

Junio 2003

### TÍTULO

**Compatibilidad electromagnética (CEM)**

**Parte 5: Guías de instalación y de atenuación**

**Sección 4: Inmunidad al IEMN-GA**

**Especificaciones de los dispositivos de protección contra las perturbaciones radiadas IEMN-GA**

**Publicación básica CEM**

*Electromagnetic compatibility (EMC). Part 5: Installation and mitigation guidelines. Section 4: Immunity to HEMP. Specification for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication*

*Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation. Section 4: Immunité à l'IEM-HA. Spécification des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées IEMN-HA. Publication fondamentale en CEM.*

### CORRESPONDENCIA

Este informe es equivalente al Informe Técnico CEI 61000-5-4:1996.

### OBSERVACIONES

### ANTECEDENTES

Este informe ha sido elaborado por el comité técnico AEN/CTN 208 *Compatibilidad Electromagnética* cuya Secretaría desempeña UNESA.



ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>Capítulo</b>	
<b>1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2 NORMAS PARA CONSULTA .....</b>	<b>4</b>
<b>3 DEFINICIONES .....</b>	<b>4</b>
<b>4 ESPECIFICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS PERTURBACIONES RADIADAS .....</b>	<b>5</b>
<b>4.1 Clasificación general de los dispositivos de blindaje.....</b>	<b>6</b>
<b>4.2 Requisitos generales.....</b>	<b>6</b>
<b>4.3 Especificaciones.....</b>	<b>7</b>
<b>4.3.1 Generalidades.....</b>	<b>7</b>
<b>4.3.2 Materiales de barrera.....</b>	<b>7</b>
<b>4.3.3 Cables y conductos blindados .....</b>	<b>13</b>
<b>4.3.4 Materiales para juntas .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3.5 Componentes de blindaje .....</b>	<b>19</b>
<b>Anexos</b>	
<b>A TEORÍA GENERAL.....</b>	<b>20</b>
<b>B BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>27</b>

**Compatibilidad electromagnética (CEM)**  
**Parte 5: Guías de instalación y de atenuación**  
**Sección 4: Inmunidad al IEMN-GA**  
**Especificaciones de los dispositivos de protección contra las perturbaciones radiadas IEMN-GA**  
**Publicación básica CEM**

## 1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este informe técnico define como se especifican los dispositivos de protección utilizados para la protección de los sistemas civiles contra el impulso electromagnético nuclear de gran altitud (IEM-GA). Los requisitos funcionales vendrán dados en futuras normas CEI. Su utilización se prevé para la armonización de las especificaciones existentes y futuras suministradas por los fabricantes de dispositivos de protección, de equipos electrónicos, las administraciones y los otros compradores.

Este informe técnico cubre los dispositivos de protección utilizados actualmente para la protección contra los campos electromagnéticos radiados en el caso de un IEM-GA. En general, se tratan los parámetros IEM-GA apropiados, es decir, los relativos a cambios muy rápidos de los campos EM en función del tiempo.

## 2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación, la edición indicada estaba 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):1990 – *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad Electromagnética.*

## 3 DEFINICIONES

Para el objeto de este informe técnico, se aplican las definiciones siguientes.

**IEM-GA/IEMN-GA:** Las dos siglas son equivalentes y aceptadas para Impulso Electromagnético Nuclear de Gran Altitud. El término IEM-GA se prefiere a IEMN-GA.

**barrera:** Separación utilizada para el aislamiento de circuitos eléctricos de las perturbaciones electromagnéticas. (Un blindaje es un tipo particular de barrera).

**resistencia de contacto:** Resistencia medida en ohmios entre dos objetos en contacto uno con otro.

**tasa de compresión:** Porcentaje de reducción permanente de la dimensión de un material causada por compresión en condiciones específicas de calor, presión y duración.

**resistencia a la corrosión:** Resistencia a una acción química que causa una destrucción gradual de la superficie de un metal por oxidación, electrólisis o contaminación química.

**frecuencia de corte:** Frecuencia a la que el valor de una magnitud característica medida ha decrecido hasta una fracción especificada de su valor a baja frecuencia.

NOTA – Para una guía de ondas, es la frecuencia por debajo de la cual la energía electromagnética no se propaga eficazmente en la guía. Esta frecuencia depende de la geometría de la sección transversal y de las dimensiones de la guía.

**elongación:** Aumento de longitud de un material sometido a un esfuerzo tensional.

**punto de entrada (placa colectora):** Lugar físico en la superficie de una envolvente cerrada por el que la energía penetra en el interior.

**dispositivo de protección:** Componente eléctrico, tal como un filtro, tubo de descarga de gas, varistor de óxido metálico, etc., para la protección contra las perturbaciones conducidas, o un blindaje, empalme, guía de ondas, etc., para la protección contra las perturbaciones radiadas. Un elemento tal o una combinación de varios de ellos, forman parte del concepto de barrera electromagnética de un sistema.

**blindaje:** Material eléctricamente conductor situado alrededor de un circuito, de un componente o de un cable para suprimir el efecto de un campo electromagnético dentro o fuera de regiones delimitadas.

**eficacia del blindaje:** Medida, generalmente expresada en dB, de la reducción o de la atenuación de la amplitud de un campo electromagnético en un punto del espacio antes y después de la colocación de un blindaje, entre una fuente y este punto.

**espesor de la superficie (pelicular):** Espesor de un material conductor a partir del cual la densidad de corriente disminuye un Néper (1/e o 36,8%) con relación a su valor en la superficie del material.

**resistividad de superficie:** Resistencia de un material medida entre dos lados opuestos de una superficie cuadrada unidad, expresada generalmente en ohmios por cuadrado.

**impedancia superficial de transferencia** (de una línea coaxial): Cociente de la tensión inducida por unidad de longitud, en el conductor central de una línea coaxial, por la corriente en la superficie exterior de la línea coaxial. [VEI 161-04-15]

**esfuerzo tensional:** Fuerza máxima aplicada a una muestra cuando se la estira hasta romperla.

**admitancia de transferencia:** Relación matemática entre la corriente inducida en un conductor situado en el lado protegido de una región blindada y la tensión en el lado expuesto de la envolvente. Es la cantidad dual de la impedancia de transferencia.

**impedancia de transferencia** (de un circuito apantallado): Cociente de la tensión entre dos puntos especificados en el circuito bajo pantalla por la corriente en una sección definida de la pantalla. [VEI 161-04-14]

**resistividad volumétrica:** Resistencia eléctrica de un material medida entre dos caras opuestas de  $1 \text{ cm}^3$  de material, expresada generalmente en ohmios.centímetros.

**guía de ondas por debajo de la frecuencia de corte:** Dispositivo de protección consistente en una longitud de guía de ondas que limita el paso de energía electromagnética por debajo de una frecuencia definida.

**guía de ondas (trampa):** Guía de ondas por debajo de la frecuencia de corte que sirve de protección electromagnética en una barrera.

#### **4 ESPECIFICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS PERTURBACIONES RADIADAS**

La eficacia del blindaje de un recinto blindado (jaula de Faraday, cabina o edificio blindado) se deteriora por las penetraciones, aberturas y empalmes. Éstas deben ser tratadas de tal manera que el deterioro de la eficacia del blindaje que ocasionan sea lo más bajo posible. Este objetivo se consigue gracias a dispositivos de protección apropiados.

En lo que sigue, estos dispositivos de protección son tratados uno a uno, explicando su principio de funcionamiento, mostrando en algunos casos sus limitaciones, y finalmente relacionando las especificaciones que deben ser suministradas por los fabricantes.

Las figuras ayudan a demostrar el principio de funcionamiento y pueden servir también de ejemplos que muestran como pueden ser presentados los parámetros que dependen de la frecuencia.

#### 4.1 Clasificación general de los dispositivos de blindaje

Materiales de barrera:

- materiales de blindaje;
- ventanas de visualización;
- paneles de ventilación;
- guías de ondas;
- revestimientos conductores;
- adhesivos conductores y empalmes estancos.

Cables y conductos blindados:

- blindaje en una sola pieza;
- blindajes con fugas;
- conectores.

Materiales para juntas:

- juntas de hilos tricotados;
- juntas de pantallas y fibras metálicas;
- juntas de hilos orientados;
- juntas de elastómeros conductores.

Componentes de blindaje:

- interruptores de tapa;
- juntas giratorias;
- juntas de conectores;
- juntas tóricas;
- bandas;
- etc.

#### 4.2 Requisitos generales

Los materiales de blindaje necesarios para la obtención de la eficacia del blindaje requerida deben responder a varios criterios eléctricos, mecánicos y ambientales.

##### Requisitos eléctricos

Para los materiales de barrera, deben darse valores de la atenuación para los campos E y H, así como para las ondas planas en el rango de frecuencias de 10 kHz a 1 000 MHz. Para los materiales de juntas se exigen las mismas informaciones, así como la resistencia en c.c. Para los cables blindados se exige la especificación de la impedancia de transferencia, y si es necesario, la admitancia de transferencia, en el rango de frecuencias de 10 kHz a 100 MHz.

### **Requisitos mecánicos**

Es conveniente que todas las características mecánicas necesarias para la buena utilización de los materiales sean puestas a disposición del usuario. Se relacionan en los apartados que siguen.

### **Requisitos ambientales**

La eficacia total del blindaje de una envolvente blindada está limitada por el fallo de las juntas cuyo objetivo es asegurar un contacto eléctrico adecuado. La integridad del blindaje de una junta puede ser aumentada mejorando este contacto. Esto puede realizarse utilizando una junta conductora.

No obstante, la utilización de algunas juntas no mantiene la integridad del blindaje durante mucho tiempo y las condiciones ambientales como el polvo, la humedad y los vapores deben ser tomados en cuenta. Por ejemplo, para sellar contra el polvo y la humedad, son indicadas juntas EMI planas o de bandas, asociadas a un elastómero esponjoso o sólido. En consecuencia, se requiere información relativa al ambiente, para una buena utilización de un material específico para juntas.

## **4.3 Especificaciones**

**4.3.1 Generalidades.** Es conveniente tener en cuenta a la vez los aspectos de diseño mecánicos y eléctricos para especificar los dispositivos de protección.

Las especificaciones comprenden:

- descripción general (presentación, objeto);
- información sobre la aplicación (utilización particular);
- descripción (material, consistencia, color, acabado, etc.);
- características (atenuaciones en campos E, H y onda plana, resistencia en c.c., rango de temperaturas, propiedades mecánicas, impedancia de transferencia y, si fuera necesario, admitancia de transferencia);
- dimensiones;
- recomendaciones de utilización (preparación de la superficie, presión, precauciones de operación y precauciones asociadas a la seguridad);
- métodos de realización;
- técnicas de montaje (manera de ensamblar);
- recomendaciones de almacenamiento.

### **4.3.2 Materiales de barrera**

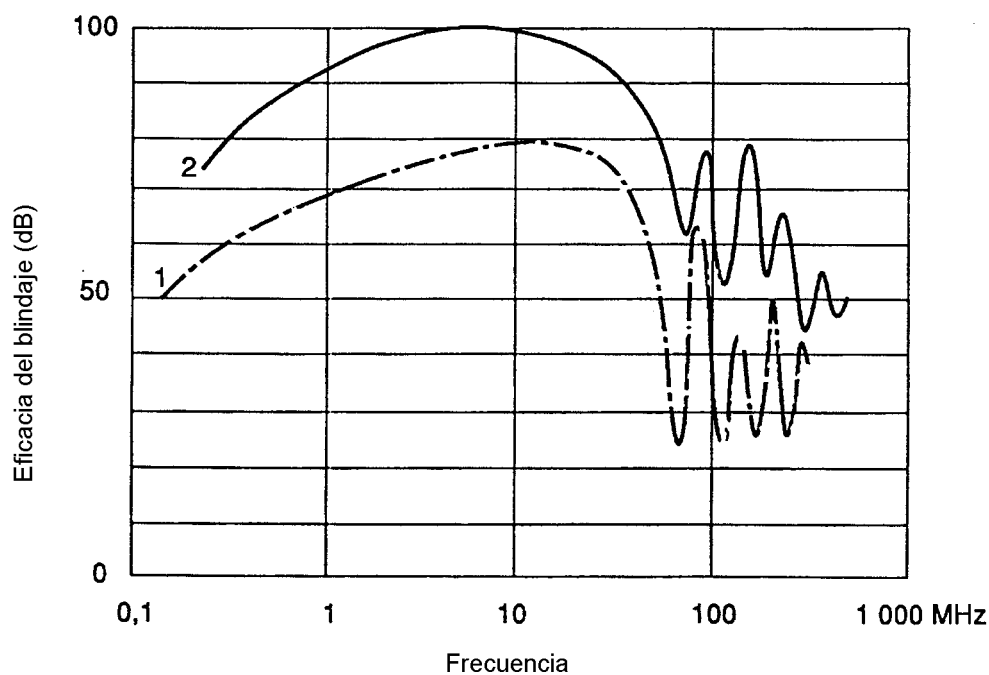
#### **4.3.2.1 Materiales de blindaje**

Están disponibles generalmente dos tipos:

##### *a) Enrejado*

La eficacia del blindaje depende del tamaño del volumen a blindar, y sobre todo de la dimensión de las mallas y de la fabricación del enrejado. La eficacia del blindaje aumenta cuando la dimensión de las mallas disminuye o se utiliza un blindaje doble, estando los dos blindajes aislados entre ellos y presentando un solo punto de conexión a tierra.

Para las dimensiones de la cabina mostrada en la figura 1, la frecuencia de corte es de alrededor de 80 MHz. A frecuencias más altas, hay una resonancia que produce oscilaciones.



Curva 1:	dimensiones 3 m x 3,25 m x 3 m
Malla hexagonal:	15 mm x 17 mm
Curva 2:	dimensiones 4 m x 4 m x 3 m
Malla cuadrada:	4 mm

**Fig. 1 – Atenuación típica de cabinas de doble blindaje**

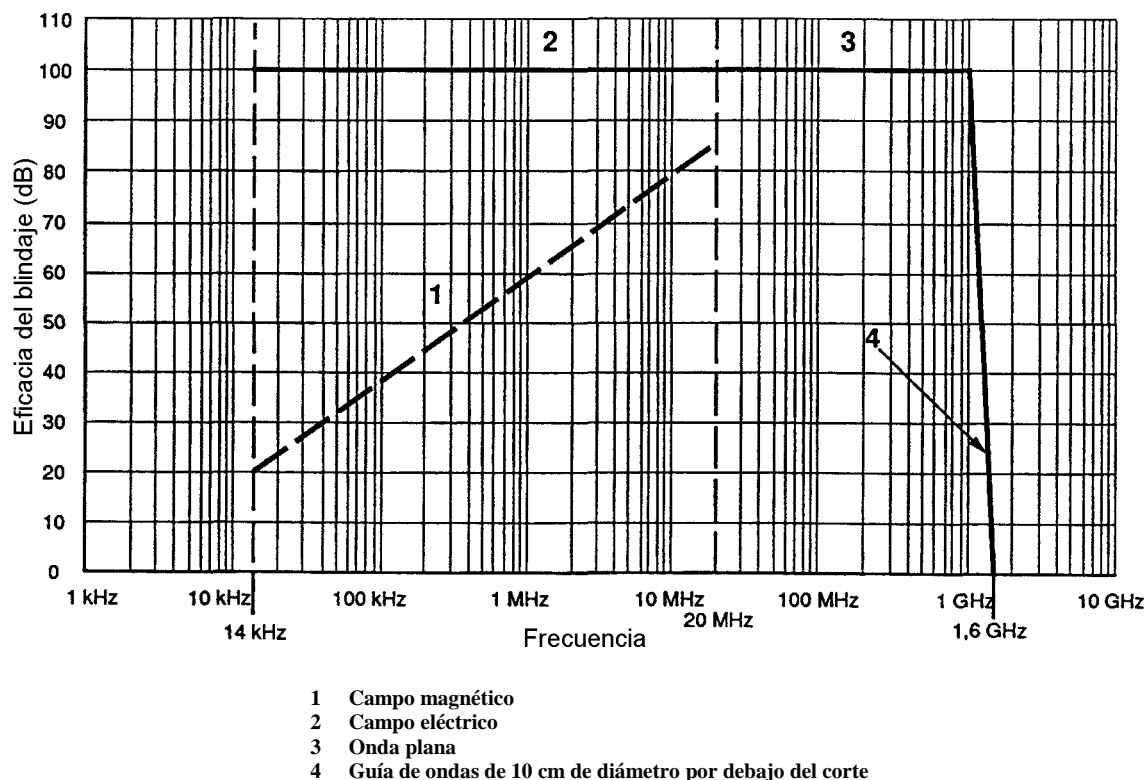
b) *Lámina de metal*

La atenuación de las cabinas con láminas de metal homogéneas es superior. La eficacia del blindaje aumenta con la frecuencia debido al espesor de la superficie, de tal manera que incluso láminas muy delgadas son eficaces a altas frecuencias.

Fórmulas simples permiten calcular las pérdidas por absorción, las pérdidas por reflexión y la eficacia del blindaje de las láminas de metal para las ondas planas, cuando sus dimensiones son grandes con relación a las longitudes de ondas considerada. Se presentan en el anexo A.

En la figura 2 se da un ejemplo de especificación de la eficacia del blindaje de una jaula de Faraday.





**Fig. 2 – Ejemplo de la eficacia del blindaje IEM-GA de una jaula de Faraday**

Especificaciones requeridas:

Recintos blindados:

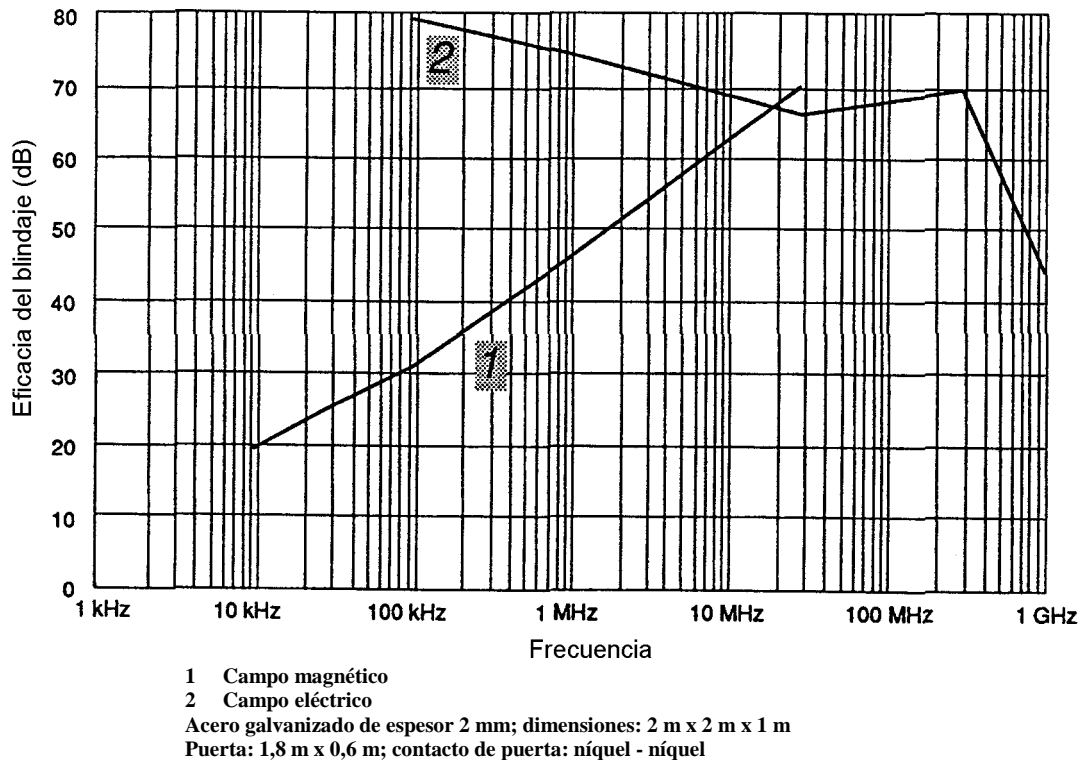
- descripción general;
- dimensiones de los diferentes elementos;
- peso;
- método de ensamblaje;
- cargas superficiales y puntuales autorizadas;
- tipo de material;
- tipos de puertas posibles;
- diferentes puntos de entrada con sus características mecánicas;
- eficacia del blindaje.

Cabinas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- dimensiones totales;
- peso;
- tipo de material y acabado;

– eficacia del blindaje (véase el ejemplo de la figura 3).

NOTA – Es práctica común aplicar un lubricante basado en silicona sobre los contactos de las puertas. Esto puede producir un aumento de la resistencia de contacto y deteriorar consecuentemente la eficacia del blindaje



**Fig. 3 – Ejemplo de atenuación de una cabina provista de empalmes para juntas**

**4.3.2.2 Ventanas de visualización.** Las ventanas de visualización se utilizan para materiales que necesitan representación visual donde el panel de visualización debe también servir para disminuir la energía electromagnética radiada que penetra en la zona protegida.

Pueden ser de vidrio, de plástico o una combinación de los dos. El blindaje EMI se obtiene gracias a un enrejado tricotado o tejido, laminado entre los substratos de vidrio o de plástico, o por deposición de un revestimiento conductor.

La eficacia del blindaje se determina por el tamaño de las aberturas sobre la pantalla, por el contacto eléctrico entre los hilos y los materiales así como por las técnicas utilizadas en la terminación de los hilos sobre los bordes de la abertura.

En la hipótesis cuasi-estática (dimensiones  $\ll \lambda$ ), para las ventanas provistas de un revestimiento conductor, el campo eléctrico no penetra sólo gracias al fenómeno de reflexión. El caso del campo magnético es diferente. El campo magnético medido detrás de una ventana de visualización ( $H_2$ ) se reduce en función de la frecuencia con relación al campo medido en el mismo lugar con una abertura ( $H_1$ ). La función de atenuación se da por:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

donde

$$\tau = 8L / (3\pi(R_s + 2\pi R_c));$$

$R_s$  es la resistencia superficial de la película conductora;

$R_c$  es la resistencia de contacto entre la película conductora y el borde;

$L$  es la inductancia equivalente de la ventana.

En el caso de las ventanas de visualización provistas de un enrejado, la función de atenuación del campo magnético tiene la misma forma. Sin embargo  $R_s$  se reemplaza por  $Z_s = R_s + j \omega L_s$ , donde  $R_s$  depende de la resistencia lineal del hilo y de las dimensiones del enrejado, y  $L_s$  depende de las dimensiones de la ventana y del enrejado.

Frente al campo magnético, las ventanas de visualización se comportan como filtros paso-bajo (véase el ejemplo de la figura 4).

Para las ventanas de visualización provistas de un enrejado, la función de atenuación es independiente de la frecuencia, y sólo depende de la naturaleza y de las dimensiones de las ventanas y del enrejado.

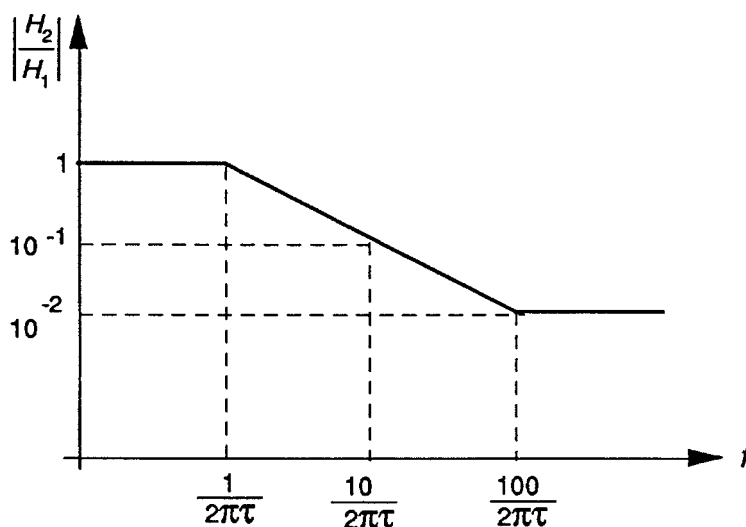


Fig. 4 – Ejemplo de función de atenuación del campo magnético de una ventana de visualización

La función de atenuación del campo eléctrico es independiente de la frecuencia hasta la frecuencia de corte de la ventana. Depende de las dimensiones de la ventana y del material.

Especificaciones necesarias:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del producto (substrato óptico, revestimiento, cuadro de montaje, acabado de las barras, junta de la interfaz y superficies de conexión, laminado con conexión periférica, pantalla de blindaje tricotado);
- características del funcionamiento (eficacia del blindaje, rango de temperaturas, resistividad superficial del revestimiento);
- dimensiones.

**4.3.2.3 Paneles de ventilación.** Los paneles de ventilación se utilizan en las envolventes y cabinas de los equipos electrónicos que necesitan niveles altos de blindaje EMI y entradas y salidas de aire para refrigerar los equipos y para ventilar los humos.

Son adecuados para la obtención de una eficacia de blindaje (SE) elevada en altas frecuencias.

Los paneles de ventilación constituidos de materiales metálicos en nido de abeja sacan ventaja del principio de la guía de ondas por debajo de la frecuencia de corte.

Estos paneles son funcionalmente racimos de guías de ondas.

La eficacia del blindaje alcanzada con un nido de abeja se da, para las ondas planas, por:

$$SE (dB) = 27 \frac{T}{W} - 20 \log N$$

donde

$T$  es el espesor del nido de abeja;

$W$  es la anchura de cada celda;

$N$  el número de celdas.

NOTA – Esta fórmula es válida si la frecuencia es baja comparada con la frecuencia de corte de las guías de ondas. En este caso la eficacia del blindaje ( $SE$ ) es independiente de la frecuencia. Además es válida si  $27 T/W > 20 \log N$ .

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del producto (marco, núcleo del nido de abeja, junta de la interfaz, sistema de fijación, acabado);
- dimensiones;
- eficacia del blindaje, rango de temperaturas.

**4.3.2.4 Guías de ondas (trampas).** Las guías de ondas se utilizan cuando deben pasar varillas no conductoras a través de un blindaje.

Como en el caso de los paneles de ventilación, se saca provecho del principio de la guía de ondas por debajo de la frecuencia de corte.

Para una sección transversal dada, la eficacia del blindaje proporcionada por una guía de ondas se determina a partir de la fórmula siguiente:

$$SE (dB) = 54,6 \left( \frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right)^{1/2} L$$

donde

$\lambda_c$  es la longitud de onda de corte, en metros;

$\lambda_c = 1,7 d$  ( $d$ : diámetro de una guía de ondas circular, en metros);  
 $= 2 a$  ( $a$ : lado mayor de una guía de ondas rectangular, en metros);

$\lambda$  es la longitud de onda a la frecuencia considerada, en metros,  $\lambda > \lambda_c$ ;

$L$  es la longitud de la guía de ondas, en metros.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del producto (material, acabado);
- técnica de montaje (atornillamiento, soldadura);
- dimensiones;
- atenuación por debajo de la frecuencia de corte.

**4.3.2.5 Revestimientos conductores.** Las pinturas altamente cargadas de partículas conductoras, como la plata, grafito o níquel son un medio económico para blindar y poner a masa las envolventes de plásticas sensibles a las interferencias electromagnéticas.

La eficacia del blindaje es función del tipo y de la cantidad de material conductor utilizado.

Dado que sus características se deterioran con el tiempo, es conveniente utilizar estos revestimientos con precaución.

Especificaciones necesarias:

- descripción general;
- información sobre la aplicación (método de aplicación, precauciones de utilización, preparación superficial, etc.);
- propiedades (resistividad superficial, rango de temperaturas, recomendaciones para almacenamiento, etc.).

**4.3.2.6 Adhesivos conductores y masillas estancas.** Los adhesivos conductores se utilizan para encolar las ventanas EMI, los ventiladores o los empalmes trenzados y para asegurar contactos permanentes y taponar fisuras y brechas. Las masillas estancas pueden utilizarse para aplicaciones concernientes a los ribetes o empalmes puestos de extremo a extremo, pero únicamente si las juntas no están rotas.

Dado que sus características se deterioran con el tiempo, es conveniente utilizarlos con precaución.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación (método de aplicación, precauciones de utilización, preparación superficial, etc.);
- propiedades (resistividad volumétrica, rango de temperaturas, recomendaciones para almacenamiento, etc.).

**4.3.3 Cables y conductos blindados.** La tensión y la corriente inducidas en el interior de un cable blindado dependen de las características del blindaje, de la longitud del cable y de sus impedancias de terminación. El parámetro importante del blindaje utilizado es la impedancia de transferencia que es la relación de la tensión en circuito abierto inducida por metro de longitud en un conductor interno, a la corriente de blindaje (véase el anexo A).

**4.3.3.1 Blindajes sólidos.** Debido al efecto superficial, sólo las frecuencias relativamente bajas pueden penetrar dentro de un blindaje sólido.

Se utiliza principalmente el blindaje cilíndrico fino. Consiste en un tubo de metal de sección y espesor de pared uniformes.

Su impedancia de transferencia se da por la fórmula de Schelkunoff.

Para un tubo de radio  $a$ , de espesor  $T$  ( $T \ll a$ ) y conductividad eléctrica del metal  $\sigma$ :

$$Z_T = \frac{1}{2\pi a \sigma T} \frac{(1+j)}{\operatorname{sh} \left[ (1+j) \left( \frac{T}{\delta} \right) \right]} \frac{T}{\delta}$$

donde  $\delta$  es la profundidad de la superficie

$$|Z_T| = \frac{R_0 u}{(chu - \cos u)^{1/2}}$$

donde

$$u = 2 T/\delta; \text{ y}$$

$$R_0 = 1/(2\pi a \sigma T) \text{ es la resistencia en c.c. del blindaje por unidad de longitud.}$$

A una frecuencia elevada donde  $\delta = a$  y  $R_{HF} = 1/(2\pi a\sigma\delta)$ , la magnitud de la impedancia de transferencia comienza a decrecer exponencialmente. Para los blindajes de cobre, esta frecuencia es de alrededor de 100 kHz.

Especificaciones requeridas:

- impedancia de transferencia en función de la frecuencia hasta 100 MHz;
- conductividad eléctrica  $\sigma$ ;
- dimensiones mecánicas.

En la figura 5 se dan ejemplos de impedancias de transferencia típicas para diferentes tipos de cables.

**4.3.3.2 Blindajes de fugas.** Los blindajes de fugas son a menudo no homogéneos y se encuentran frecuentemente en cables coaxiales flexibles. Para el endurecimiento fuera de las zonas protegidas, deben utilizarse con precaución, especialmente en el caso de líneas largas.

a) *Blindajes trenzados*

Los blindajes trenzados se utilizan corrientemente en la industria electrónica. La impedancia de transferencia  $Z_T$  depende de las características del tejido (véase el anexo A).

A frecuencias bajas, el blindaje trenzado se comporta como un blindaje sólido homogéneo teniendo la misma resistencia en c.c. por unidad de longitud. A frecuencias elevadas (de alrededor de 1 MHz y superior), la penetración del campo llega a ser predominante y se acopla directamente con los conductores internos. Los blindajes de trenzas múltiples reducen este efecto y son utilizados preferiblemente en el exterior de las zonas protegidas en cables cuya longitud sobrepasa los 10 m.

Especificaciones requeridas:

- $Z_t$  en función de la frecuencia hasta 100 MHz.

En la figura 6 se da un ejemplo de impedancia de transferencia en función de la cobertura óptica  $K$  y del número de portadoras  $C$ .

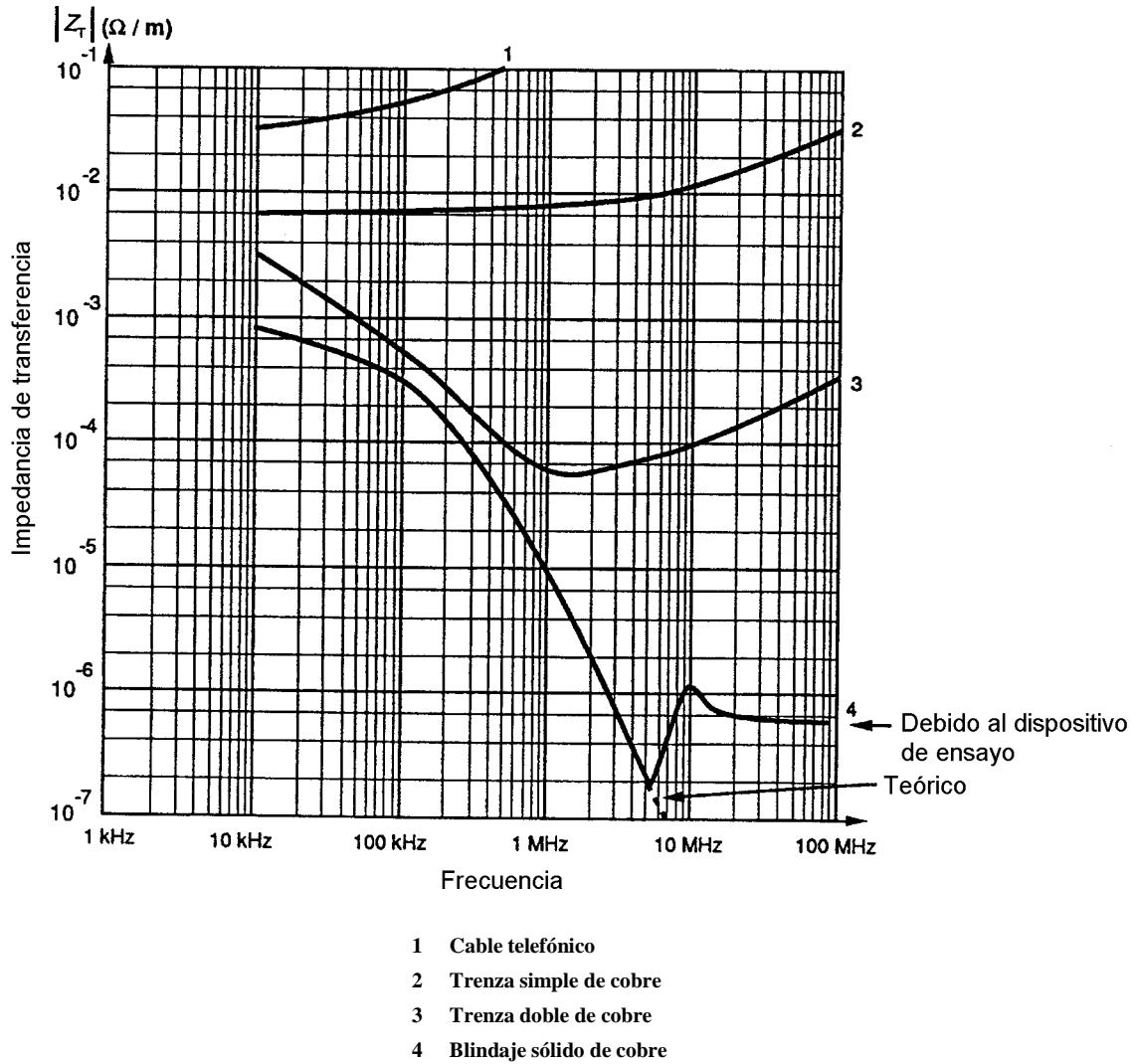


Fig. 5 – Impedancias de transferencia experimentales

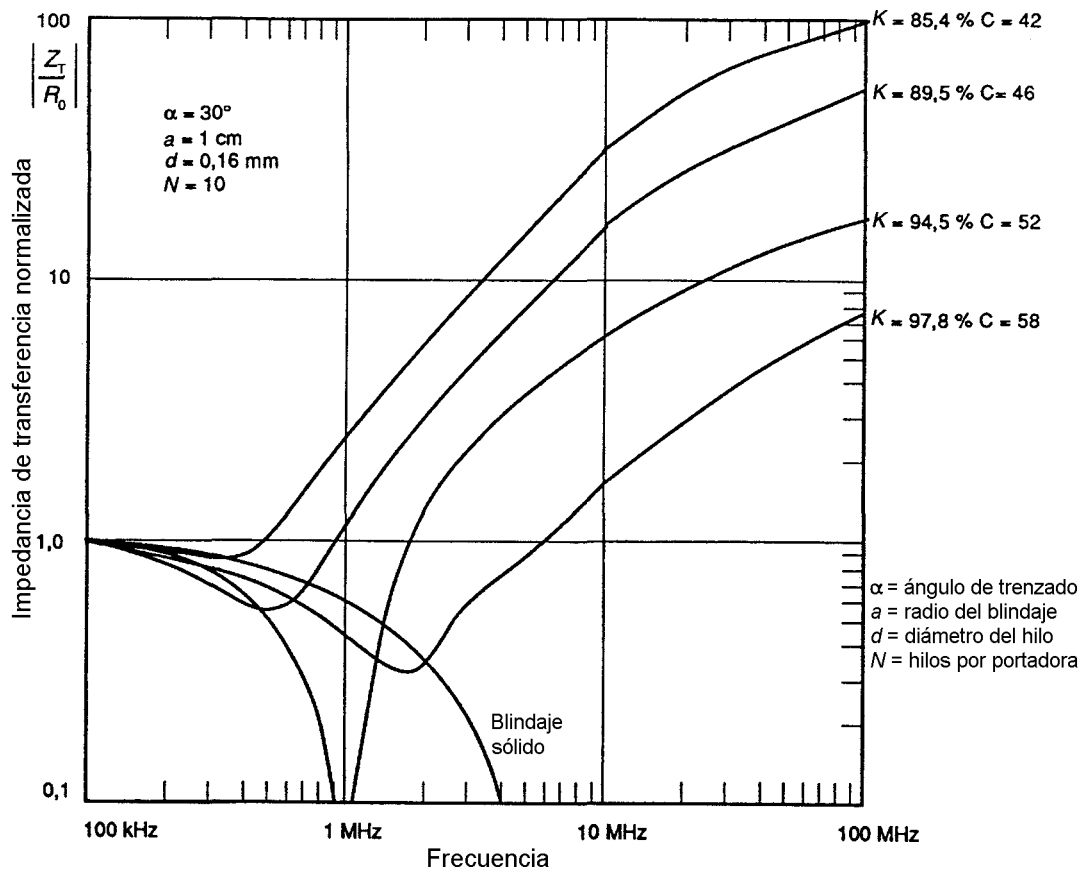


Fig. 6 – Ejemplo de impedancia de transferencia de un blindaje trenzado

b) *Blindaje de banda arrollada en espiral*

Los blindajes de banda arrollada en espiral se utilizan a menudo cuando se requiere flexibilidad del cable.

Cuando se necesita un buen blindaje contra las interferencias o la diafonía, el blindaje de banda arrollada en espiral puede utilizarse conjuntamente con un blindaje trenzado con el fin de mejorar el comportamiento del blindaje.

En el anexo A se da la ecuación de la impedancia de transferencia  $Z_T$ .

Especificaciones requeridas:

- $Z_T$  en función de la frecuencia, hasta 100 MHz.

En la figura 7 se da un ejemplo de impedancia de transferencia calculada para el blindaje de banda arrollada en función del ángulo espiroidal  $\alpha$ .



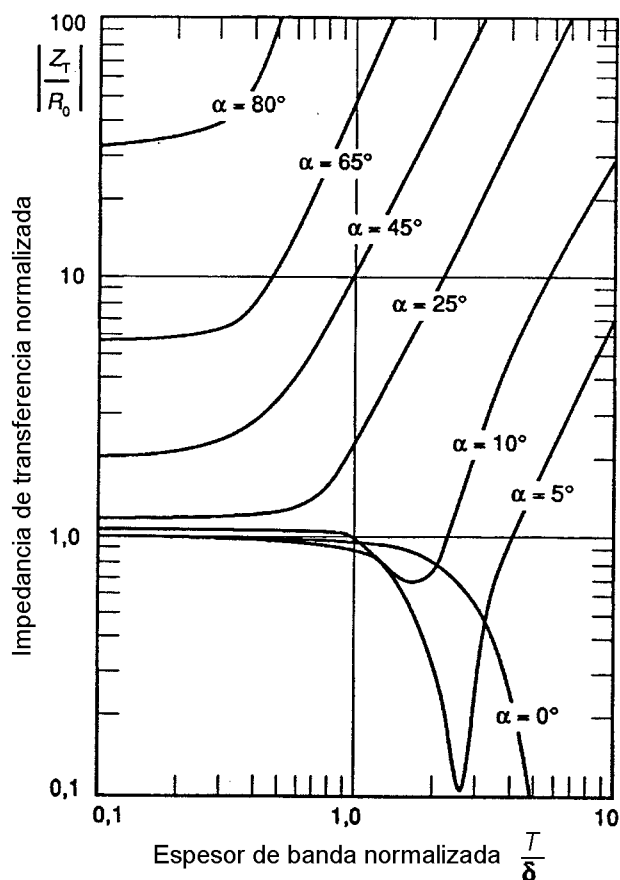


Fig. 7 – Ejemplo de impedancia de transferencia calculada para un blindaje de banda arrollada.

**4.3.3.3 Conectores.** Los conectores se utilizan para efectuar la interfaz de los cables blindados con las envolventes blindadas. Contienen generalmente hendiduras o fisuras a través de las cuales pueden penetrar los campos electromagnéticos externos dentro de los cables. Además, presentan resistencias localizadas en serie con la resistencia de contacto de las superficies de la conexión, lo que produce una caída de tensión y una penetración del campo magnético en los conductores internos.

La impedancia de transferencia (en ohmios) de un conector viene dada por:

$$Z_T = R_0 + j\omega M$$

donde

$R_0$  es la resistencia medida a través del conector;

$M$  es la inductancia mutua entre el blindaje exterior y los conductores internos del cable.

Hay disponibles conectores con  $R_0$  inferior a 1 mΩ y  $M$  del orden de 10 pH.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- impedancia de transferencia;
- características (mecánicas, eléctricas, climáticas y resistencia a los fluidos);
- tipos de contactos (por engaste, directos);
- y todas las informaciones necesarias, esquemas y dibujos.

#### 4.3.4 Materiales para juntas

**4.3.4.1 Juntas de hilos tricotados.** Generalmente, los empalmes de hilos tricotados se adaptan para aplicaciones que no necesitan aberturas y cierres repetidos o propiedades excepcionales de sellado ambiental.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del material (tejido, núcleo elastómero, anchura, espesor, peso);
- características de funcionamiento (eficacia de blindaje, impedancia de transferencia, capacidad de corriente, rango de temperatura, elasticidad, alargamiento, tronzado, soldabilidad, resistencia a la corrosión);
- dimensiones;
- técnica de montaje.

**4.3.4.2 Pantallas y fibras metálicas.** Las pantallas y fibras metálicas son ideales para aplicaciones donde el espacio está limitado y se requieren empalmes de espesor mínimo.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del material (metal, juntas de elastómero, pantalla de hilo, color);
- características de funcionamiento (eficacia de blindaje, impedancia de transferencia, capacidad de corriente, rango de temperaturas, fuerza de cierre recomendada, tasa de fuga);
- dimensiones.

**4.3.4.3 Juntas de hilos orientados.** Las juntas de hilos orientados están constituidas de materiales compuestos consistentes en inclusiones de hilos finos embebidos, incrustados y fijados en un elastómero. Se recomiendan para la supresión de las interferencias electromagnéticas, la puesta a masa, o la protección contra las descargas electrostáticas en donde un hilo flojo o fragmentos de hilo no deban dañar las partes eléctricas o mecánicas, mientras se permite a cada hilo actuar como un elemento elástico independiente.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del material (hilo, elastómero, distribución, color);
- características de funcionamiento (eficacia del blindaje, impedancia de transferencia, capacidad de corriente, rango de temperaturas, fuerza de cierre recomendada, compresibilidad, tasa de compresión);
- dimensiones.

**4.3.4.4 Elastómeros conductores.** Los elastómeros conductores se utilizan cuando las propiedades eléctricas y mecánicas deben permanecer estables en el transcurso del tiempo y cuando un cierre hermético excelente impermeable a la humedad y a la presión debe ser garantizado conservando una eficacia de blindaje elevada.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del material (elastómero, material de relleno, color, textura, forma);
- características de funcionamiento (eficacia del blindaje, impedancia de transferencia, capacidad de corriente, rango de temperaturas, dureza, resistividad volumétrica, resistencia a la tensión, conductibilidad térmica, límite de elongación);
- dimensiones.

**4.3.5 Componentes de blindaje.** Los componentes de blindaje se utilizan para blindar y cerrar herméticamente conmutadores de palanca convencionales, conectores, bridas de guías de ondas o contactos en cabinas y envolventes blindadas.

Especificaciones requeridas:

- descripción general;
- información sobre la aplicación;
- descripción del material;
- características de funcionamiento (eficacia del blindaje, impedancia de transferencia, capacidad de corriente, rango de temperaturas, número de maniobras permitidas, dureza, resistividad volumétrica, resistencia a la tensión, límite de elongación);
- dimensiones.

## ANEXO A (Informativo)

## TEORÍA GENERAL

## A.1 Eficacia de blindaje de las barreras

Normalmente el blindaje contra el IEM-GA es eléctricamente grueso y su comportamiento se determina por los defectos aparecidos durante el proceso de fabricación. En el caso de los materiales eléctricamente delgados, el comportamiento del blindaje se determina por el tamaño y la forma de la envolvente y por los orificios, aberturas, etc. Las fórmulas unidimensionales relativas a la reflexión y a la absorción se aplican a un plano de dimensión infinita y no son válidas en el caso de envolventes blindadas de tres dimensiones.

La expresión de la eficacia del blindaje es:

$$SE(dB) = A(dB) + R(dB) + B(dB)$$

$$= \text{absorción} + \text{reflexión} + \text{reflexión interna}$$

La pérdida por absorción se expresa de la manera siguiente:

$$A(dB) = 0,1315T \sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$

donde

$T$  es el espesor de barrera, en milímetros;

$f$  es la frecuencia, en hertzios;

$\mu_r$  es la permeabilidad magnética del metal con relación al aire;

$\sigma_r$  es la conductividad con relación al cobre.

Se puede utilizar la expresión siguiente:

$$A(dB) = 8,69 \frac{T}{\delta}$$

donde

$\delta$  es el espesor de la superficie =  $(\pi\mu\sigma f)^{-1/2}$ , en metros;

$\mu, \sigma$  son los valores absolutos de la permeabilidad y de la conductividad.

La absorción aumenta alrededor de 9 dB cada vez que el espesor crece un espesor superficial.

La reflexión puede calcularse a partir de:

$$R(dB) = 168 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) \quad \text{para ondas planas;}$$

$$R(dB) = 322 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3} \right) \quad \text{para ondas eléctricas;}$$

$$R(dB) = 15 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r r^2 f}{\mu_r} \right) \quad \text{para ondas magnéticas;}$$

donde  $r$  es la distancia de la fuente a la barrera, en metros.

En las figuras A.1 y A.2 se dan respectivamente ejemplos de reflexión y de reflexión más absorción compuestas, para barreras infinitamente grandes de cobre y de hierro.

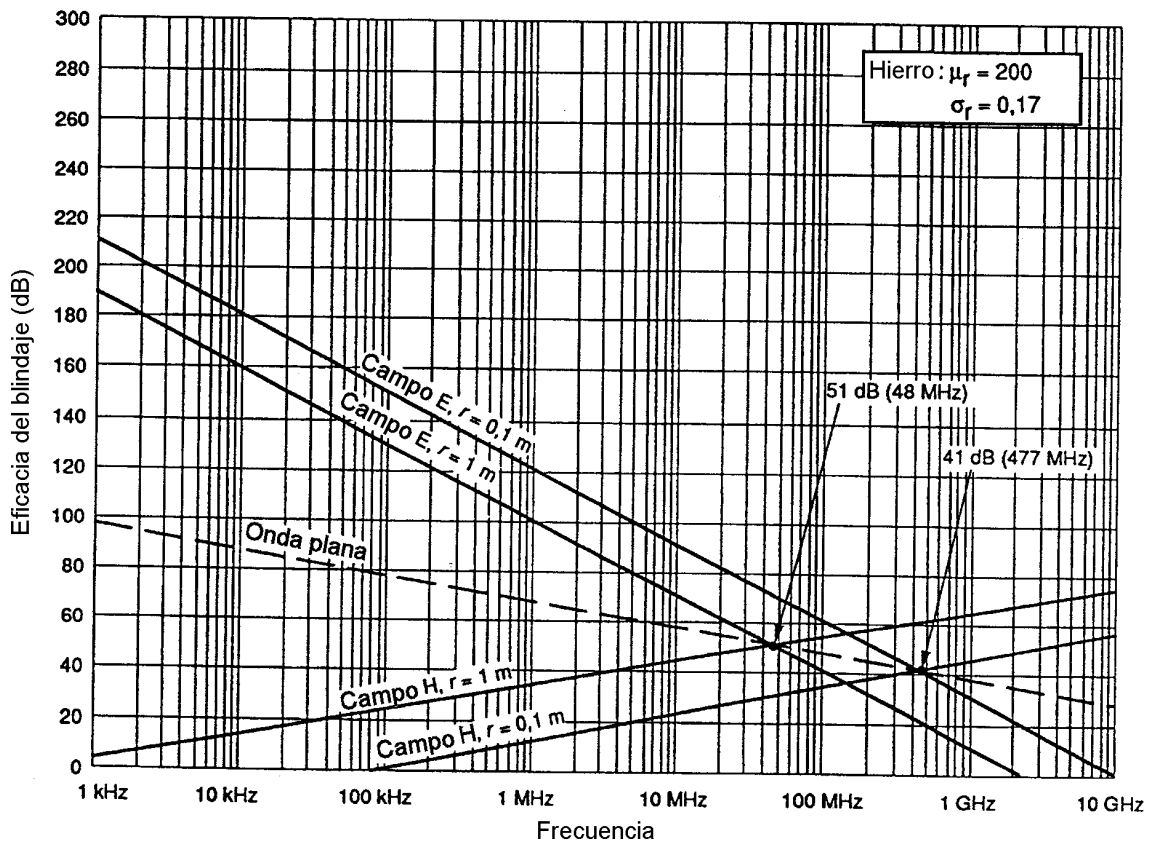
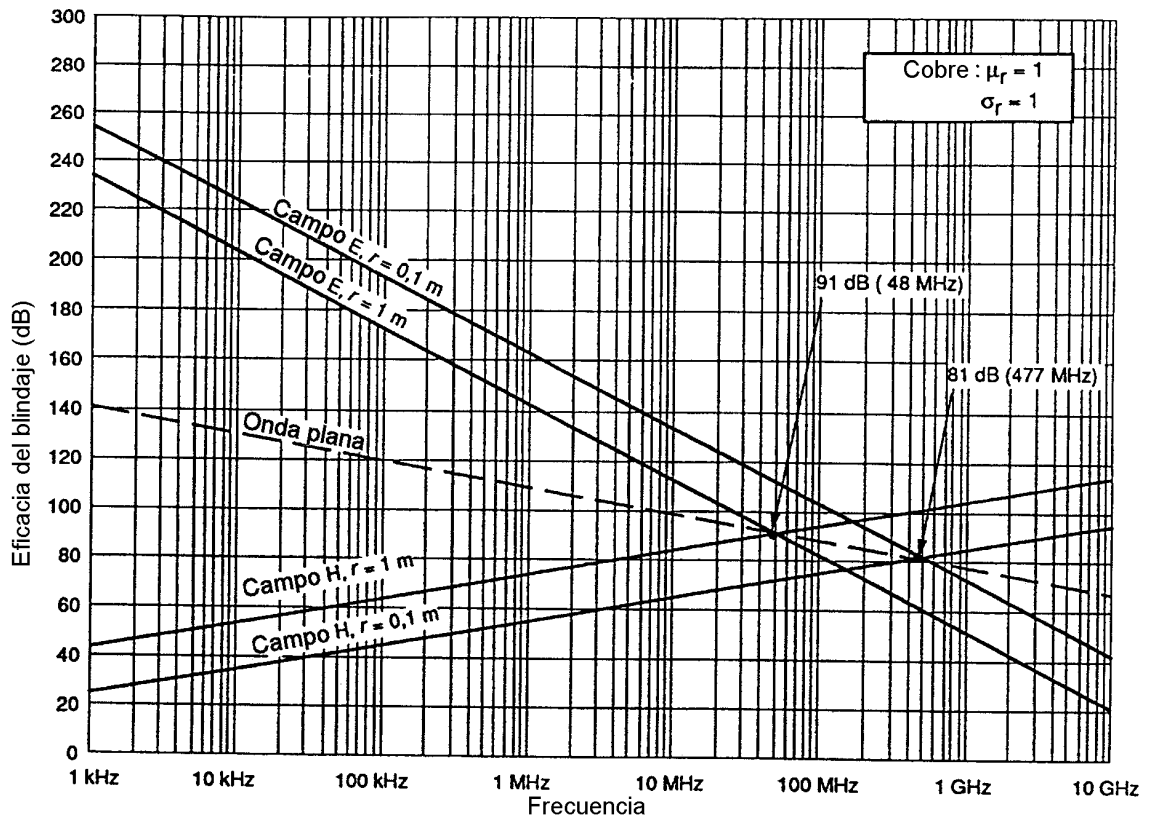


Fig. A.1 – Reflexión teórica ( $R_{dB}$ ) para cobre y hierro

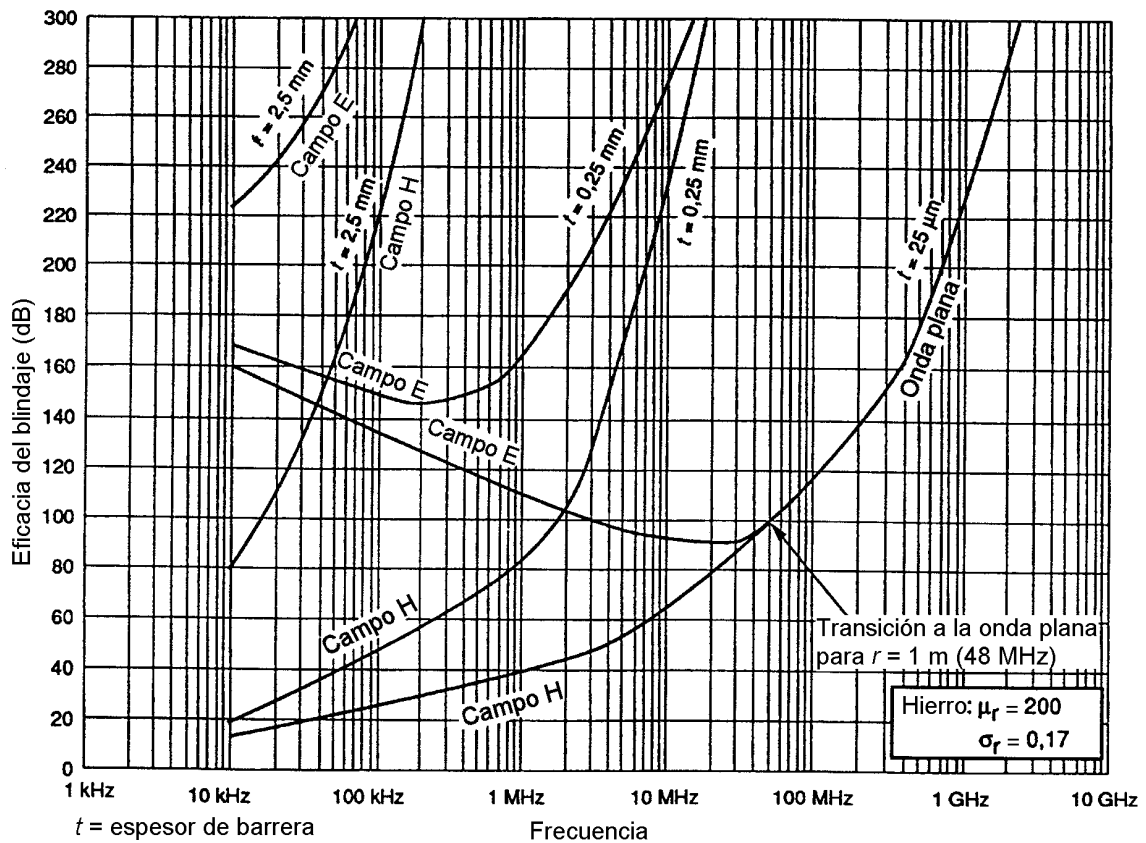
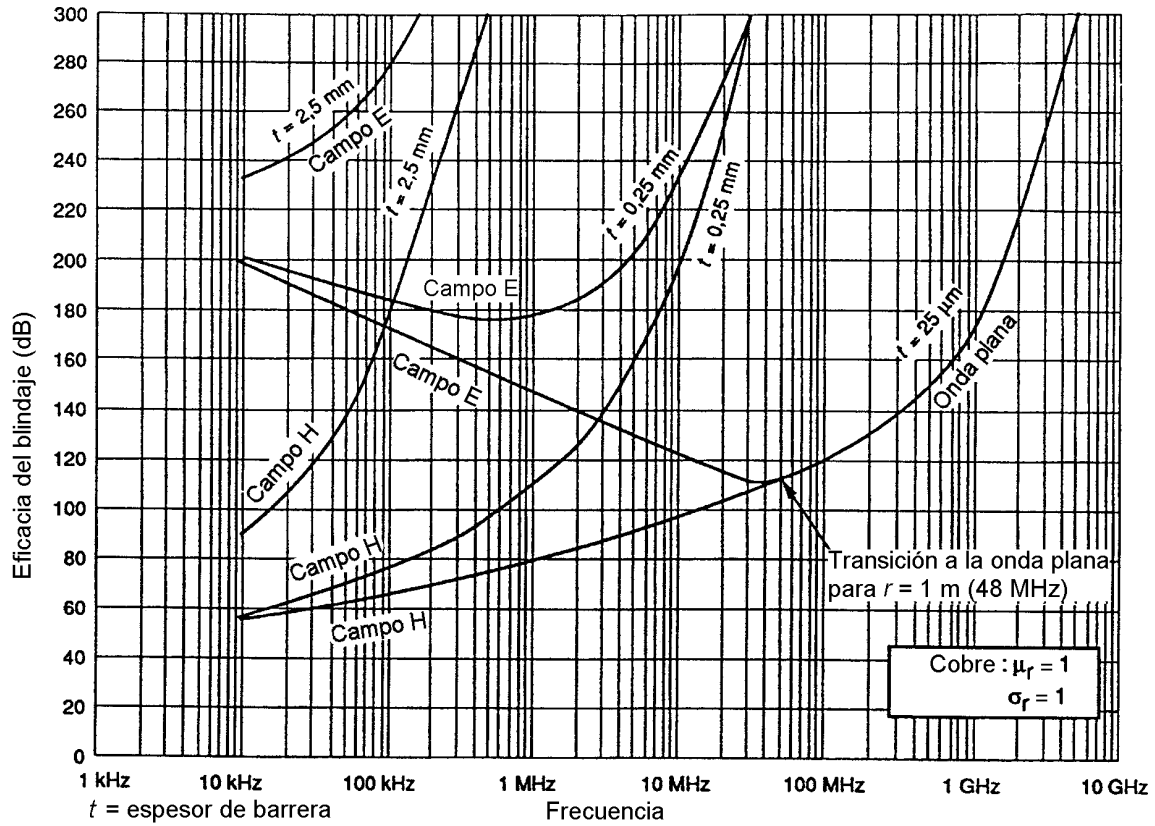


Fig. A.2 – Reflexión ( $R_{dB}$ ) y absorción ( $A_{dB}$ ) teóricas compuestas para cobre y hierro

La reflexión interna  $B$  es generalmente despreciable. Si la absorción es superior a 10 dB,  $B$  es muy pequeña.

## A.2 Teoría de la impedancia de transferencia

### A.2.1 Mecanismo de acoplamiento a través de la funda de un cable

Si un cable blindado se ilumina por un campo electromagnético, las componentes del campo eléctrico y del campo magnético van a acoplarse a través de la funda del cable y a inducir corrientes y tensiones perturbadoras dentro del cable. El campo magnético induce una corriente  $I_s$  en la funda del cable. Además, en el caso de cables trenzados, los campos eléctricos y magnéticos que penetran a través de las aberturas en la funda van a inducir una tensión entre el conductor interno y la funda.

El efecto debido al campo magnético es generalmente el más importante. La corriente  $I_s$  inducida en la funda del cable se separa en una parte  $I_i$  que retorna al conductor interno, y en otra parte  $I_g$  que fluye por un conductor de retorno que puede ser la tierra (véase figura A.3). En consecuencia:

$$I_s = I_g + I_i$$

La circulación de estas corrientes en la funda del cable va a crear un campo eléctrico axial dentro de la funda. Debido al efecto peculiar, las distribuciones de la corriente y del campo eléctrico asociado, en la sección transversal de la funda, no son uniformes. Si  $I_g$  es la corriente que circula por la superficie exterior de la funda, el campo eléctrico  $E_i$  en la superficie interna es producido por una corriente mucho más baja, expresándose el factor de atenuación por medio de la impedancia de transferencia.

La expresión analítica completa del campo eléctrico  $E_i$  ha sido introducida por Schelkunoff y viene dada por:

$$E_i = Z_{aa}I_i + Z_T I_g$$

donde

$Z_{aa}$  es la impedancia de la superficie externa de la funda; y

$Z_T$  es llamada la impedancia de transferencia del cable.

Este valor se define por unidad de longitud.

Si, como en la mayor parte de los casos, la funda del cable es puesta a masa en los dos extremos y el conductor interior se termina en una impedancia elevada, eso significa que:

$$I_i \ll I_g$$

y de ahí,

$$I_g \approx I_s$$

Ello significa que la impedancia de transferencia vendrá dada por:

$$Z_T(\omega) = \frac{E_i(\omega)}{I_s(\omega)}$$

La impedancia de transferencia caracteriza la calidad del blindaje de un cable. Está definida en el dominio de la frecuencia, con  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia.

La admitancia de transferencia es consecuencia del acoplamiento capacitivo a través de blindajes con pérdidas y describe el efecto del campo eléctrico.

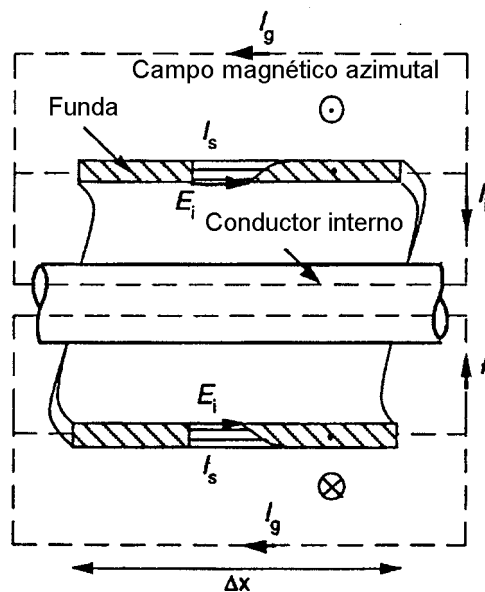


Fig. A.3 –Definición de la impedancia de transferencia

**A.2.2 Definiciones de la impedancia de transferencia y de la admitancia de transferencia**

Según se ha definido anteriormente,  $I_s$  es la corriente de blindaje e  $I_i$  la corriente en el conductor interno;  $V_i$  es la tensión inducida entre el conductor interno y la funda, y  $V_s$  la tensión entre la funda y la masa. Entonces la impedancia y admitancia de transferencia pueden definirse según:

$$Z_T(\omega) = \frac{1}{I_s(\omega)} \frac{dV_i(\omega)}{dx} I_i = 0$$

$$Y_T(\omega) = \frac{1}{V_s(\omega)} \frac{dI_i(\omega)}{dx} V_i = 0$$

Estas ecuaciones corresponden al circuito equivalente de la figura A.4 en el que  $dV_i(\omega)$  y  $dI_i(\omega)$  son las fuentes distribuidas de tensión y de corriente a lo largo del cable blindado

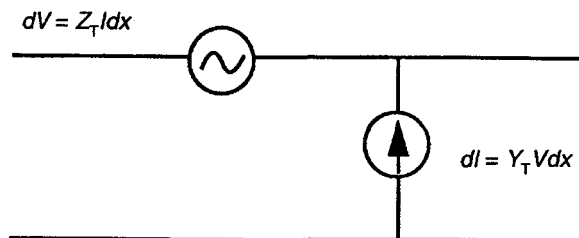


Fig. A.4 – Circuito equivalente que describe los efectos de la impedancia de transferencia y de la admitancia de transferencia



### A.2.3 Impedancia de transferencia de los blindajes trenzados

La impedancia de transferencia de un blindaje trenzado se da por la fórmula aproximada:

$$Z_T = Z_d + j\omega L_t$$

donde 
$$Z_d = \frac{4}{\pi d^2 N C \sigma \cos \alpha} \frac{(1+j)\frac{d}{\delta}}{\operatorname{sh}\left[(1+j)\frac{d}{\delta}\right]}$$

$$L_t = \frac{\pi \mu_0}{6C} (1-K)^{3/2} \lambda(\alpha)$$

donde

$Z_d$  es el término de difusión;

$d$  es el diámetro del hilo;

$C$  es el número de portadoras;

$K$  es la cobertura óptica;

$\lambda(\alpha)$  es la función de excentricidad (véase figura A.5);

$\delta = 1/(\pi f \mu \sigma)^{1/2}$  (espesor de la película en el blindaje);

$L_t$  es el término de inductancia mutua;

$\alpha$  es el ángulo de la trama;

$N$  es el número de hilos por portadora.

El término de difusión  $Z_d$  está basado sobre la hipótesis de que el blindaje se comporta como un blindaje tubular con la misma resistencia en c.c. por unidad de longitud que el blindaje trenzado, y las mismas características en alta frecuencia que un blindaje tubular de espesor igual al diámetro de un hilo. El término de inductancia mutua está basado sobre la hipótesis de que el blindaje del cable trenzado se comporta como un blindaje tubular delgado que tiene huecos elípticos de la misma densidad y ejes principal y secundario idénticos a las aberturas rómbicas del blindaje trenzado.

NOTA – El término de difusión  $Z_d$  indicado es de hecho exacto para un ángulo  $\alpha = 45^\circ$ , y es conveniente utilizar otra fórmula más precisa si  $\alpha$  es diferente de  $45^\circ$ .

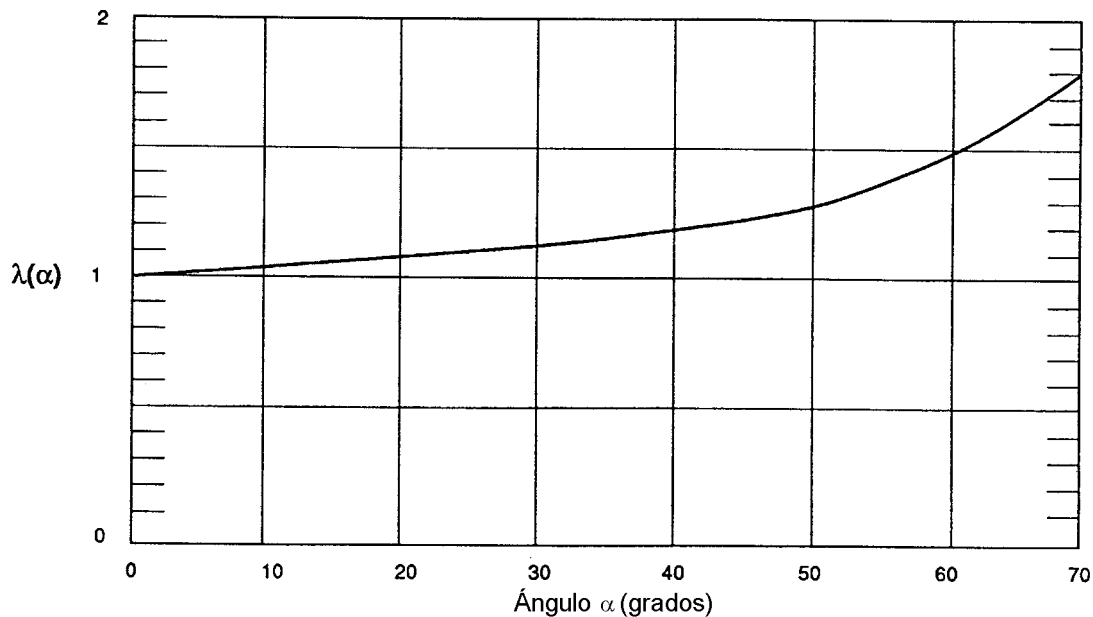


Fig. A.5 – Variación de la función de excentricidad para los blindajes trenzados

#### A.2.4 Impedancia de transferencia de blindajes de bandas helicoidales

La impedancia de transferencia de un blindaje de banda helicoidal se expresa por:

$$Z_T = R_0 \left[ \frac{(1+j)\frac{T}{\delta}}{\text{sh}\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right]} + \left[ (1+j)\frac{T}{\delta} \coth\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right] + j\left(\frac{T}{\delta_0}\right)^2 \frac{a}{T} \right] \text{tg}^2 \alpha \right]$$

donde

$R_0$  es la resistencia en c.c. por unidad de longitud;

$a$  es el radio del blindaje;

$T$  es el espesor del blindaje;

$\delta$  es el espesor de superficie en el blindaje;

$\delta_0$  es el espesor de superficie de un blindaje equivalente no ferroso ( $\mu_0, \sigma$ );

$\alpha$  es el ángulo en espiral ( $\text{tg } \alpha = 2 \pi a N = 2 \pi a \sin \alpha / W$ );

$W$  es el espesor de la banda;

$N$  es el número de vueltas por unidad de longitud.

La impedancia de transferencia de un blindaje de capa simple superpuesta se obtiene reemplazando  $W$  por  $W - W_{ov}$ , donde  $W_{ov}$  es la anchura superpuesta. A frecuencias bajas ( $T/\delta \ll 1$ ), la impedancia de transferencia del tipo superpuesto es superior a la que corresponde al tipo de blindaje no superpuesto, pero a frecuencias altas, la capacidad entre las vueltas cortocircuita la inductancia, de tal manera que  $Z_T$  comienza a decrecer.

**ANEXO B** (Informativo)

**BIBLIOGRAFÍA**

Ott, H.W., *Noise Reduction techniques in electronic systems*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley Interscience, 1988.

Smith, Jr. A.A., *Coupling of external electromagnetic fields to transmission lines*, 2<sup>nd</sup> ed., ICT, 1989.

Degauque, P. Hamelin, J., *Compatibilité électromagnétique*, Dunod, 1990.

Cowdell, R.B., *New dimension in shelding*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-10, No. 1, March 1968.

*Transmission theory of plane electromagnetic waves*, Proceedings of IRE, Vol. 25, Nov. 1937.

Vance, E.F., *Coupling to shielded cables*, Robert E. Krieger Publishing Company, 1987.

Ecoles polytechniques fédérales de Laussane et de Zurich, *Compatibilité électromagnétique*, 2<sup>e</sup> éd., Presses polytechniques romandes, 1985.

Schultz, R.B., Plantz, V.C., Brush, D.R., *Shielding theory and practice*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-30, Aug. 1988.

---

---

**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**