barre las frecuencias designadas, lo que sirve para controlar el amplificador de potencia mencionado anteriormente.

Se utilizan dos canales de entrada en el analizador de red: uno es el canal de referencia que proviene del captador de referencia situado en el exterior de la instalación y el otro es el canal de medida conectado a un captador o una sonda de medida adaptados, normalmente situados en el interior de la instalación. Según se indica en la figura 22, en el apartado 5.1.2.1, es conveniente realizar estas conexiones del captador con transductores de fibra óptica, de manera que se elimine el acoplamiento eléctrico con el equipo de medida.

El analizador de red da una función de transferencia para la medida $T(\omega)$, que es una magnitud de valor complejo definida en cada frecuencia angular ω por una amplitud y una fase. La magnitud de la fase da información sobre los tiempos relativos de llegada de las respuestas en los captadores y debe conservarse para obtener medidas de ondas no moduladas de buena calidad. Frecuentemente, cuando se presentan resultados de ensayo de ondas no moduladas, sólo la amplitud de la respuesta es trazada gráficamente y estudiada. La fase también es importante, pero a menudo omitida en las discusiones.

D.5 Captadores de referencia y de respuesta

Para los ensayos de ondas no moduladas pueden utilizarse un gran número de captadores idénticos a los utilizados para los ensayos IEMN-GA de transitorios. El anexo C da información sobre estos captadores. El emplazamiento correcto del captador de referencia constituye un aspecto clave de la configuración de ensayo de ondas no moduladas. La medida del captador de referencia tiene como fin permitir relacionar los resultados medidos en la instalación con la ayuda de la antena de ondas no moduladas con la respuesta obtenida si la excitación fuese una onda plana incidente. Así, es necesario comprender como es excitado el captador de referencia.

Según se indica en la figura D.3, la respuesta medida por el captador de referencia incluye una contribución de la onda incidente y una parte reflejada por el suelo. Este campo resultante es el campo de excitación total en el captador. Si el captador de referencia es alejado de la antena de ondas no moduladas, puede suceder que los rayos directos y reflejados por el suelo que provienen de la cima de la antena (es decir de la fuente de control en la antena) tengan la misma longitud de paso que los elementos que contribuyen a la onda plana IEMN-GA incidente equivalente. En este caso, la respuesta del captador será fácilmente relacionada con la respuesta de una excitación de onda plana. Sin embargo, si el captador está demasiado próximo a la antena, la respuesta del captador en el caso de una onda no modulada es diferente de la de una excitación de onda plana. Según un método empírico general, es conveniente situar el captador de referencia a una distancia igual a varias longitudes de antena de la antena.

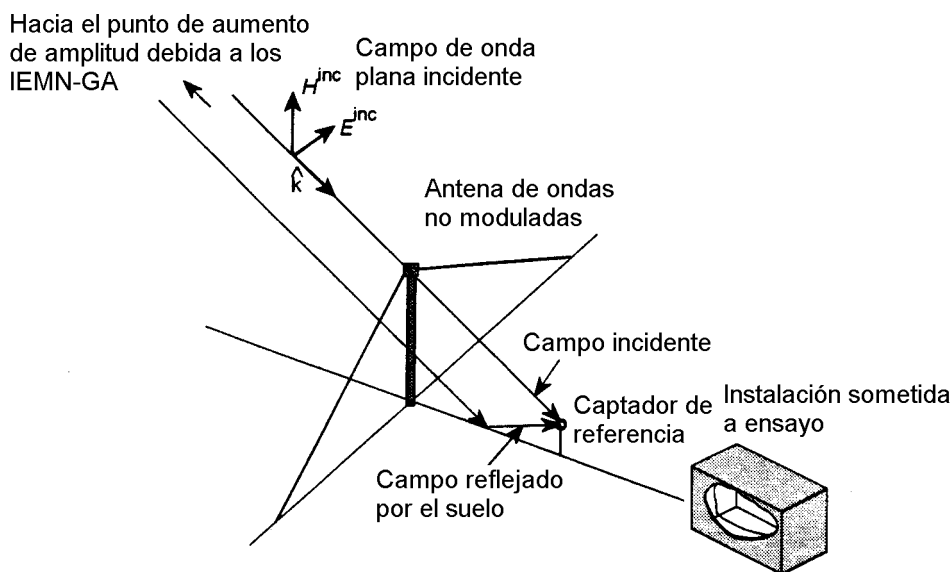


Fig. D.3 – Contribuciones de los campos incidentes y de los campos reflejados por el suelo a las excitaciones de un captador de referencia

Existe otra regla importante para el emplazamiento del captador de referencia: se recomienda no situarlo cerca de otras estructuras conductoras que puedan contaminar los campos EM locales, lo que implica no situar el captador de referencia demasiado cerca de la instalación de ensayo.

La figura D.4a muestra, a título de ejemplo, el espectro del captador de referencia del campo H medido, tomado en un ensayo real de ondas no moduladas. Esta respuesta ha sido tomada utilizando puntos de calibración regularmente espaciados y presenta un descenso muy rápido a frecuencias elevadas debido a las limitaciones del captador. Las resonancias en la respuesta se deben a la resonancia de antena y a las reflexiones que provienen de objetos próximos. El primer valor nulo en esta respuesta de campo total, debida a la reflexión en el plano del suelo, aparece alrededor de 200 MHz, y toma igualmente en cuenta el descenso del espectro de alta frecuencia.

La figura D.4b muestra la respuesta de la función delta de este espectro, obtenida tomando la transformada de Fourier inversa del espectro. Esta respuesta transitoria muestra claramente la respuesta inicial del captador, llegando con un retraso determinado por la geometría de la antena y del captador de referencia, así como las informaciones correspondientes a los cables de fibra óptica. Posteriormente, llegan impulsos más bajos en el captador. Estos han sido reflejados desde un edificio próximo y es conveniente eliminarlos, si es posible, alejando el captador del edificio.

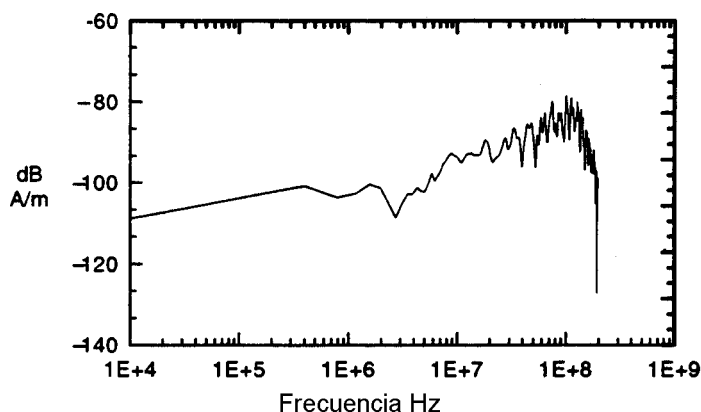


Fig. D.4a – Espectro del campo H medido

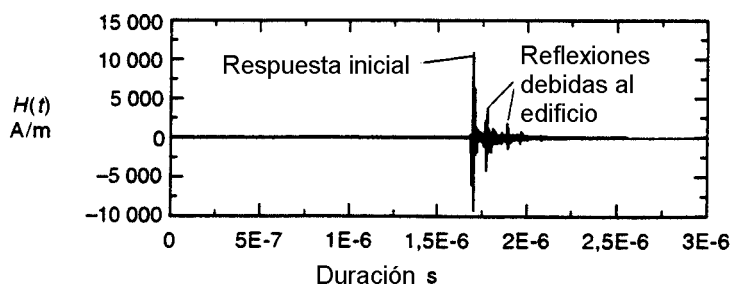


Fig. D.4b – Respuesta de la función delta calculada que proviene del espectro

Fig. D.4 – Espectro del campo H de referencia medido y su transformada de Fourier inversa

D.6 Sistema de fibras ópticas

Como en el caso de un ensayo transitorio, es necesario disponer de un sistema de fibras ópticas para extraer las señales de referencia y de respuesta del sistema y transmitir las al analizador de red. Las características de este sistema de transmisión se indican en el anexo C.

Después de haber determinado el emplazamiento del captador de referencia, es necesario contrastar la cadena de medida. Esta operación es importante porque corrige cualquier diferencia en las respuestas de amplitud del captador, pero suprime también los decalajes de fase indeseables en las respuestas. Estos decalajes de fase corresponden a los decalajes temporales en la respuesta transitoria, y pueden provocar errores de interpolación de datos si se presentan en los datos medidos.

La calibración se realiza situando el captador de medida al lado del captador de referencia y efectuando un barrido del espectro. La figura D.5a muestra los resultados de esa medida. El espectro de referencia en el proceso de calibración designado por $R_o(\omega)$ y el espectro de respuesta de calibración por $S_o(\omega)$, se define una función de transferencia entre los dos por:

$$T_o(\omega) = \frac{S_o(\omega)}{R_o(\omega)} \quad (D.1)$$

Esta función de transferencia derivada se muestra en la figura D.5b. Debido a que los dos captadores no son idénticos y están situados en emplazamientos ligeramente diferentes, la función de transferencia $T_o(\omega)$ no es igual a la unidad. Además, las diferencias de longitudes y características ópticas de los cables de fibra óptica pueden provocar variaciones de $T_o(\omega)$. Si los dos captadores son del mismo tipo, se recomienda que estas variaciones sean reducidas; variaciones importantes indican la presencia eventual de ondas estacionarias cerca del captador de referencia, lo que es preciso evitar.

Una vez que la función de transferencia de calibración $T_o(\omega)$ ha sido determinada, es conveniente efectuar una verificación del proceso de calibración, lo que implica una nueva medida de la respuesta del captador de referencia, designada por $R_1(\omega)$ y una nueva medida del captador de respuesta, $S_1(\omega)$. Con estas medidas, se define una nueva función de transferencia corregida por:

$$T(\omega) = \frac{S_1(\omega)}{R_1(\omega)} \frac{1}{T_o(\omega)} \quad (D.2)$$

Idealmente, esta nueva función de transferencia debería ser la unidad. Sin embargo, variaciones pequeñas en las medidas provocan diferencias. La figura D.6 muestra esta segunda función de transferencia y muestra que está efectivamente próxima a la unidad. Es conveniente utilizar este procedimiento y esta verificación de calibración para cada ensayo, y efectuar calibraciones regularmente. Es preciso que la función de transferencia de calibración $T_o(\omega)$ sea aplicada a todas las medidas de la función de transferencia realizadas utilizando los captadores calibrados y la configuración fija del sistema.

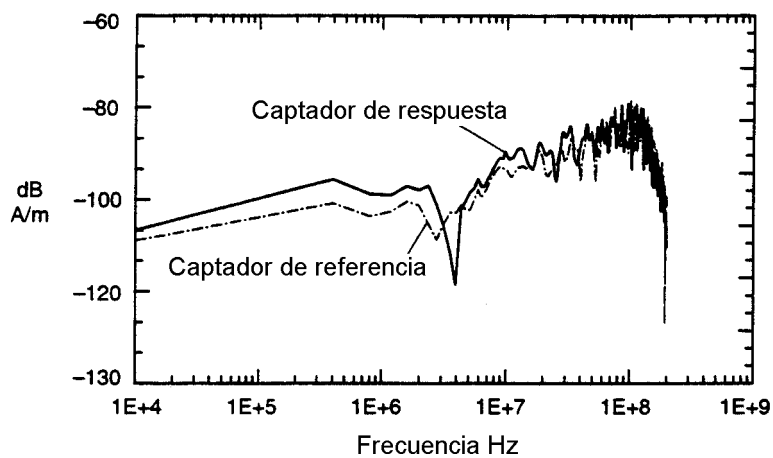


Fig. D.5a – Espectros del captador de referencia y de respuesta

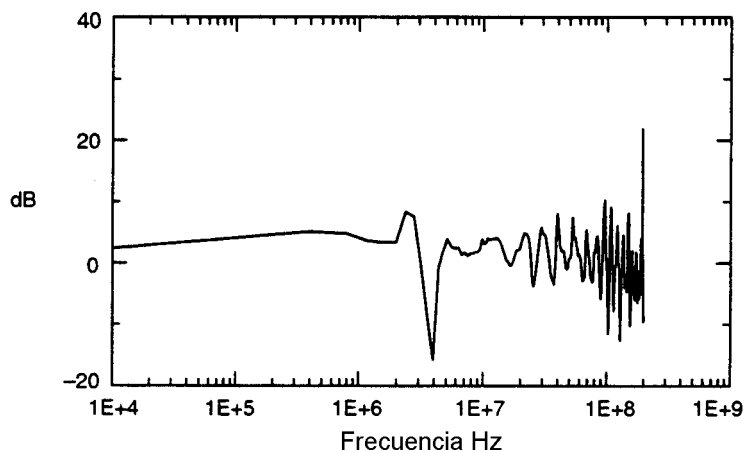


Fig. D.5b – Función de calibración derivada

Fig. D.5 – Respuestas medidas del captador y función de calibración

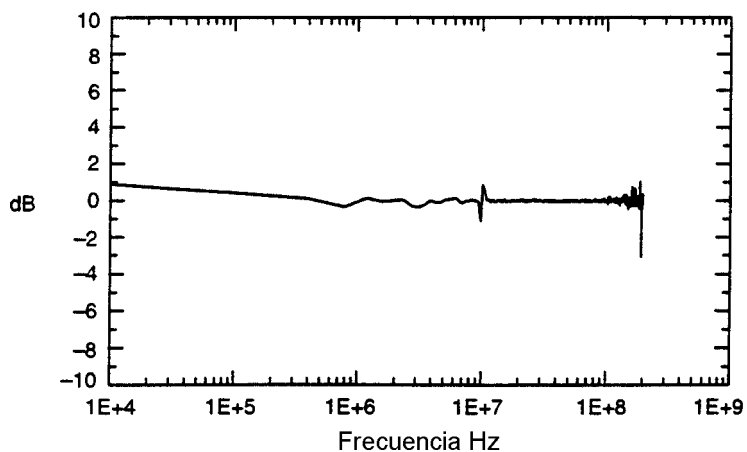


Fig. D.6 – Función de transferencia medida, corregida por el archivo de calibración

D.7 Limitaciones en las medidas

En el marco del desarrollo de un procedimiento de calibración para la cadena de medida, se recomienda recordar y tener en cuenta varios factores limitativos. El rango dinámico de las medidas puede limitarse por los elementos siguientes:

- ruido en el sistema de transmisión por fibra óptica;
- ancho de banda insuficiente del analizador de red;
- ajuste de la ganancia del amplificador.

Estas limitaciones pueden estar comprendidas y parcialmente suprimidas efectuando medidas del ruido del suelo apagando el amplificador, modificando los niveles de emisión de la antena por una variación de la ganancia del amplificador y modificando el ancho de banda del analizador de red.

ANEXO E (Informativo)

CARACTERIZACIÓN DE UN APANTALLAMIENTO PLANO PARA LA PROTECCIÓN IEMN-GA

E.1 Introducción

La protección de un equipo contra los efectos IEMN-GA se realiza a menudo utilizando los principios del apantallamiento electromagnético. Como se indica en la figura E.1, fuentes eléctricas o magnéticas localizadas de energía EM crean campos exteriores E y H cerca de un recinto apantallado. Debido a la reflexión y a la atenuación de estos campos en la proximidad del recinto, los campos interiores E y H se reducen en el interior del apantallamiento.

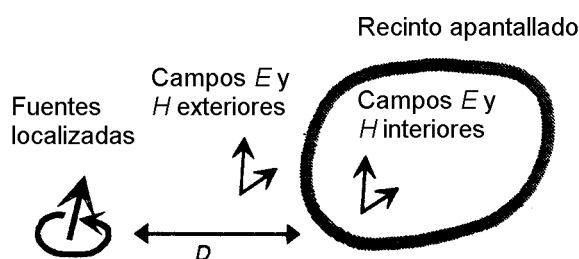


Fig. E.1 – Ejemplo de un problema de apantallamiento general

Es difícil caracterizar este problema en el caso más general, porque el apantallamiento no depende solamente de las características eléctricas del apantallamiento, sino también de la naturaleza y del emplazamiento de las fuentes de excitación. Por ejemplo, si la fuente externa es magnética por naturaleza (provocada por corrientes eléctricas que circulan en un bucle), los campos próximos a la fuente son principalmente magnéticos. Igualmente, si la fuente aparece como una corriente lineal que circula en un hilo delgado, los campos son principalmente eléctricos en su composición. Naturalmente, las ecuaciones de Maxwell dictan la coexistencia de los campos E y H (salvo en corriente continua), lo que implica un nivel de impedancia diferente para las dos fuentes – con la fuente magnética produciendo campos EM presentando una relación E/H baja, y las fuentes eléctricas produciendo campos que presentan una relación E/H elevada⁶⁾.

Lejos de la fuente ($D \gg \lambda$), la distinción entre las fuentes eléctricas y magnéticas se difumina y los campos se convierten en ondas electromagnéticas transversales radiantes (TEM) con una impedancia característica de $E/H = 377 \Omega$. Localmente, estos campos aparecen como una onda plana. La figura E.2 sintetiza el comportamiento de los campos que provienen de fuentes magnéticas y eléctricas y muestra el hecho de que a gran distancia, producen el mismo tipo de campo, es decir la onda plana.

6) Estrictamente hablando, el concepto de impedancia de campo se aplica únicamente en la zona de radiación (o campo “remoto”) en que los campos E y H son mutuamente ortogonales y situados en el plano transversal a la dirección de propagación. En esta zona, la impedancia de onda se define por $Z_c = |E|/|H|$. En el campo próximo, a distancias inferiores de varias longitudes de onda, los campos presentan una dependencia espacial compleja y no se aplica este tipo de definición transversal de la impedancia. Sin embargo, es posible considerar las amplitudes de los campos E y H en el campo próximo para llegar a un “nivel de impedancia” para los campos; esta magnitud será diferente, según que la fuente sea principalmente eléctrica o magnética.

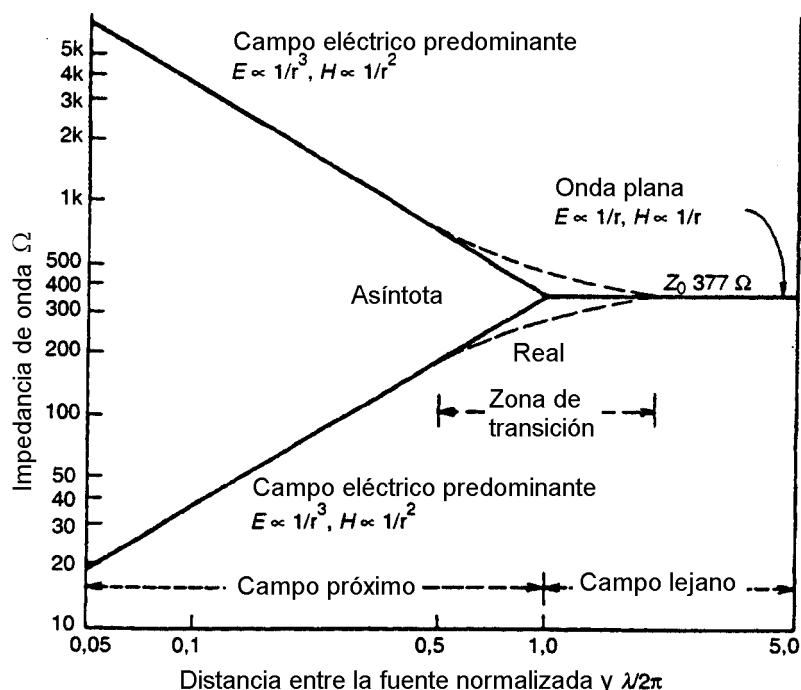


Fig. E.2 – Comportamiento de la relación de impedancia $|E|/|H|$ en función de la distancia con relación a la fuente [28]

La penetración de los campos EM en el recinto depende también de la naturaleza de los campos de excitación. Generalmente, para fuentes próximas del apantallamiento (es decir, para $D < \lambda$, o inversamente, a baja frecuencia) el campo E está muy atenuado por el recinto, pero el campo H es capaz de difundirse a través del apantallamiento. Así, los campos internos reales dependen de las características del apantallamiento y del tipo de fuente exterior.

Frecuentemente, este problema de apantallamiento se simplifica formulando las hipótesis siguientes:

- la fuente está muy alejada del apantallamiento ($D \gg \lambda$), de manera que el campo exterior sea una onda plana;
- el recinto de apantallamiento es una placa plana infinita.

Estos apantallamientos planos infinitos se utilizan a menudo para la modelización y para intentar interpretar los datos medidos en los ensayos IEMN-GA, principalmente debido a la simplicidad de las expresiones resultantes para la eficacia del apantallamiento. Es conveniente reconocer que cualquier valor de la eficacia al apantallamiento para estas estructuras puede, en ciertos momentos, sobrepasar en mucho el apantallamiento realmente obtenido en un apantallamiento realista, lo que es debido a que las estructuras reales no son infinitas en dos direcciones (como en el caso de una placa infinita) y a que las fuentes de perturbaciones no son realmente ondas planas.

No obstante, un examen del apantallamiento de una placa plana es instructivo, porque muestra claramente la relación entre la resistividad del material de apantallamiento, la impedancia de superficie presentada en el campo incidente y la impedancia de transferencia en el lado apantallado. Este anexo propone una discusión correspondiente a este material básico para comprender mejor estos conceptos de apantallamiento.

E.2 Geometría del problema

La figura E.3 muestra el problema a estudiar en este anexo. Una placa de magnitud infinita, de conducción infinita, de espesor d es iluminada por una onda plana electromagnética incidente. Este campo induce la circulación de una densidad de corriente volumétrica J en el material, y esta corriente radiada de nuevo, produce un campo reflejado que se propaga en la dirección de la fuente original de los campos, más un campo transmitido que penetra en la región “protegida” en el lado opuesto de la placa. Si la placa fuera perfectamente conductora, el campo incidente entero sería reflejado, sin campo penetrante. Sin embargo, en un caso real que implica una placa de conductividad finita, existe un campo penetrante, y es deseable desarrollar expresiones que permitan calcular este campo penetrado en términos de espesor de apantallamiento, de conductividad eléctrica y otros parámetros pertinentes.

En este tipo de problema, la parte de campo que penetra en la región protegida depende de la polarización y del ángulo de incidencia ψ del campo incidente. Para simplificar, se supone que el campo incidente es incidente de forma perpendicular con relación a la placa (es decir $\psi = 0$), de manera que los factores de apantallamiento vienen a ser independientes de los ángulos de incidencia.

El objetivo del análisis presentado aquí es, en consecuencia, sintetizar las expresiones analíticas que puedan ser utilizadas para predecir los campos EM que penetran en la región apantallada.

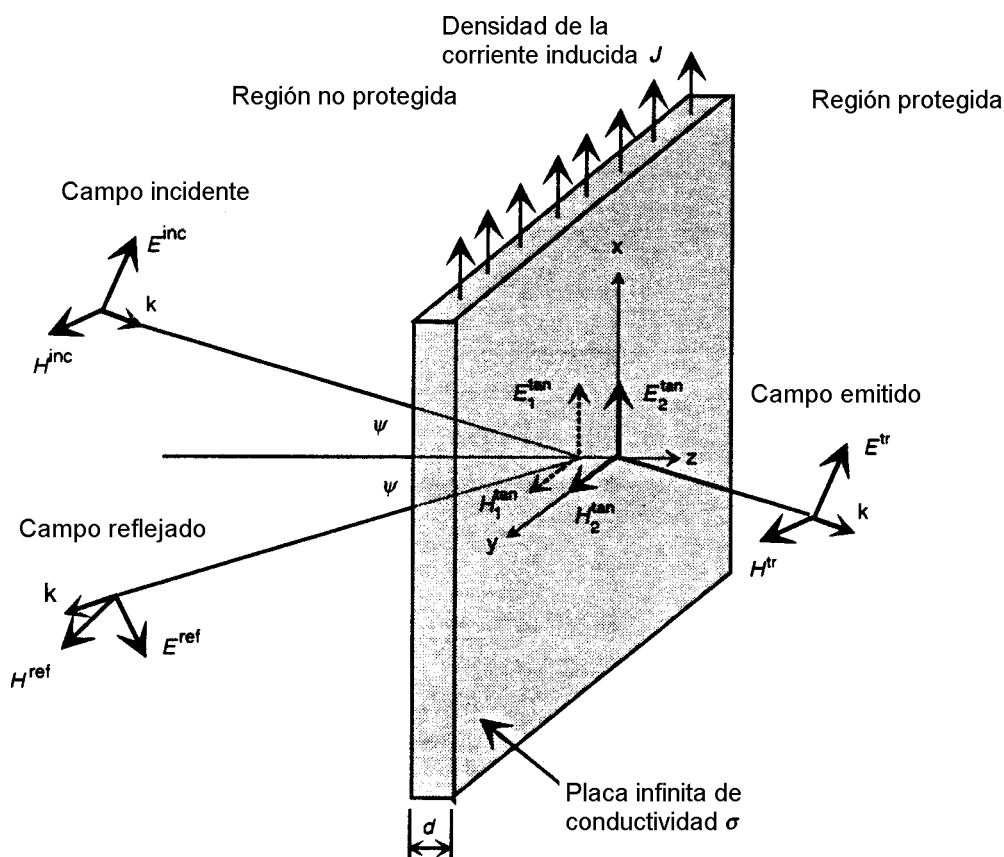


Fig. E.3 – Placa conductora de espesor d y de extensión infinita que sirve de barrera electromagnética

E.3 Representación del circuito equivalente

El comportamiento de los campos EM mostrado en la figura E.4 puede describirse utilizando un circuito de dos accesos equivalentes (véase la figura E.4). La placa conductora, en el marco de este problema, se representa por un circuito lineal de dos accesos, en el que los campos E y H tangenciales en el lado no apantallado se relacionan de manera lineal a las magnitudes de los campos correspondientes en el lado apantallado por una ecuación matricial. En la figura E.4a, la excitación se da por una fuente de tensión en serie, dada por el campo E incidente E_{inc} , y por una fuente de corriente en paralelo dado por el campo magnético incidente, H_{inc} . Las impedancias de estas fuentes (es decir la relación entre E y H) corresponden a la impedancia característica en espacio libre, Z_c , lo que se representa por el elemento de impedancia en el circuito fuente.

La figura E.4b muestra la representación equivalente para la excitación de este circuito. La fuente de corriente en paralelo puede transformarse en fuente de tensión utilizando una transformación de Norton a Thevenin, y la relación $E_{inc} = Z_c H_{inc}$ puede utilizarse para obtener la fuente de tensión equivalente de $2 E_{inc}$. Una transformación similar puede utilizarse para obtener la fuente dual eléctricamente: una fuente de corriente de $2 H_{inc}$ en paralelo con la impedancia Z_c .

En el lado apantallado de la placa, el modelo contiene una impedancia de carga Z_c , que es igual a la impedancia característica en espacio libre. Con una u otra de las fuentes equivalentes presentadas en la figura E.4 que excitan la placa, se pueden desarrollar fórmulas adecuadas que permiten determinar los campos tangenciales E_2^{tan} y H_2^{tan} en el lado apantallado.

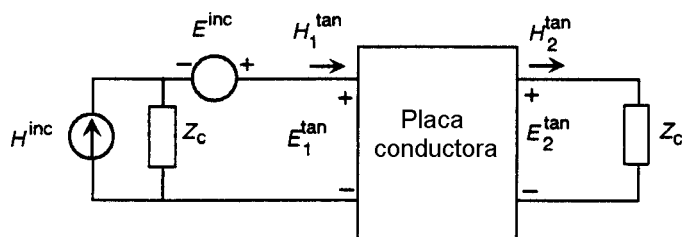


Fig. E.4a – Representación del circuito de la placa conductora

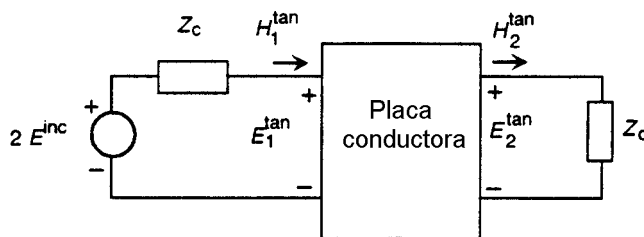


Fig. E.4b – Otra representación del circuito de la placa conductora

Fig. E.4 – Representación del circuito equivalente relativo al problema del apantallamiento

E.3.1 Representación de los parámetros en la cadena de apantallamiento

Un circuito general de dos accesos, como se indica en la figura E.5, puede representarse por un cierto número de relaciones matriciales diferentes:

- parámetros de impedancia en circuito abierto (Z);
- parámetros de admitancia en cortocircuito (Y);
- parámetros en cadena (o ABCD);
- parámetros de difracción (S);
- parámetros híbridos (h).

En este caso, los parámetros en cadena son los más útiles, porque relacionan las magnitudes de tensión y de corriente en uno y otro acceso del circuito. En referencia con la figura E.5, la relación de parámetros en cadena puede ser expresada por (véase [34]):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{E.1})$$

o, a la inversa

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (\text{E.2})$$

Es conveniente observar que, en estas fórmulas, es preciso que los parámetros ABCD cumplan la relación $AD - BC = 1$ para un sistema lineal bilateral.

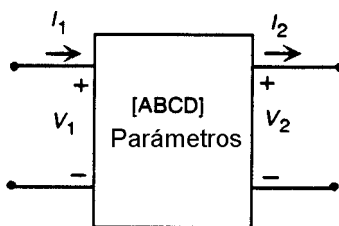


Fig. E.5 – Representación de un circuito con dos accesos

Si las variables V_1 e I_1 representan los campos E y H tangenciales en el lado iluminado de la placa ($E_2^{\tan}$ y $H_2^{\tan}$) y V_2 e I_2 designan los campos $E_2^{\tan}$ y $H_2^{\tan}$ en el lado apantallado, la referencia [7] ha desarrollado la representación de parámetro en cadena siguiente para la placa:

$$\begin{bmatrix} E_1^{\tan} \\ H_1^{\tan} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2^{\tan} \\ H_2^{\tan} \end{bmatrix} \quad (E.3)$$

$$= \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{j\omega\tau_d}) & R\sqrt{j\omega\tau_d} \sinh(\sqrt{j\omega\tau_d}) \\ (R\sqrt{j\omega\tau_d})^{-1} \sinh(\sqrt{j\omega\tau_d}) & \cosh(\sqrt{j\omega\tau_d}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2^{\tan} \\ H_2^{\tan} \end{bmatrix}$$

donde τ_d es el tiempo de difusión y R es la resistencia de superficie de la placa en corriente continua (en ohmios), dado por:

$$\tau_d = \mu\sigma d^2 \quad y \quad R = \frac{1}{\sigma d} \quad (E.4)$$

En estas fórmulas, d es el espesor de la placa, $\sigma = 1/\rho$ es la conductividad eléctrica del material y μ es la permeabilidad de la muestra.

E.3.2 Respuestas del circuito

E.3.2.1 Fórmula relativa a los campos de superficie. Utilizando las técnicas de análisis de circuitos normales, es posible determinar las respuestas para E y H en cualquier punto. Más específicamente, los campos de superficie en el lado iluminado de la placa pueden ser evaluados por:

$$E_1^{\tan} = \frac{(AZ_c + B)}{Z_c (A + Z_c C) + (B + Z_c D)} 2E^{\text{inc}} \quad (E.5)$$

y

$$H_1^{\tan} = \frac{(CZ_c + D)}{Z_c (A + Z_c C) + (B + Z_c D)} 2E^{\text{inc}} \quad (E.6)$$

donde A , B , C y D son los parámetros en cadena de la placa definidos en la ecuación (E.3).

Son instructivos los casos límite de las ecuaciones (E.5) y (E.6). Cuando la conductividad de la placa desaparece o, de manera equivalente, si $d = 0$, los parámetros en cadena toman los valores $A = 1$, $B = 0$, $C = 0$, $D = 1$, y estas ecuaciones se reducen en el caso de espacio libre donde:

$$E_1^{\tan} = E^{\text{inc}} \quad y \quad H_1^{\tan} = \frac{1}{Z_c} E^{\text{inc}} \quad (E.7)$$

Otro caso interesante se produce cuando la placa llega a ser perfectamente conductora (es decir $\sigma \rightarrow \infty$). En este caso, los parámetros en cadena son $A = 1$, $B = 0$, $C = \infty$, $D = 1$ y los campos en las ecuaciones (E.5) y (E.6) toman los valores requeridos:

$$E_1^{\tan} = 0 \quad y \quad H_1^{\tan} = \frac{2}{Z_c} E^{\text{inc}} = 2H^{\text{inc}} \quad (E.8)$$

en la superficie del conductor.

E.3.2.2 Fórmula relativa a los campos penetrantes. De forma similar, los campos penetrantes en la región apantallada, y , pueden determinarse por un análisis del circuito. Estos campos toman la forma siguiente:

$$E_2^{\tan} = \frac{Z_c}{Z_c (A + Z_c C) + (B + Z_c D)} 2E^{\text{inc}} \quad (\text{E.9})$$

y

$$H_2^{\tan} = \frac{1}{Z_c (A + Z_c C) + (B + Z_c D)} 2E^{\text{inc}} \quad (\text{E.10})$$

Las verificaciones de estos campos para los casos límite descritos en el apartado E.3.2.1 indican que los campos no llegan a ser campos incidentes en el espacio libre para ninguna de las placas presentes y para una placa perfectamente conductora, los campos son nulos, lo que indica un apantallamiento perfecto.

E.3.2.3 Impedancia de superficie. Aplicando las fórmulas de campo generales de las ecuaciones (E.5) y (E.6), es posible desarrollar una fórmula relativa a la impedancia de superficie en el lado iluminado de la placa. Esta magnitud es útil en la medida en que permite el análisis de los problemas en el lado iluminado de la placa sin necesitar un análisis posterior de los campos en el interior de la placa o más allá en la región apantallada. Esta impedancia se define como la relación de E y H en la superficie:

$$Z_s = \frac{E_1^{\tan}}{H_1^{\tan}} = \frac{(AZ_c + B)}{(Z_c C + D)} (\Omega) \quad (\text{E.11})$$

Para una placa delgada de conductividad finita de baja frecuencia, los parámetros en cadena son $A = 1$, $B = 0$, $C = 1/R$ y $D = 1$. En este caso, la impedancia de superficie viene a ser:

$$Z_s = \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_c}\right)} \approx R (\Omega) \quad (\text{E.12})$$

en los casos en que la resistencia de superficie del material es muy inferior a la impedancia en espacio libre (377 Ω).

En frecuencia más altas, es preciso que los parámetros en cadena de la ecuación (E.11) sean evaluados utilizando la ecuación (E.3). La expresión general para Z_s será:

$$Z_s = \frac{(Z_c \cosh \sqrt{j\omega\tau_d} + R\sqrt{j\omega\tau_d} \sinh \sqrt{j\omega\tau_d})}{\left(Z_c (R\sqrt{j\omega\tau_d})^{-1} \sinh \sqrt{j\omega\tau_d} + \cosh \sqrt{j\omega\tau_d}\right)} (\Omega) \quad (\text{E.13})$$

Para los numerosos tipos de materiales conductores en la escala de frecuencias IEMN-GA, es posible utilizar una simplificación en baja frecuencia según la ecuación (E.13):

$$Z_s \approx R\sqrt{j\omega\tau_d} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \equiv R_s + j\omega L_s \quad (\text{E.14})$$

donde la resistencia de superficie R_s y la inductancia L_s vienen dadas según la frecuencia $f = \omega/2\pi$ por:

$$R_s = \sqrt{\frac{2\pi f\mu}{\sigma}} \quad \text{y} \quad L_s = \frac{R_s}{2\pi f} \quad (\text{E.15})$$

La tabla E.1 presenta la resistencia de superficie para varios materiales.

Tabla E.1
Resistencia de superficie y parámetros eléctricos para los materiales seleccionados

Material	Conductividad σ S/m	Permeabilidad μ H/m	Profundidad de la capa superficial δ m	Resistividad de superficie R_s Ω
Plata	$6,17 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,0642 / \sqrt{f}$	$2,52 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Cobre	$5,80 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,066 / \sqrt{f}$	$2,61 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Aluminio	$3,72 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,826 / \sqrt{f}$	$3,26 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Latón	$1,57 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,127 / \sqrt{f}$	$5,01 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Estaño	$0,90 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,168 / \sqrt{f}$	$6,62 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Soldadura	$0,71 \times 10^7$	$4\pi \times 10^{-7}$	$0,185 / \sqrt{f}$	$7,73 \times 10^{-7} / \sqrt{f}$
Grafito	$3,0 \times 10^4$	$4\pi \times 10^{-7}$	$2,91 / \sqrt{f}$	$,15 \times 10^{-5} / \sqrt{f}$
Plexiglás	$5,1 \times 10^{-3}$	$4\pi \times 10^{-7}$	$7,05 \times 10^3 / \sqrt{f}$	$0,028 \sqrt{f}$

E.3.2.4 Impedancia de transferencia del apantallamiento. La impedancia de transferencia de la placa se define como la relación entre $E_2^{\tan} / H_1^{\tan}$ o, de manera equivalente, como la relación entre el campo E interno y la densidad de la corriente de superficie externa⁷⁾. Sus unidades son en ohmios. Un análisis de circuito de la figura E.4 da la fórmula siguiente para la impedancia de transferencia de la placa:

$$Z_t = \frac{E_2^{\tan}}{H_1^{\tan}} = \frac{Z_c}{(Z_c C + D)} (\Omega) \quad (\text{E.16a})$$

o de forma equivalente:

$$Z_t = \frac{Z_c}{\left(Z_c \left(R\sqrt{j\omega\tau_d} \right)^{-1} \sinh \sqrt{j\omega\tau_d} + \cosh \sqrt{j\omega\tau_d} \right)} (\Omega) \quad (\text{E.16b})$$

y para los buenos conductores en la escala de frecuencias IEMN-GA, se efectúa la aproximación siguiente:

$$Z_t \approx \frac{R\sqrt{j\omega\tau_d}}{\sinh \sqrt{j\omega\tau_d}} (\Omega) \quad (\text{E.17})$$

Es conveniente observar que en baja frecuencia, la impedancia de transferencia es $Z_t \approx R$, que es la resistencia de superficie en corriente continua de la placa. Es interesante observar que se trata del mismo valor que la impedancia de superficie de la ecuación (E.12). Así, una medida en baja frecuencia de la impedancia de superficie en la parte frontal de la placa puede servir para caracterizar la impedancia de transferencia de la placa en baja frecuencia.

7) Obsérvese que ésta es ligeramente diferente de la impedancia de transferencia de un cable, para el que la impedancia se define como la relación entre el campo E interno (fuente de tensión distribuida) y la corriente de apantallamiento *total*. En este caso, la impedancia de transferencia presenta las unidades en ohmios/m.

E.3.2.5 Admitancia de transferencia. La admitancia de transferencia de la placa plana se define por:

$$Y_t = \frac{H_2^{\tan}}{E_1^{\tan}} = \frac{1}{(Z_c A + B)}$$

$$= \frac{1}{(Z_c \cosh \sqrt{j\omega\tau_d} R \sqrt{j\omega\tau_d} \sinh \sqrt{j\omega\tau_d})} \quad (\text{S}) \quad (\text{E.18})$$

Para una placa delgada de conductividad finita a baja frecuencia, los parámetros en cadena son $A = 1$, $B = 0$, $C = 1/R$ y $D = 1$ y, en esta admitancia de transferencia, la impedancia viene a ser $Y_t \approx \frac{1}{Z_c} = 0,0027 \quad (\text{S})$.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEI 61000-4-20 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida. Celdas TEM*. Publicación básica de CEM*
- [2] CEI 61000-4-25 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-25: Técnicas de ensayo y de medida. Requisitos IEMN-GA y métodos de ensayo para equipos y sistemas*. Publicación básica de CEM*
- [3] CEI 61000-2-10 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-10: Entorno. Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones conducidas*. Publicación básica de CEM
- [4] CEI 61000-4-24 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-24: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de ensayo para los dispositivos de protección para perturbaciones conducidas IEMN-GA*. Publicación básica de CEM

* Pendiente de edición.

Referencias generales EMP:

- [5] Baum, C.E., “EMP Simulators for Various Types of Nuclear EMP Environments: An Interim Categorization”, IEEE TRANS. EMC, Vol. EMC-20, No. 1, Feb. 1978.
- [6] Bell Laboratories, “EMP Engineering and Design Principles”, Technical Publications Department, Bell Laboratories, Whippany, NJ. 1975.
- [7] EMP Interaction: “Principles, Techniques and Reference Data”, K.S.H. Lee, editor, Hemisphere Publishing Co. New York, 1989.
- [8] Ghose, R., “EMP Environment and System Hardness Design”, DWCI Publication, Gainesville, VA, 1984.
- [9] Joehl, W., “A General and Systematic Survey of NEMP Protection Measures”, Research Institute for Protective Construction (FMB), Zurich, Rep. FMB 78-1, Jan. 1978.
- [10] Joint Special Issue of the Nuclear electromagnetic Pulse, IEEE Trans EMC, Vol. EMC-20, No. 1, Feb. 1978.
- [11] Vance, E.F., “Electromagnetic-Pulse Handbook for Electric Power Systems”, Report DNA 3466F, Defense Nuclear Agency, Washington, D.C., Feb. 4, 1975.

Topología electromagnética

- [12] Baum, C.E. “Electromagnetic Topology for the Analysis and Design of Complex Electromagnetic Systems”, pp. 467-547 in *Fast Electrical and Optical Measurements*, Vol. I, eds. I.E.Thompson and L.H. Luessen, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986.
- [13] Baum, C.E., “Electromagnetic Topology: A Formal Approach to the Analysis and Design of Complex Electronic Systems”, of the 4th Symposium and Technical Exhibition on EMC Zurich, pp. 209-214, March 1981.
- [14] Baum, C.E., “The Role of Scattering Theory in Electromagnetic Interference Problems”, in *Electromagnetic Scattering*, P.L.E. Uslenghi, editor, Academic Press, 1978.
- [15] Karlsson, T., “The Topological Concept of a Generalized Shield”, AFWL Interaction Note 461, Kirtland AFB NM, Jan. 1988.

- [16] Karlsson, T., "On Grounding – Practical Procedure Based on Electromagnetic Theory", Proceedings of the 9th International Zurich Technical Exhibition on EMC, 3-5 March, 1987.
- [17] Tesche, F.M., "Topological Concepts for Internal EMP Interaction", IEEE Trans. EMC, 20 (1), Feb. 1978.
- [18] Tesche, F.M., "Introduction to Concepts of Electromagnetic Topology as Applied to EMP Interaction with Systems", NATO/AGARD Lecture Series Publication 144, Interaction Between EMP, *Lightning and Static Electricity with Aircraft and Missile Avionics Systems*, May 1986.
- [19] Vance, E.F., "EMP Hardening of Systems", Proceeding of the 4th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 10-12, 1981.
- [20] Vance, E.F., and W. Graf, "The Role of Shielding in Interference Control", IEEE trans. EMC, Vol. 30, No. 3, August 1988, pp. 294-297.

Referencias de compatibilidad electromagnética

- [21] Christopoulos, C., "Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility", CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [22] Degauge, P., and J. Hamelin, eds., "Electromagnetic compatibility", Oxford University Press, Oxford, 1993, (también en francés).
- [23] Goedbloed, J.J., "Electromagnetic Compatibility", Prentice Hall, New York, 1992.
- [24] Gravelle, L.B., and P.F. Wilson, "EMI/EMC in Printed Circuit Boards – A Literature review", IEEE Trans. EMC, Vol. 34, No. 2, May 1992, pp. 109-116.
- [25] Ianovici, (Ianoz) M. and J.J. Morf, eds., "Compatibilité Electromagnétique", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.
- [26] Keiser, B.E., "Principles of Electromagnetic Compatibility", Artech House, Inc. Delham, Mass. 1979.
- [27] Morgan, D., "A Handbook for EMC Testing and Measurement", Peter Peregrinus Ltd., IEE Electrical Measurement Series 8, London, 1994.
- [28] Ott, H.W., "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [29] Paul, C.R., "Prediction of Crosstalk in Ribbon Cables: Comparison of Model Predictions and Experimental Results", IEEE Trans. EMC, Vol. EMC-20, No. 3, Aug. 1978, pp. 394-406.
- [30] Paul, C.R., "Transmission-Line Modeling of Shielded Wires for Crosstalk Prediction", IEEE Trans. EMC, Vol. EMC-23, No. 4, Nov. 1981, pp. 345-351.
- [31] Paul, C.R., "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [32] Perez, C.R., "Handbook to Electromagnetic Compatibility", Academic Press, 1995.
- [33] Ryser, H., "Electromagnetic Compatibility", Hasler Review, Vol. 17, No. 2, 1984, pp 33-40.
- [34] Tesche, F.M., M.V. Ianoz and T. Karlsson, "EMC Analysis Methods and Computational Models", John Wiley & Sons, New York, 1996.

Apantallamiento electromagnético:

- [35] Casey, K.F., “Electromagnetic Shielding Behaviour of Wire-Mesh Screens”, IEEE Trans. EMC, Vol. 30, No. 3, Aug. 1988, pp. 298-311.
- [36] Dahlberg, E., Electromagnetic Shielding, “Some Simple Formulae for Closed Uniform Shields”, TRITA-EPP-75-27, KTH Stockholm, Dec. 1975.
- [37] Kaden, H., “Wirbelstroeme und Schirmung in der Nachrichtentechnik”, Springer-Verlag, Berlin, 1959.
- [38] King, L.V., “Electromagnetic Shielding at Radio Frequency”, *Phil. Mag. and J. Sci.*, Vol. 15, No. 97, Feb. 1933, pp. 201-233.
- [39] Lee, K.S.H., “Electromagnetic Shielding”, Ch. 11 in *Recent Advance in Electromagnetic Theory*, H.N. Kriticos and D.L. Jagard, eds., Springer-Verlag, New York, 1990.
- [40] Schelkunoff, S.A., “Theory of Lines and Shields”, *Bell System Technical Journal*, 13(1934)4, pp. 522-579.
- [41] Vance, E.F., “Coupling to Shielded Cables”, Krieger Publishinh, 1987.

Especificaciones y normas relacionadas:

- [42] High-Altitude Electromagnetic pulse (HEMP) Protection for ground-Based C41 Facilities Performing Critical, Time-Urgent missions, MIL-STD-188-125, U.S. Department of defense, June 26, 1990.

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 referenciadas 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⁾
CEI 60050-161	1990	Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI).Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética	—	—	UNE 21302-161:1992
CEI 60096-1	1986	Cables para frecuencias radioeléctricas. Parte 1: Requisitos generales y métodos de medida	—	—	—
CEI 60625	Serie	Instrumentos de medición programables. Sistema de interfaz (bits paralelos, octetos serie)	—	—	—
CEI 61000-2-9	1996	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones radiadas	EN 61000-2-9	1996	UNE-EN 61000-2-9:1998
CEI 61000-5-3	1999	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 5: Guías de instalación y atenuación. Sección 3: Conceptos de protección IEMN-GA	—	—	—
ANSI/IEEE Std 488.1	1987	Norma IEEE: Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation, 02-Feb-1988	—	—	—

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

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