

Mayo 2003

### TÍTULO

**Compatibilidad electromagnética (CEM)**

**Parte 2: Entorno**

**Sección 3: Descripción del entorno**

**Fenómenos radiados y conducidos a frecuencias distintas de las de la red**

*Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 3: Description of the environment. Radiated and non-network-frequency-related conducted phenomena.*

*Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2: Environnement. Section 3: Description de l'environnement. Phénomènes rayonnés et phénomènes conduits à des fréquences autres que celles du réseau.*

### CORRESPONDENCIA

Este informe es equivalente a la Norma Internacional CEI 61000-2-3:1992.

### 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>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo</b>	
<b>1 GENERALIDADES .....</b>	<b>6</b>
1.1 Objeto y Campo de aplicación .....	6
1.2 Normas para consulta.....	6
<b>2 CONSIDERACIONES GENERALES.....</b>	<b>6</b>
2.1 Acoplamiento entre equipos emisores de perturbación y equipos susceptibles.....	7
2.2 Unidades y decibelios.....	8
<b>3 MODELOS DE FUENTES, ACOPLAMIENTOS Y EQUIPOS SUSCEPTIBLES, Y SUS LIMITACIONES.....</b>	<b>9</b>
3.1 Modelos de fuentes.....	9
3.2 Modelos de acoplamientos.....	12
3.3 Modelos de equipos susceptibles.....	15
<b>4 NIVELES DE EMISIÓN Y ENTORNO.....</b>	<b>16</b>
4.1 Entorno conducido.....	16
4.2 Entorno por campo de inducción .....	16
4.3 Entorno radiado.....	16
4.4 Consideraciones estadísticas .....	16
4.5 Consecuencias sobre los límites .....	17
4.6 Entorno definido por referencias a los límites normalizados.....	17
<b>5 EMISORES INTENCIONALES.....</b>	<b>19</b>
5.1 Emisores de radio .....	20
5.2 Otras fuentes de radiación intencional .....	20
5.3 Sistemas de corrientes portadoras.....	21

<b>6</b>	<b>EMISORES NO INTENCIONALES.....</b>	<b>21</b>
6.1	Fuentes de ruido físico.....	21
6.2	Ruidos de origen humano.....	22
6.3	Ruidos atmosféricos.....	23
6.4	Descarga electrostática.....	25
6.5	Líneas de alimentación de alta y media tensión .....	30
6.6	Líneas de alimentación de baja tensión .....	34
6.7	Líneas de señales y de control.....	40
6.8	Equipos .....	40
6.9	Motores.....	40
6.10	Sistemas y dispositivos digitales.....	42
6.11	Receptores de televisión y de radio, monitores y grabadoras de vídeo .....	42
6.12	Lámparas fluorescentes.....	43
6.13	Equipo industrial .....	48
6.14	Sistemas de tracción .....	54
6.15	Sistemas de ignición.....	55
<b>7</b>	<b>EJEMPLOS DE ENTORNOS .....</b>	<b>56</b>
7.1	Entornos residenciales y comerciales .....	56
7.2	Entornos industriales.....	57
7.3	Subestaciones de alta tensión .....	57
7.4	Centros de conmutación de telecomunicaciones .....	58
7.5	Hospitales .....	58
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

## INTRODUCCION

La Norma CEI 61000 ha sido publicada en forma de varias partes cuya estructura es la 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

- Guías de instalación
- Métodos y dispositivos de atenuación

### Parte 9: Varios

Cada parte está a su vez subdividida en secciones que serán publicadas como normas internacionales, o informes técnicos.

Este documento tiene el estatuto de una publicación básica de CEM de acuerdo con la Guía 107 de CEI.

## **Compatibilidad Electromagnética (CEM)**

### **Parte 2: Entorno**

#### **Sección 3: Descripción del entorno**

#### **Fenómenos radiados y conducidos a frecuencias distintas de las de la red**

### **1 GENERALIDADES**

#### **1.1 Objeto y campo de aplicación**

Este informe técnico describe el entorno electromagnético. Podrá servir de base al estudio de sistemas y equipos, basado en la aplicación de normas de ensayo (técnicas y límites), y de métodos de atenuación (que incluyen las prácticas de instalación). Estos métodos tienen en cuenta de forma satisfactoria efectos indeseables que podrían resultar de las interacciones imprevistas en el equipo eléctrico y electrónico.

Este informe tiene por objeto esencial las características y los niveles de los campos electromagnéticos y emisiones conducidas a frecuencias distintas de las de la red que provienen de fuentes de perturbaciones no intencionales. Su aplicación forma parte de la realización de la compatibilidad electromagnética de los sistemas. Esta última necesita que las características de inmunidad del equipo sean tomadas en cuenta en cualquier instalación normal o especial de un equipo o del cableado. Es conveniente que en el diseño y en la instalación de los equipos se hagan concesiones mutuas entre las características de emisión y de susceptibilidad, la separación física, el filtrado y el blindaje para establecer la solución más económica que responda a las características exigidas de los sistemas.

#### **1.2 Normas para consulta**

CEI 61000-2-1:1990 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 1: Descripción del entorno. Entorno electromagnético para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes generales de alimentación.*

### **2 CONSIDERACIONES GENERALES**

Se pueden utilizar diferentes procedimientos para describir el entorno electromagnético. La clasificación en términos de clases de entorno-tipo, tales como residencial, urbano, industrial y comercial, puede tener sentido en cuanto que cada una de estas clases implica unas características generales propias de ese entorno, a partir de las cuales se pueden definir los niveles de compatibilidad. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que un equipo que habitualmente no sería implantado en una clase de entorno dada, puede afectar a ese entorno.

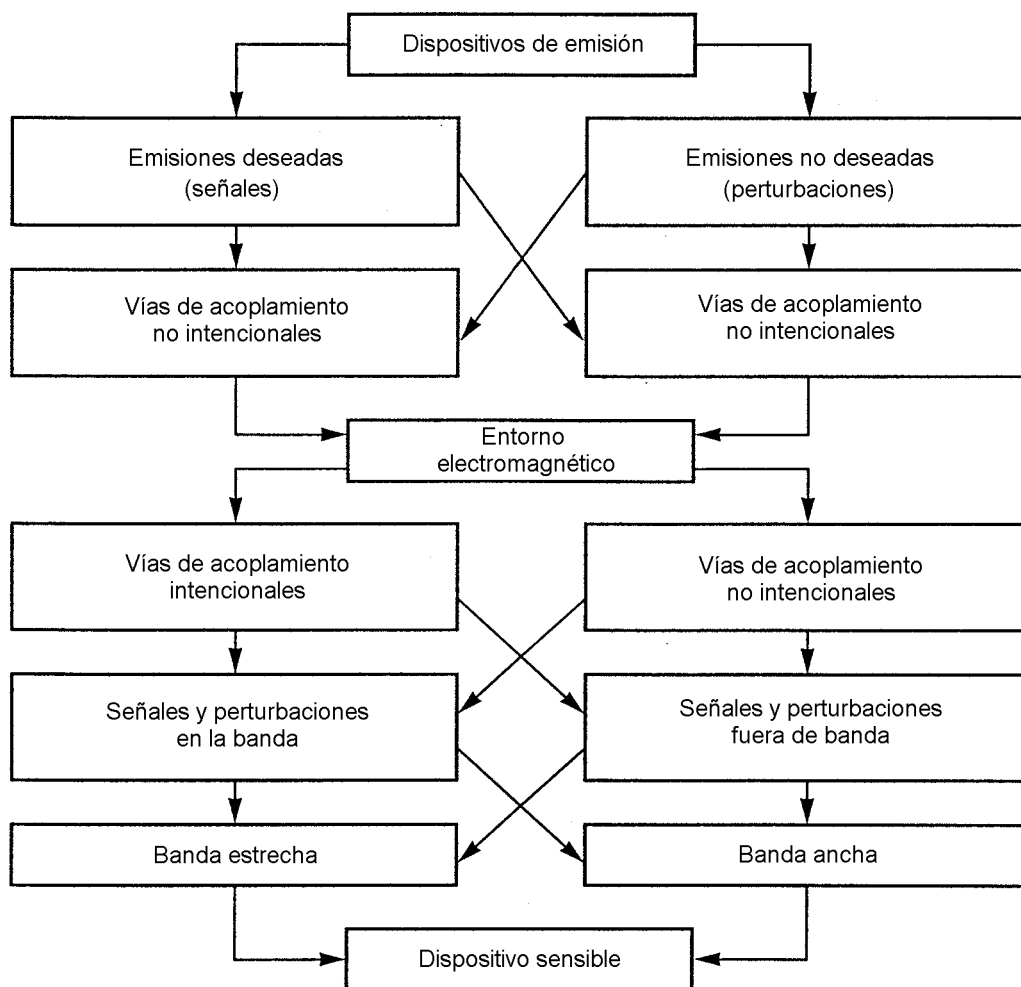
Por la razón anterior, el procedimiento adoptado en este informe consiste en especificar los niveles electromagnéticos esperados de fuentes o clases de fuentes determinadas. El nivel alcanzado en una zona dada debe ser determinado por referencia a las fuentes que existen en esta zona.

Es preciso también reconocer que no se puede identificar siempre todas las fuentes que pueden afectar a un entorno dado. Tal es el caso, por ejemplo, de las perturbaciones conducidas producidas a gran distancia en una red eléctrica, por ejemplo por cargas industriales no lineales, o por rayos imprevisibles y excepcionalmente violentos. Es importante distinguir entre redes públicas y redes industriales o privadas.

La calidad del servicio en el punto de conexión común debido a los usuarios remotos dependerá de la potencia de la red y de las cargas conectadas, lo que es poco conocido por el usuario individual. Pueden provocarse fluctuaciones de tensión por la puesta en servicio de cargas, por rayos o por fallos en la red. Dentro de la red de un consumidor, residencial o industrial, pueden preverse los efectos de baja frecuencia de cargas locales. En general, se puede esperar que las fuentes remotas limiten la calidad del servicio dado en la instalación de un usuario, y que cualquier sistema debería poder funcionar correctamente en ausencia de fuentes locales. Esto supone que la calidad del servicio sea por otra parte satisfactoria. Se puede esperar que las fuentes locales tengan efectos más importantes en la posible degradación de los sistemas y dispositivos.

### 2.1 Acoplamiento entre equipos emisores de perturbación y equipos susceptibles

La principal razón que lleva a considerar la compatibilidad electromagnética es la presencia de dispositivos (equipos, sistemas) que presentan una susceptibilidad a las emisiones electromagnéticas que provienen de otros dispositivos.



**Fig. 1 – Vías de acoplamiento entre dispositivos de emisión y equipos sensibles**

Estos dispositivos emisores pueden ser fuente de emisiones intencionales, como la difusión de señales a frecuencias de radio, o de emisiones no intencionales, tales como el campo magnético producido por las bobinas deflectoras de un tubo catódico. Por diversas vías de acoplamiento, tales emisiones pueden alcanzar el lugar en que se instale un dispositivo susceptible, como muestra la figura 1, creando así un entorno electromagnético para este dispositivo. Las subdivisiones mostradas en esta figura son importantes para la descripción del entorno electromagnético. Además, las posibilidades técnicas que permitan prevenir o resolver un problema de interferencia se relacionan con estas subdivisiones, así como las especificaciones de compatibilidad electromagnética.

El dispositivo susceptible puede exponerse a este entorno electromagnético por vías de acoplamiento intencionales, como la antena de un receptor de radio, o por vías de acoplamiento no intencionales tales como la cabeza de registro de una grabadora de vídeo, un cable de señales o un cable de alimentación de potencia. Los dos tipos de vías de acoplamiento, intencionales y no intencionales, pueden transportar perturbaciones teniendo componentes de frecuencia en la banda de frecuencias elegida para la señal deseada del dispositivo susceptible, y componentes situadas fuera de esta banda. Se puede considerar las perturbaciones recibidas como de banda estrecha o de banda ancha. Por ejemplo, la perturbación que proviene de una fuente conmutada que funciona a 40 kHz, es de banda estrecha cuando se la mide con un receptor CISPR en el rango de frecuencias de 10 kHz a 150 kHz, ya que el ancho de banda del receptor es de 200 Hz, y que cada componente armónica de esta señal puede medirse separadamente en la exploración de la banda considerada. Sin embargo, la misma perturbación es de banda ancha para un sistema de vídeo con un ancho de banda de 5 MHz debido a los armónicos de la señal a 40 kHz. Los términos banda estrecha y banda ancha están siempre determinados por el ancho de banda sobre el que la perturbación se detecta o mide. Por esto, la misma fuente puede ser a la vez de banda estrecha y de banda ancha.

## 2.2 Unidades y decibelios

El decibelio (dB) se definió originalmente como la relación  $r$  de dos potencias,  $P_1$  y  $P_2$ , disipadas en una resistencia  $R$ , y expresada en unidad logarítmica como:

$$r \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{V_1^2 / R}{V_2^2 / R} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  se miden o determinan en condiciones idénticas. Así  $r$  puede expresarse en términos de las tensiones asociadas  $V_1$  y  $V_2$  como muestra la ecuación anterior.

Si  $V_2$  se escoge como un valor unidad, por ejemplo 1  $\mu\text{V}$ , y si  $V_1$  se expresa en esta unidad, entonces  $r$  da la amplitud de  $V_1$  expresado en "dB con relación a 1  $\mu\text{V}$ ", cuya abreviatura es  $r$  (dB( $\mu\text{V}$ )). Este procedimiento es muy utilizado en el campo de la compatibilidad electromagnética (CEM). Por consiguiente, si  $Y$  es un valor unidad entonces  $X$  (dB( $Y$ )) se define por:

$$X(\text{dB}(Y)) = 20 \log_{10} \left( \frac{X}{Y} \right)$$

Existen ciertas convenciones en lo que concierne a la elección de  $Y$ . He aquí algunos ejemplos:

- En el caso de emisiones conducidas, la tensión se expresa en dB( $\mu\text{V}$ ), es decir en decibelios con relación a 1  $\mu\text{V}$ , y la intensidad en dB( $\mu\text{A}$ ), es decir en decibelios con relación a 1  $\mu\text{A}$ . Por ejemplo, 120 dB( $\mu\text{V}$ ) corresponden a  $10^6 \mu\text{V}$  o 1 V.
- En el caso de emisiones radiadas, el campo eléctrico se expresa en dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) y el campo magnético en dB( $\mu\text{A}/\text{m}$ ). Por ejemplo, 34 dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) corresponden a 50  $\mu\text{V}/\text{m}$ . En las medidas reglamentarias y en las recomendaciones CISPR, el campo magnético  $H$  se expresa habitualmente, a frecuencias inferiores de 30 MHz, en dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ ), la unidad de campo eléctrico  $E$ , cuando la expresión dB( $\mu\text{A}/\text{m}$ ) habría sido más apropiada. En tales casos, el campo magnético  $H$  en dB( $\mu\text{A}/\text{m}$ ) y en dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) cumple la relación:

$$H \text{ (dB}(\mu\text{A}/\text{m})) = H \text{ (dB}(\mu\text{V}/\text{m})) - 51,5 \text{ (dB}(\Omega))$$

donde  $51,5 \text{ dB}(\Omega) = 20 \log_{10} Z_0$  si  $Z_0 \approx 377 \Omega$  y  $Z_0 = E/H$

La impedancia de onda  $Z_0 \approx 377 \Omega$  se aplica solamente en el caso de una onda electromagnética plana. Sin embargo, esto no es aquí relevante cuando el instrumento de medida se calibra de manera que la señal inducida por el campo magnético  $H$ , en la antena de campo magnético, sea interpretada como una señal producida por un campo eléctrico de intensidad  $E = Z_0 H$ . Véase también el apartado 3.1.2.



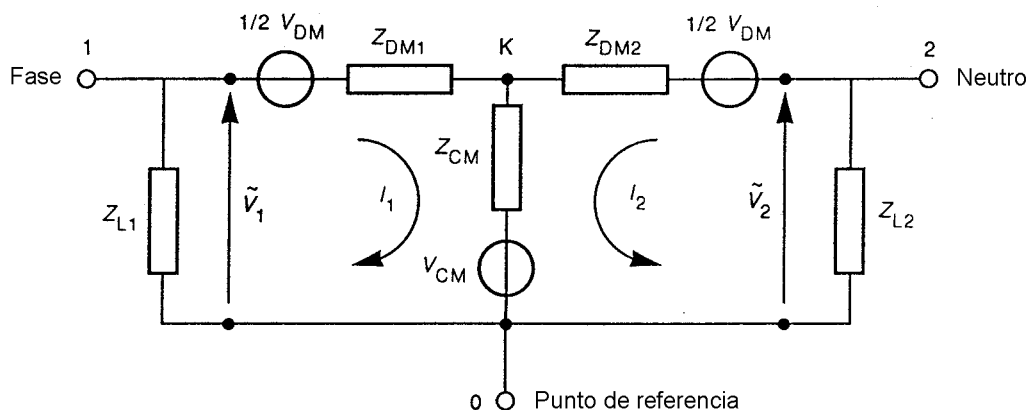
En el caso de perturbaciones conducidas importantes, la utilización de protecciones no lineales, excluye la utilización de las unidades en dB y de métodos analíticos que se basen en hipótesis de linealidad.

### 3 MODELOS DE FUENTES, ACOPLAMIENTOS Y EQUIPOS SUSCEPTIBLES, Y SUS LIMITACIONES

Cuando se examina con detalle los dispositivos eléctricos y electrónicos y las vías de acoplamiento, se puede encontrar que son extremadamente complejos. Para estudiarlos en un sentido práctico, es necesaria una simplificación, lo que se hace mediante la creación de modelos. Las fuentes de perturbación transmiten por conducción, inducción y radiación. Las vías de acoplamiento pueden implicar la conducción, la inducción o la radiación y más generalmente una combinación de estos fenómenos.

#### 3.1 Modelos de fuentes

**3.1.1 Emisiones conducidas.** Para una emisión conducida, se puede considerar a menudo la fuente como un dispositivo de dos accesos o tres bornes. La figura 2 muestra fuentes de ruido en modo diferencial ( $V_{DM}$ ) y en modo común ( $V_{CM}$ ). Los puntos de conexión 1 y 2 pueden identificarse, por ejemplo, bien como el neutro y la fase de alimentación, o como los puntos de conexión de una señal deseada de una línea de control. El punto 0 representa la referencia de la fuente; está constituida, por ejemplo, por la tierra de protección, la armadura del hormigón de un inmueble o un chasis metálico. En varios casos, puede ser necesario considerar la fuente como una red de  $N$  accesos, por ejemplo cuando se trata de un cable plano multiconductor.

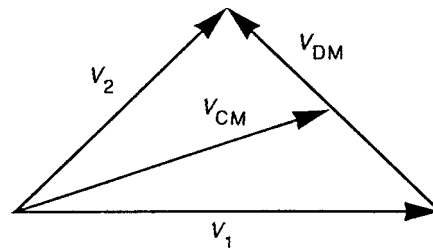


**Fig. 2 – Modelo de fuente para las emisiones de perturbaciones conducidas (Fuente cargada por  $Z_{L1}$  y  $Z_{L2}$ )**

Las tensiones  $V_{DM}$  y  $V_{CM}$  son tensiones complejas que poseen componentes deseadas así como perturbadoras. Sin embargo, la tensión deseada que viene de la fuente se representa de forma dominante por la componente  $V_{DM}$ , ya se trate de una línea de potencia o una línea de señal. Las componentes de tensión perturbadora de  $V_{DM}$  y de  $V_{CM}$  pueden ser de igual importancia.

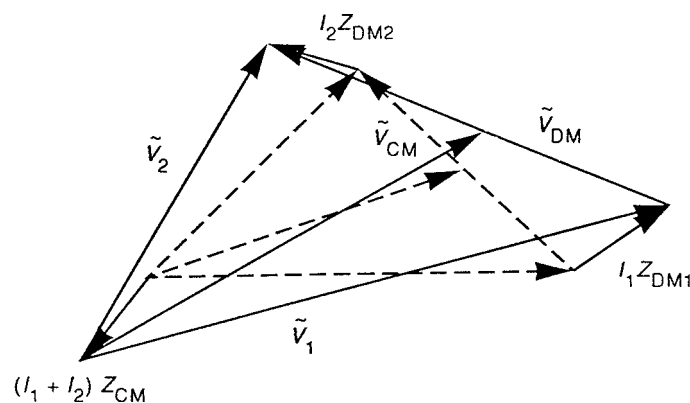
La representación relativamente simple mostrada en la figura 2 sólo es válida cuando los puntos de conexión 1, 2 y 0 están a distancias tan cortas que, en todas las frecuencias consideradas, ningún efecto de longitud de onda o de inducción de campo juega un papel perceptible. La amplitud y la impedancia de la fuente en modo común se representan respectivamente por  $V_{CM}$  y  $Z_{CM}$ . La amplitud y la impedancia de la fuente en modo diferencial se representan por dos fuentes de amplitud  $\frac{1}{2} V_{DM}$  y por las impedancias  $Z_{DM1}$  y  $Z_{DM2}$ . Es preciso observar que en general  $Z_{DM1}$  no es igual a  $Z_{DM2}$ . Valores iguales sólo se encuentran por azar, o cuando se toman medidas especiales en la construcción del sistema considerado. Si la fuente no está cargada ( $Z_{L1} = Z_{L2} = Z_{L12} = \infty$ ), el nudo K se encuentra en el “centro eléctrico”; pero, en general, no es el caso cuando la fuente está cargada porque entonces  $Z_{L1} \neq Z_{L2} \neq Z_{L12}$ . Como resultado, la corriente en modo común  $I_{CM}$  puede determinarse a la vez por  $V_{CM}$  y por  $V_{DM}$ . La corriente  $I_{CM}$  es igual a la mitad de la suma vectorial de  $I_1$  e  $I_2$ , igual que  $V_{CM}$  en la figura 3 es la suma vectorial de  $V_1$  y  $V_2$ .

La figura 3 muestra un ejemplo de la relación que existe entre las tensiones en circuito abierto  $V_{DM}$ ,  $V_{CM}$ ,  $V_1$  y  $V_2$ .



**Fig. 3 – Relación entre  $V_{CM}$ ,  $V_{DM}$ ,  $V_1$  y  $V_2$  sin carga**

La figura 4 muestra las relaciones entre las tensiones  $\tilde{V}_{CM}$ ,  $\tilde{V}_{DM}$ ,  $\tilde{V}_1$  y  $\tilde{V}_2$ , en condición de carga



**Fig. 4 – Relaciones entre las tensiones  $\tilde{V}_{CM}$ ,  $\tilde{V}_{DM}$ ,  $\tilde{V}_1$  y  $\tilde{V}_2$ , en condición de carga**

Las tensiones de perturbación conducidas de bajo nivel son generalmente medidas empleándose una red artificial que presenta una impedancia de carga bien definida. Para la red en V del CISPR, se tiene:  $Z_{L12} = \infty$  y  $Z_{L1} = Z_{L2}$  con  $Z_{L1} = 150 \Omega$  o  $50 \Omega$  en paralelo con  $50 \mu\text{H}$ , o  $50 \Omega$  en paralelo con  $5 \mu\text{H}$ . Se considera que estos valores se relacionan con el valor absoluto (medio) de la impedancia de la red de alimentación real, que depende, entre otras cosas, de la corriente para la que esta red está dimensionada. Es importante observar que la red artificial mencionada aquí no se utiliza para todas las aplicaciones, por ejemplo en el caso de la propagación de transitorios.

Se debe constatar que las medidas de emisión de las fuentes tienen un carácter limitado. Por ejemplo, para determinar la conformidad a un límite de emisión conducida, la medida se hace utilizando una impedancia de carga especificada. No se mide directamente la impedancia de la fuente. Así cuando una fuente dada se coloca en un circuito cuya impedancia difiere de la impedancia de medida, el nivel de emisión real diferirá de la que se ha medido. Desviaciones de este género deben tomarse en consideración por los ingenieros de la CEM en el diseño de sistemas compatibles.

**3.1.2 Emisiones radiadas.** Los niveles de emisión de perturbaciones radiadas están normalmente indicados en términos de niveles de campo eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $H$ ), expresados en dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) y dB ( $\mu\text{A}/\text{m}$ ). Las fuentes particulares difieren por la magnitud relativa de estas dos componentes y por sus variaciones en función de la distancia.

En la zona descrita de campo remoto de una fuente, la distancia entre la fuente y el punto de observación del campo es mucho mayor que  $\lambda/(2\pi)$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda del campo, y mayor que las dimensiones de la fuente. A tales distancias, y en ausencia de objetos reflectantes próximos, los campos  $E$  y  $H$  son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Por otra parte, existe entre la magnitud de  $E$  y la de  $H$  una relación fija que establece una correspondencia entre los niveles de los campos eléctrico y magnético. En campo remoto y espacio libre,  $E/H \approx 377 \Omega$ , y los niveles del campo decrecen inversamente con la distancia de la fuente.

En la zona de campo próximo de la fuente, la distancia entre la fuente y el punto de observación es, o bien mucho más pequeña que  $\lambda/(2\pi)$  o más pequeña que la dimensión de la fuente, o ambas. La relación entre los campos  $E$  y  $H$  depende entonces de la longitud de onda de las perturbaciones, de la posición real en la zona de campo próximo y del tipo de fuente.

Un modelo simple para la radiación es el dipolo que puede ser de tipo eléctrico o magnético (véase figura 5). Este modelo presenta una variación de la intensidad de su componente dominante (campo eléctrico para dipolo eléctrico, campo magnético para dipolo magnético) que evoluciona como la inversa del cubo de la distancia, en campo próximo. Para tales fuentes, el conocimiento de la “potencia del dipolo” permitirá calcular las componentes de campo (eléctrico y magnético) a cualquier distancia. Sin embargo es más corriente medir la componente dominante a una distancia determinada, sin hacer referencia a la potencia de la fuente.

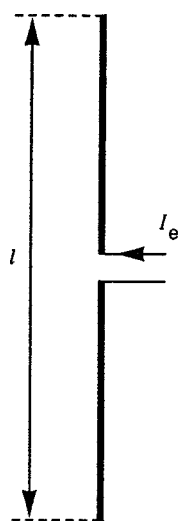
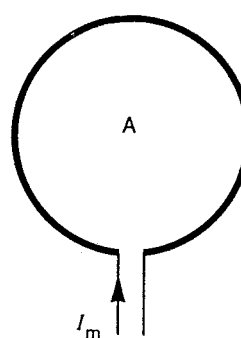


Fig. 5a – Dipolo eléctrico de intensidad =  $l \cdot I_e$



A = aire de la sección del bucle

Fig. 5b – Dipolo magnético de intensidad =  $A \cdot I_m$

**Fig. 5 – Dipolos eléctricos y magnéticos**

En el caso de emisores de radio, la ganancia de la antena en la vía de acoplamiento intencional y la potencia neta  $P_t$  transferida hacia la antena son normalmente conocidas. Como la ganancia de la antena está siempre en función de la dirección de la antena, la ganancia normalmente mencionada es la que corresponde a la dirección de la radiación máxima.

La potencia radiada eficaz o equivalente,  $PRE$ , de una antena se define de la siguiente manera:

$$PRE = G_r P_t$$

Donde  $G_r$  es la ganancia de la antena que corresponde a la directividad máxima  $G_h$  de un dipolo de semionda.

La intensidad del campo eléctrico producida por una antena a una distancia  $r$  en el campo remoto se expresa por:

$$E = \sqrt{\frac{ZG_h \cdot PRE}{4\pi r^2}} = 7 \frac{\sqrt{PRE}}{r}$$

donde  $G_h = 1,64$  y  $Z$ , la impedancia de onda del medio, igual a  $377 \Omega$  en el espacio libre.

De lo que resulta:

$$\sqrt{\frac{ZG_h}{4\pi}} = 7 \Omega^{1/2}$$

El término “potencia radiada isotrópicamente eficaz o equivalente, *PIRE*” se utiliza también para las antenas. La relación entre *PRE* y *PIRE* se da por:

$$PIRE = G_h PRE.$$

### 3.2 Modelos de acoplamiento

Los fenómenos implicados en la transferencia de energía electromagnética de una fuente a un equipo susceptible, son, en general, muy complejos. En casos particulares puede ser difícil un cálculo exacto de la energía transmitida. Sin embargo, en numerosos casos el acoplamiento dominante puede describirse por modelos relativamente simples. Estos modelos se dividen en tres grandes clases: acoplamiento por impedancia común, acoplamiento por inducción (campo próximo) y acoplamiento radiado (campo remoto).

**3.2.1 Acoplamiento por impedancia común.** Este tipo de acoplamiento se denomina también acoplamiento por conducción. Aparece cuando corrientes o una parte de las corrientes asociadas a una fuente y a un equipo susceptible comparten un camino del circuito. Puede representarse típicamente el camino común del circuito por una resistencia, una inductancia, una capacidad o una combinación de éstas. Entre los numerosos ejemplos, pueden citarse dos casos que son la puesta en común para una fuente y un equipo susceptible 1) de una alimentación de potencia, y 2) de un circuito de retorno de la corriente por masa.

#### Acoplamiento resistivo

La parte resistiva de la impedancia común  $R_c$  se determina por la naturaleza del conductor y por el efecto pelicular, de donde resulta que la parte resistiva viene a ser dependiente de la frecuencia. Para un conductor recto y redondo de diámetro  $d$  tenemos:

$$R_c / R_{dc} \approx d / 4 \delta \quad \text{si } \delta \ll d$$

$$\text{y } R_c / R_{dc} \approx 1 \quad \text{si } \delta \gg d$$

donde  $R_{dc}$  es la resistencia en corriente continua del conductor y  $\delta$  es la profundidad superficial dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la señal,  $\mu$  la permeabilidad, y  $\sigma$  la conductividad del material del conductor.

#### Acoplamiento reactivo

La parte reactiva del acoplamiento de impedancia común puede resultar de una inductancia común. La reactancia inductiva común  $X_L$  puede escribirse:

$$X_L = \omega L_L$$

donde  $L_L$  es la inductancia del conductor. El valor de  $L_L$  depende de la forma del bucle de corriente y de su entorno. Sin embargo, de forma empírica, se puede decir que  $L_L = 1 \mu\text{H/m}$  (o  $1 \text{ nH/mm}$ ). En numerosos problemas de perturbación electromagnética  $X_L \gg R_c$ . Para los fenómenos transitorios, esta última relación se verifica siempre a pesar de la importancia dada a las secciones de los conductores de conexión a tierra.

**3.2.2 Acoplamiento por inducción.** El acoplamiento por inducción aparece cuando son inducidas tensiones o corrientes en los circuitos del equipo susceptible por campos eléctricos o magnéticos locales, o por una combinación de los dos, que proviene de la fuente. Son ejemplos: circuitos de control/mando cerca de un gran transformador, de un horno o de una máquina de soldar por arco, o también cerca (y en paralelo) de circuitos de transporte de energía tales como una línea de alimentación y una línea de telecomunicación.

a) Acoplamiento por campo eléctrico

El acoplamiento por campo eléctrico, o acoplamiento capacitivo, aparece cuando los campos eléctricos de un circuito invaden los de otro circuito. Para la aproximación a baja frecuencia, se puede describir este tipo de acoplamiento como la de una capacidad de acoplamiento. El valor de la capacidad de acoplamiento depende esencialmente de la situación real, es decir de la forma de los circuitos y del entorno de estos circuitos. En la figura 6 se da un ejemplo, donde la capacidad de acoplamiento por unidad de longitud  $C_{12}$  se da, para dos hilos (de diámetro  $d$ ) de dos bucles paralelos con una distancia  $D$  entre ambos, utilizando el plano del suelo como retorno común, para tres valores de la altura del bucle.

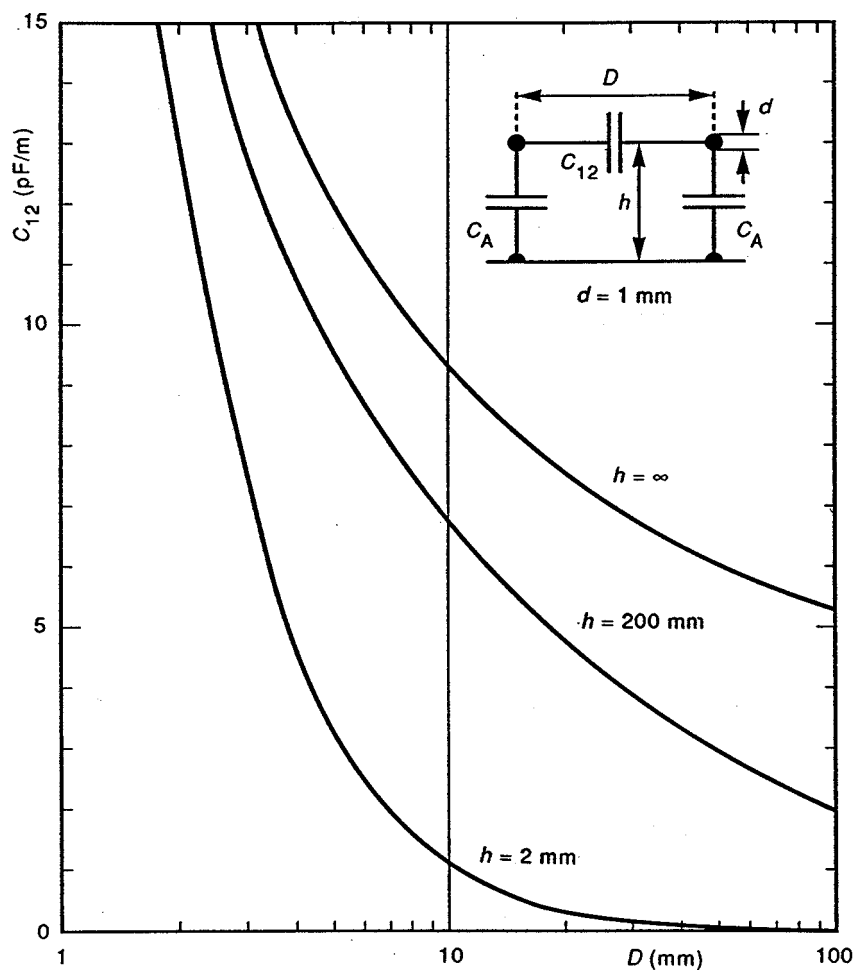


Fig. 6 – Capacidad por unidad de longitud en función de la distancia entre conductores

La figura 6 muestra claramente la influencia del entorno sobre  $C_{12}$ . También muestra que  $C_{12}$  varía rápidamente con  $D$  pero que para  $D/d > 10$  la capacidad del acoplamiento no varía mucho con  $D$ . Es preciso observar que para valores de  $h$  suficientemente grandes la ecuación para la capacidad de acoplamiento se reduce a:

$$C_{12}(h \rightarrow \infty) = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{2D}{d}\right)} \quad \text{F/m}$$

que es la ecuación de la capacidad entre hilos en ausencia de plano del suelo.

El ejemplo anterior se aplica igualmente en el caso de dos cables paralelos a un plano metálico, es decir una pantalla o un conducto, que es la referencia de las tensiones de modo común de los cables.

Finalmente, en los casos en que la realimentación del circuito receptor sobre el circuito emisor es despreciable, y si los circuitos son cortos con relación a la longitud de onda considerada, la perturbación que resulta del acoplamiento capacitivo puede representarse en el circuito receptor por una fuente de corriente. Se puede definir de manera aproximada la corriente de esta fuente por la fórmula:

$$I_C = j\omega C_{12} V$$

donde  $V$  es la tensión de excitación del lado emisor de  $C_{12}$ .

#### b) Acoplamiento por campo magnético

El acoplamiento por campo magnético, o acoplamiento inductivo, aparece cuando el campo magnético que emana de un circuito invade el de otro circuito. La inductancia mutua es una magnitud apropiada para definir este tipo de acoplamiento. Su valor depende grandemente de la disposición real, por ejemplo de la forma de los circuitos y de su entorno, como en el caso del acoplamiento capacitivo.

En los casos en que la realimentación del circuito receptor sobre el circuito emisor es despreciable y donde los circuitos son cortos con relación a la longitud de onda considerada, la perturbación causada por el acoplamiento magnético puede representarse en el circuito receptor por una fuente de tensión. La amplitud de esta fuente de tensión puede ser expresada aproximadamente por la fórmula:

$$V_1 = j\omega M_{12} I$$

donde  $M_{12}$  es la inductancia mutua entre los dos circuitos concernidos, e  $I$  es la corriente del circuito emisor. Esta amplitud puede también escribirse como  $j\omega B_1 A_2$ , donde  $A_2$  es la superficie del bucle del receptor, y  $B_1$  la inducción magnética creada por el bucle emisor en el bucle receptor. Esta última expresión supone que  $B_1$  es una constante en la superficie  $A_2$ .

Un modelo muy útil es el que considera el campo magnético que existe en la proximidad de una línea de transporte de energía de hilos paralelos. La magnitud del campo en función del espacio existente entre los hilos paralelos y de la distancia con relación a los hilos se muestra en la figura 7. Si la distancia es grande comparada con la separación, la intensidad del campo decrece como  $1/r^2$ . Si la distancia es pequeña comparada con la separación, el campo se calcula como en el caso de un único hilo (el más próximo).

Las fuentes magnéticas tales como transformadores, relés, etc., producirán campos magnéticos cuya amplitud decrece con la inversa del cubo de la distancia.

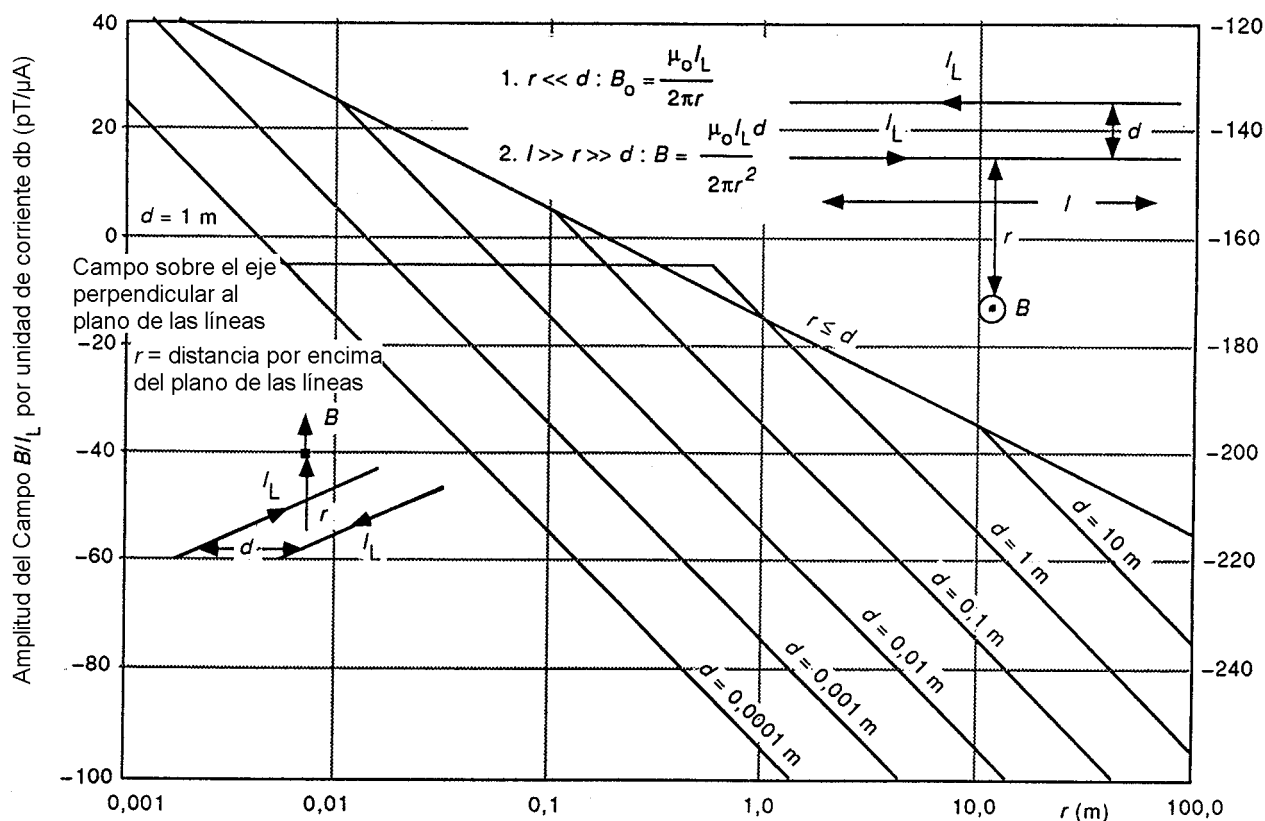


Fig. 7 – Campo magnético producido por conductores paralelos

c) Acoplamientos mixtos

En numerosos casos, los mecanismos de acoplamiento expuestos en los apartados precedentes se producen simultáneamente. La determinación del mecanismo dominante, entre los tres presentados, depende de la situación real. Es posible indicar, en un número limitado de casos, si es el acoplamiento capacitivo quien dominará sobre el acoplamiento magnético, o inversamente. El caso de acoplamiento entre dos hilos paralelos es un ejemplo. Suponiendo que el circuito receptor esté terminado por su impedancia característica en los dos extremos, el acoplamiento magnético dominará si el circuito emisor está terminado con una impedancia inferior a la impedancia característica, y es el acoplamiento capacitivo quien dominará si la impedancia es más alta que aquella.

**3.2.3 Acoplamiento radiado.** El acoplamiento radiado es el medio de acoplamiento principal cuando la fuente y el equipo susceptible están relativamente alejados, es decir en la situación de campo remoto. El mecanismo de acoplamiento por radiación electromagnética y las tensiones inducidas en los circuitos del equipo susceptible pueden calcularse bien a partir del campo eléctrico, o a partir del campo magnético ya que existe una relación fija entre los dos. En general, no hay realimentación del equipo susceptible sobre la fuente. Un ejemplo de acoplamiento radiado es un receptor sensible o un elemento de control/mando afectado por el campo producido por un emisor de radar o un equipo industrial de calefacción a alta frecuencia relativamente remotos.

**3.3 Modelos de equipos susceptibles**

La energía perturbadora se transmite a un equipo susceptible de la misma manera que a partir de un emisor, es decir por conducción o por radiación. Los modelos se simplifican de manera que den informaciones sobre los niveles de tensión o de corriente perturbadores presentes en las líneas de alimentación, de señales o de control a los que se conectan, así como sobre los niveles de los campos eléctricos o magnéticos homogéneos, suponiendo la polarización más perturbadora, en los que puede ser inmerso un dispositivo o un equipo dado. Los niveles pueden depender de la forma de onda y de la frecuencia de la perturbación, de su tasa de repetición (si es periódica o casi periódica), y de las características de los circuitos internos. Numerosos mecanismos de generación de perturbación dentro de los equipos han sido tratados en la literatura, pero están fuera del campo de este informe revisarlos.

Sin embargo, es importante observar que los parámetros utilizados preferentemente en la descripción del entorno dependen de las características del equipo correspondiente.

#### **4 NIVELES DE EMISIÓN Y ENTORNO**

Dados los modelos que se acaban de identificar, es necesario conocer las características de las fuentes típicas y los mecanismos de acoplamiento correspondientes.

##### **4.1 Entorno conducido**

Para la red de alimentación, son importantes la tensión perturbadora que aparece en la red y la capacidad de la fuente de producir grandes impulsos de corriente. Las tensiones entre fases y entre fase y tierra deberían ser conocidas. La atenuación en un edificio puede ser despreciable o importante según las características de la instalación y de las líneas.

Para las líneas de transporte de la información, las perturbaciones que aparecen en los bornes de un equipo a las que están conectadas dependen de la influencia de los campos electromagnéticos (principalmente eléctricos o principalmente magnéticos) en el entorno atravesado por las líneas, igual que de las corrientes de modo diferencial y de modo común inyectadas directamente en las líneas por otros equipos conectados.

##### **4.2 Entorno por campo de inducción**

Los campos de inducción importantes son los que provienen de los equipos individuales como transformadores, solenoides y dispositivos magnéticos similares, y los de las redes de alimentación, en especial cuando existe una distancia importante entre los conductores de alimentación. Los primeros crean campos magnéticos cuya intensidad varía en relación inversa con el cubo de la distancia. Los campos producidos por las redes varían en razón inversa de la distancia cuando la distancia es inferior a la separación de los conductores, y en razón inversa del cuadrado de la distancia cuando la distancia es más grande que la separación, cuando la propagación es exclusivamente en modo diferencial. En el caso de campos causados por corrientes de modo común, la intensidad del campo varía en proporción inversa a la distancia.

##### **4.3 Entorno radiado**

La intensidad de los campos radiados se expresa tradicionalmente en términos de intensidad de campo eléctrico o magnético a una distancia especificada, por ejemplo de 3 m, 10 m o 30 m. Si las condiciones de campo remoto existen a esta distancia, la intensidad del campo puede ser estimada para cualquier distancia superior en un entorno libre de reflexión. En tales condiciones, el *PRE* y el *PIRE* (véase el apartado 3.1) pueden ser utilizados como una definición conveniente del nivel de entorno.

##### **4.4 Consideraciones estadísticas**

Todas las fuentes de perturbaciones así como los acoplamientos entre fuente y equipos susceptibles pueden especificarse cuantitativamente en términos de parámetros específicos. Cuando se procede a la descripción de un entorno dado, es preciso reconocer que estos parámetros están sujetos a variaciones estadísticas, bien de una fuente a otra fuente de un tipo dado, o en función del tiempo para una fuente dada. Por ejemplo, la impedancia de la red puede variar cuando los equipos que están conectados son puestos en tensión, y la distribución de los campos puede depender de manera crítica de la posición de objetos o de persona en la proximidad de la fuente o del equipo susceptible. Así la precisión de las previsiones hechas sobre las condiciones de un entorno pueden depender mucho del conocimiento preciso de estos factores.

Como se ha observado anteriormente los niveles de perturbación pueden variar según la distancia de la fuente. Como pueden implantarse dispositivos susceptibles a distancias aleatorias, pueden encontrarse de un lugar a otro variaciones muy importantes en la intensidad de los campos.



#### 4.5 Consecuencias sobre los límites

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, la especificación de límites debe tener en cuenta incertidumbres estadísticas relativas a los niveles de tensión, corriente o intensidad de campo contra las que es necesaria protección. Se puede elegir entre, por una parte, dispositivos de inmunidad alta o de un bajo nivel de emisión, que asegure la protección en todas las configuraciones, y por otra parte la imposición de restricciones en la localización de los dispositivos susceptibles, que permitan atenuar el rigor de los límites. La filosofía a adoptar dependerá finalmente de factores económicos y de parámetros críticos que deberán ser, en cada caso, determinados entre el fabricante y el usuario.

Queda entendido que los niveles del entorno, en un emplazamiento dado, estimados según los métodos descritos más abajo, dependen de las prácticas de instalación usadas en el lugar considerado.

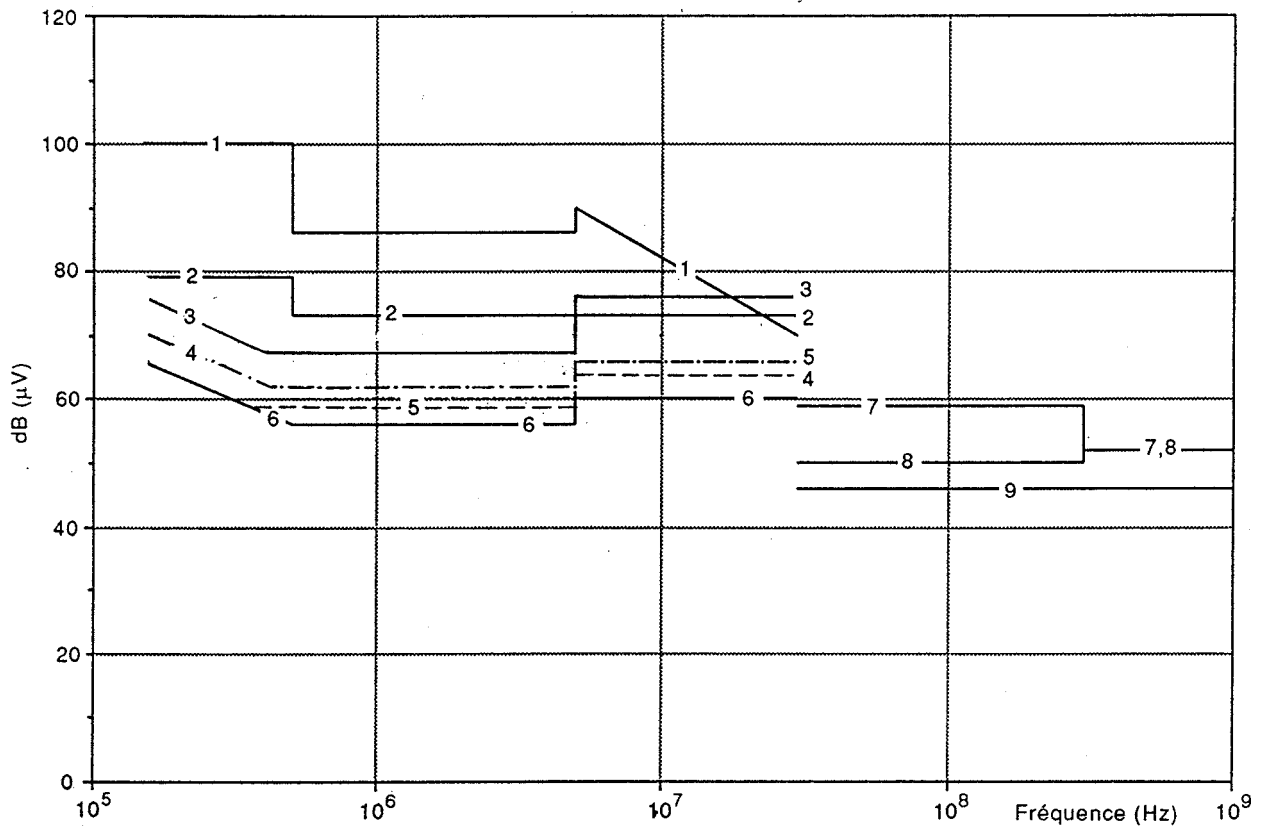
Se puede instalar el equipo de una manera especial para protegerlo contra las degradaciones de funcionamiento que sufriría de otro modo.

#### 4.6 Entorno definido por referencia a los límites normalizados

Han sido especificados límites normativos de las emisiones por las autoridades legales nacionales e internacionales, y por organizaciones de normalización voluntarias. En la medida en que estos límites se apliquen, sirven para definir los niveles del entorno. Como ejemplos, se puede mencionar el entorno en un avión comercial y el entorno general donde pueden ser situados receptores de radio.

**4.6.1 El entorno conducido.** Por ejemplo, la figura 8 resume los niveles de emisión conducida de bajo nivel recomendados por CISPR para la gama de frecuencias que va desde 150 kHz a 1 GHz. Estos niveles se dan en dB ( $\mu$ V), medido en una red artificial que, para valores inferiores a 30 MHz, simulan la impedancia de la línea de alimentación, y para valores superiores a 30 MHz, la de la antena.

Es preciso observar que los niveles varían de alrededor de 200  $\mu$ V hasta alrededor de 16 mV según la frecuencia y el equipo que genera la emisión. Los niveles indicados son los medidos con un receptor CISPR que contiene un circuito compensador cuasi-cresta previsto para establecer una correlación de primer orden entre la magnitud medida y el efecto perturbador producido en la recepción de radio por diversas formas de onda. Como numerosas fuentes de perturbaciones están realmente sujetas a tales límites, se considera que los niveles indicados son representativos de lo que se puede esperar encontrar en los conductores de alimentación. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, no todos los equipos están controlados y es preciso estar particularmente atento a la posibilidad de que equipos no controlados sean conectados de manera que puedan afectar un entorno particular. En algunos países, han sido adoptados límites por debajo de 150 kHz.

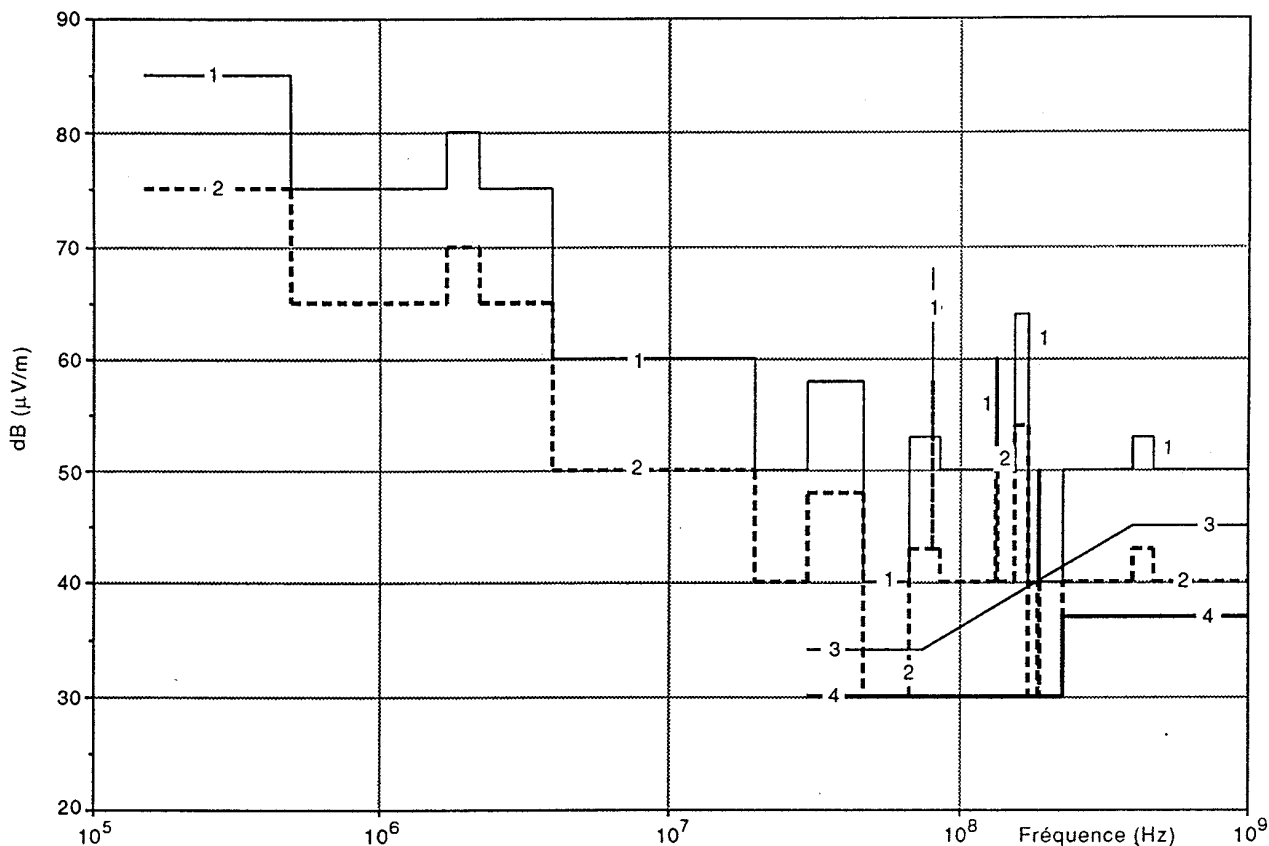


- 1) Equipos ICM del grupo 2, clase A, cuasi-cresta
- 2) Equipos ICM del grupo 1, clase A, cuasi-cresta, y ETI, clase A, cuasi-cresta
- 3) Herramientas portátiles (de 1 000 a 2 000 W)
- 4) Herramientas portátiles (de 700 a 1 000 W)
- 5) Herramientas portátiles (< 700 W)
- 6) Equipos ICM de clase B, cuasi-cresta, y ETI, clase B, cuasi-cresta
- 7) Autorradios en frecuencia modulada
- 8) Receptores de radiodifusión en frecuencia modulada
- 9) Receptores de televisión y grabadoras de vídeo
- 10) Frecuencia (Hz)

**Fig. 8 – Límites de CISPR para la emisión de perturbaciones conducidas**

La utilización de un detector cuasi-cresta sólo es significativa para los problemas de perturbaciones que conciernen a la recepción de señales de radiodifusión. Para problemas más generales de CEM, la utilización del detector cuasi-cresta puede conducir a informaciones engañosas. De manera similar, la red artificial utilizada en el método de medida normalizado de CISPR puede no ser válida para otras aplicaciones.

**4.6.2 Entorno radiado.** La figura 9 es un resumen de los niveles límite de CISPR. Es conveniente observar que estos niveles se dan en términos de intensidad de campo eléctrico para distancias especificadas; así, esta lista de niveles radiados no puede utilizarse, para un emplazamiento particular, mas que en la medida que la posición y naturaleza de cada fuente pueda identificarse.



- 1) Equipos ICM del grupo 2, clase A, distancia de medida 30 m
- 2) Equipos ICM del grupo 2, clase A, medido a una distancia de 30 m a partir del muro exterior del edificio en el que se encuentra el equipo
- 3) Vehículos, barcos de motor y máquinas arrastradas por motores de encendido controlado, distancia de medida 10 m
- 4) Equipos ICM del grupo 1, distancia de medida 30 m

**Fig. 9 – Límites de CISPR para la emisión de perturbaciones radiadas (intensidad del campo)**

## 5 EMISORES INTENCIONALES

Los emisores intencionales aportan señales intencionales al entorno electromagnético por vías de acoplamiento intencionales. Citemos como ejemplo de emisión conducida intencional, la tensión de la red de alimentación, las señales por corrientes portadoras o las señales lógicas en un bus digital, y como emisión radiada intencional los emisores de radiodifusión, las balizas de navegación o los controles a distancia.

## 5.1 Emisores de radio

Los servicios autorizados, las potencias radiadas, las distancias usuales de los transmisores-receptores que corresponden a las regiones habitadas, y las intensidades de campo calculadas se indican en la tabla 1. Salvo en lo que concierne a las bandas de onda larga (de 0,014 MHz a 0,5 MHz), la intensidad de los campos se da para las distancias más allá del campo de inducción.

## 5.2 Otras fuentes de radiación intencional

Las radiaciones intencionales provienen también de sistemas distintos de los tipos de emisores citados en la tabla 1, por ejemplo los equipos industriales, científicos y médicos (véase el apartado 6.13.1) y los dispositivos de control a distancia. Para estos últimos se puede citar por ejemplo los sistemas de apertura de puertas de garaje y los dispositivos de alarma contra intrusos. Estos sistemas producen campos en bandas de frecuencia restringidas con una potencia de salida relativamente baja. Su nivel sólo tiene importancia en su proximidad inmediata y, en consecuencia, no están sometidos a autorización.

**Tabla 1**  
**Ejemplos de intensidades de campos típicos para emisiones autorizadas**

Servicio	Rango de frecuencia en MHz	PRE	Rango típico de distancias de separación	Rango de intensidad de campo calculado V/m*
Radio LF y marítima	0,014 – 0,5	2500 kW	2 – 20 km	5,5 – 0,55
Radio AM	0,2 – 1,6	50 – 800 kW	0,5 – 2 km	12,5 – 0,78
Aficionados HF	1,8 – 30	1 kW	10 – 100 m	22,1 – 2,21
Comunicaciones HF incluidos radio SW	1,6 – 30	10 kW	1 – 20 km	0,7 – 0,04
Banda ciudadana	27 – 28	12 W	10 – 100 m	2,4 – 0,24
Aficionados VHF/UHF	50 – 52 144 – 146 432 – 438 1 290 – 1 300	1 – 8 kW 1 – 8 kW 1 – 8 kW 1 – 8 kW	10 – 500 m	63 – 0,44**
Comunicaciones fijas y móviles	29 – 40 68 – 87 146 – 174 422 – 432 438 – 470 860 – 990	50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W	2 – 200 m	40 – 0,25
Teléfonos portátiles incluido teléfono sin hilo	1880 – 1990	5 W 1 W (DECT)	1 – 100 m 0,5 – 10 m	15,6 – 1,56 14 – 0,7
TV VHF	48 – 68 174 – 230	100 – 320 kW	0,5 – 2 km	8 – 1,11**
Radio FM	88 – 108	100 kW	0,25 – 1 km	8,9 – 2,2**
TV UHF	470 – 853	500 kW	0,5 – 3 km	10 – 1,6**
Radar	1000 – 30 000	1 kW – 10 GW	2 – 20 km	350 – 1,6 (cresta)

\* Calculado según la fórmula:

$$E = 7 \frac{\sqrt{PRE}}{r}$$

suponiendo que la antena de emisión se comporta como un dipolo semionda en espacio libre y en campo remoto.

\*\* La intensidad de los campos se indica cuando el objeto receptor se coloca en el haz de la antena.

### 5.3 Sistemas de corrientes portadoras

Entre las fuentes de emisiones conducidas intencionales se encuentra los sistemas de corrientes portadoras utilizadas para el control a distancia o las comunicaciones. Las aplicaciones típicas son las siguientes:

- a) sistemas de comunicación que utilizan las líneas de alta tensión como soporte;
- b) sistemas de control a distancia y de medida en las redes de alta, media y baja tensión;
- c) sistemas domésticos de uso privado.

En líneas de alta tensión, los sistemas de comunicación utilizan frecuencias en el rango comprendido entre 30 kHz y 500 kHz. La potencia de transmisión está limitada a 10 W. Las líneas están generalmente equipadas con filtros de bloqueo en cada uno de sus extremos para evitar las perturbaciones entre las diversas redes.

Los sistemas de comunicación utilizados por algunos productores de energía para control a distancia y medida trabajan en dos rangos de frecuencia: de 100 Hz a 3 kHz (telecontrol centralizado) y de 3 kHz a 95 kHz (sistemas de corrientes portadoras). Las señales se componen de series de impulsos codificados relativamente largos, hasta de 2,5 s de duración.

Los sistemas de telecontrol centralizado deben evitar los armónicos de la frecuencia básica industrial y los sistemas modernos sólo utilizan las frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 2 kHz, con preferencia en las frecuencias hasta 500 Hz. Las señales emitidas en este rango de frecuencias se propagan a partir de la red de alta tensión hacia la red de baja tensión por la red de media tensión. El nivel de la señal varía de un valor máximo del 5% a un valor mínimo del 0,5% de la tensión nominal de la red en el punto de recepción. Es conveniente observar que en los sistemas eléctricos de telecontrol centralizado, la componente de la tensión a la frecuencia del telecontrol centralizado puede alcanzar los valores de la curva de Meister.

Los sistemas de corrientes portadoras trabajan en el rango de frecuencias comprendidas entre 3 kHz y 20 kHz cuando están destinados a cubrir las redes de media y baja tensión. El nivel de la señal varía de un valor máximo del 2% a un valor mínimo del 0,02% de la tensión nominal de la red. Los sistemas que trabajan en la gama de las frecuencias comprendidas entre 20 kHz y 95 kHz sólo conciernen normalmente a una sola red, generalmente la red de baja tensión. El nivel de señal presente en la red de baja tensión varía generalmente de 0,15V al 0,5% de la tensión de la red. Sin embargo, está en estudio una norma que especificará el nivel máximo permisible de estas señales.

Los sistemas electrónicos domésticos o de uso privado utilizan frecuencias en el rango de 95 kHz a 148,5 kHz, y hasta 450 kHz en los países en que los emisores de onda larga no se utilizan. Los niveles de tensión autorizados son los mismos que para las redes de baja tensión citadas anteriormente. La duración de un ciclo de emisión varía, en función del sistema, entre algunos segundos y algunos minutos. Cada día pueden tener lugar varias emisiones según el sistema utilizado.

Existen otros sistemas que utilizan una deformación de la tensión senoidal como medio de codificación de la información como, por ejemplo, el sistema Ciclocontrol utilizado en el Reino Unido y en los Estados Unidos.

## 6 EMISORES NO INTENCIONALES

Existen tres clases principales de emisores no intencionales: fuentes de ruidos físicos, ruidos de origen humano, y perturbaciones atmosféricas. Estas diferentes clases de ruidos se presentan a continuación.

### 6.1 Fuentes de ruido físico

Conciernen a dos tipos de ruido físico: los ruidos térmicos y las otras formas de ruido interno. En general, las fuentes de ruido físico determina la relación señal-ruido (S/R) máxima que puede obtenerse en un sistema. Las señales perturbadoras pueden causar una degradación de esta relación. En la mayor parte de las aplicaciones, las fuentes de ruido físico son de tipo de banda ancha.

**6.1.1 Ruidos térmicos.** El ruido térmico nace de los movimientos desordenados de los electrones libres en un conductor bajo el efecto de la agitación térmica y crea una tensión de ruido en los extremos abiertos del conductor. En la mayor parte de los casos, las componentes frecuenciales de esta tensión de ruido son uniformes en todo el espectro de frecuencias. Esta fuente de ruido se caracteriza normalmente por su valor eficaz  $e_n$  o por su potencia disponible  $P_n$ :

$$e_n = \sqrt{4kTRB}$$

$$P_n = kTB$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann =  $(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$ ,  $T$  es la temperatura absoluta del conductor que tiene una resistencia de  $R \Omega$ , y  $B$  es el ancho de banda sobre el cual  $e_n$  y  $P_n$  son medidas.

**6.1.2 Otras fuentes de ruido interno.** El funcionamiento de los equipos depende normalmente del movimiento de partículas cargadas (electrones, huecos). En general, este movimiento puede considerarse como un movimiento aleatorio superpuesto a un movimiento constante en una dirección dada. La parte aleatoria del movimiento es el origen de las fuentes de ruido del equipo. Ejemplos: ruidos de disparos, flicker, emisión secundaria y ruido en  $1/f$ . La descripción de estas fuentes está fuera del campo de aplicación de este informe.

## 6.2 Ruidos de origen humano

La mayor parte de los ruidos no intencionales – pero no la totalidad – son de banda ancha, ya sea del tipo de impulsos, como los fenómenos de conmutación, o de tipo aleatorio, como el efecto corona en las líneas de alta tensión. Si la densidad espectral de este ruido puede tenerse por constante en el ancho de banda  $B$ , su efecto se compara a menudo al del ruido térmico por introducción de la potencia de ruido efectivo  $P_{ne}$ :

$$P_{ne} = F_a P_n = F_a kTB$$

donde el factor de ruido  $F_a$  representa el ruido en exceso comparado con el ruido térmico. Los valores a prever para  $F_a$  se dan en la figura 10 [1]\* para las zonas rurales, residenciales y comerciales, y muestran que  $F_a$  aumenta con la densidad de población. Los valores indicados en la figura 10 suponen que  $P_{ne}$  se determina con una antena sin pérdidas a la temperatura de 300 K.

---

\* Los números que figuran entre corchetes se remiten a la bibliografía.

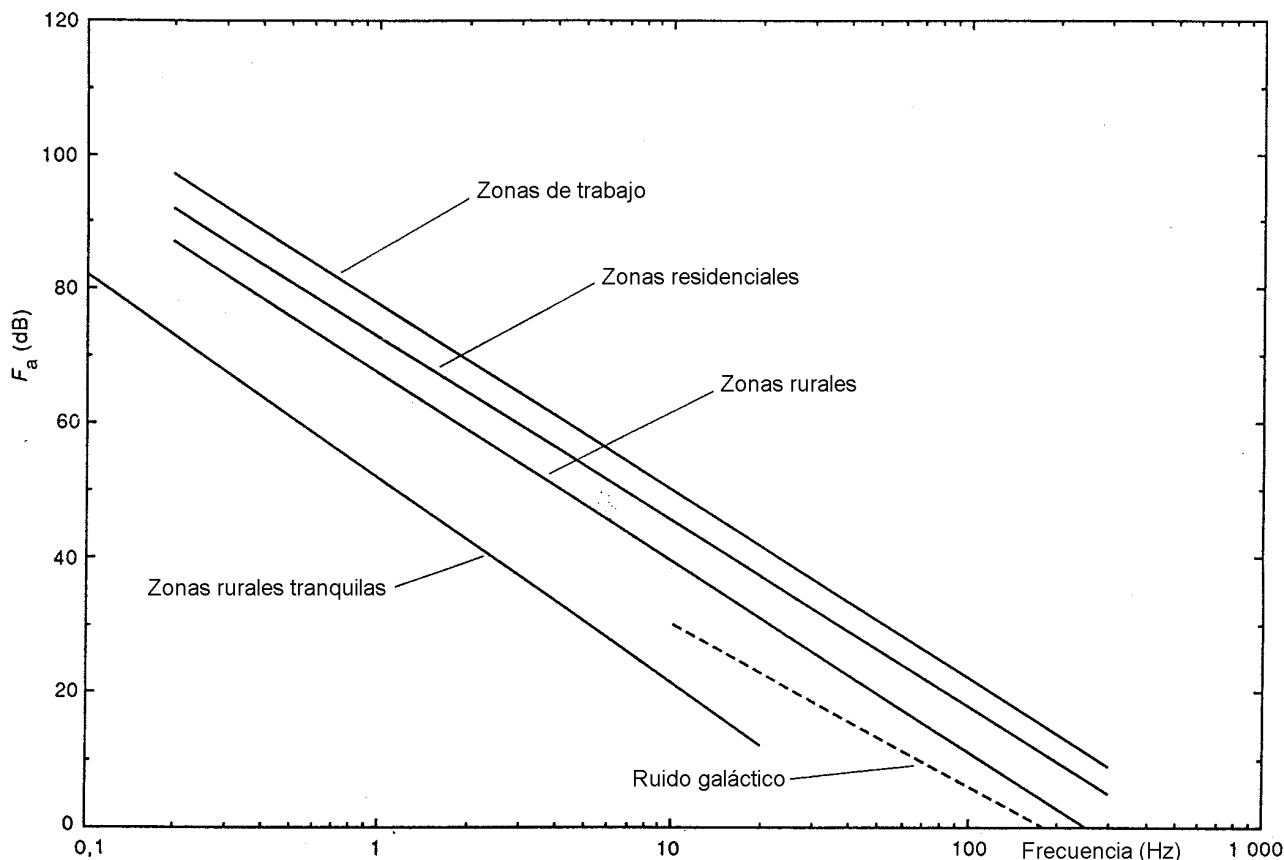


Fig. 10 – Niveles predecibles de ruidos de origen humano

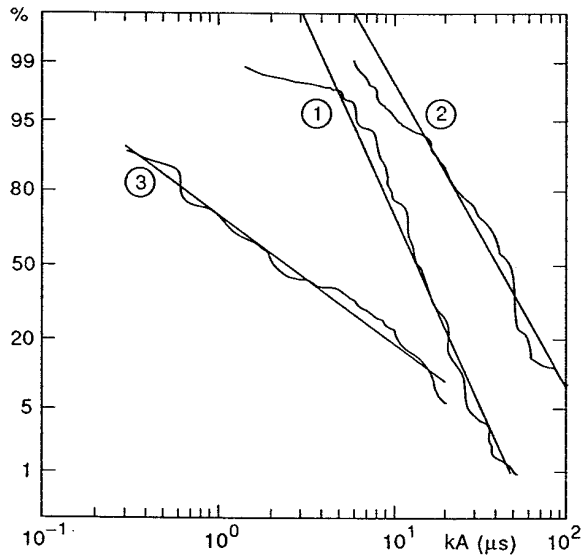
### 6.3 Ruidos atmosféricos

Los ruidos atmosféricos tienen esencialmente su origen en las descargas del rayo. Los más importantes son las descargas locales, sin embargo, las descargas remotas pueden ser causa de una degradación general de las recepciones de radio en un sector dado [2].

**6.3.1 Fenómenos primarios.** El rayo es un arco eléctrico largo que surge entre o del interior de las nubes (cloud flash), o entre una nube y el suelo (ground flash).

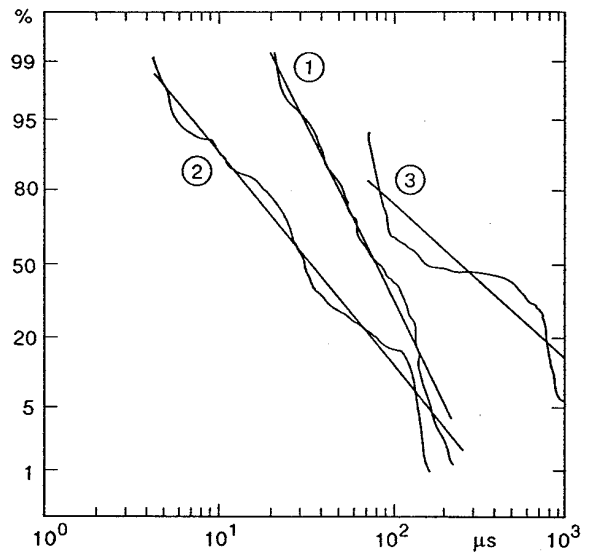
Está formado generalmente por descargas consecutivas múltiples acompañadas de impulsos de corriente teniendo diversos valores de amplitud, de tiempo de subida, de polaridad y de duración. El reparto estadístico típico de los parámetros que caracterizan el rayo, se representa en las figuras 11a, 11b y 11c [3 y 4].

Se puede prever una reducción de la intensidad del campo aproximadamente en proporción a la inversa de la distancia del punto de impacto [4].



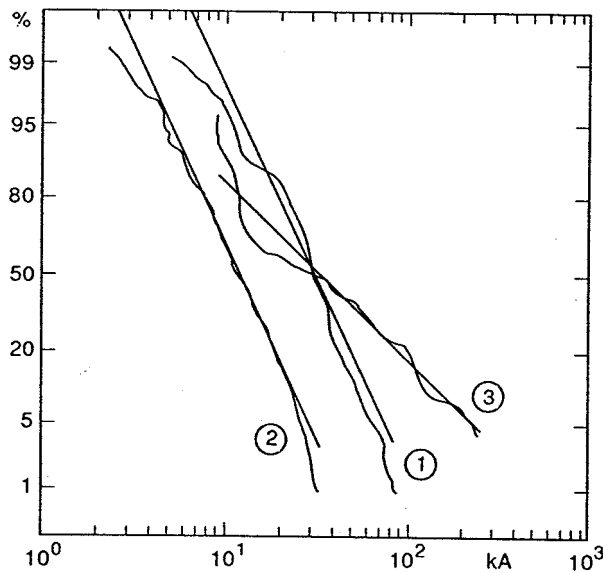
1 = primeros golpes negativos  
 2 = golpes negativos siguientes  
 3 = golpes positivos

Fig. 11a – Gradiente de subida de corriente ( $di/dt$ )



1 = primeros golpes negativos  
 2 = golpes negativos siguientes  
 3 = golpes positivos

Fig. 11b – Duración del rayo



1 = primeros golpes negativos  
 2 = golpes negativos siguientes  
 3 = golpes positivos

Fig. 11c – Corriente de cresta I

Fig. 11 – Distribución estadística de los parámetros que caracterizan el rayo



**6.3.2 Edificios afectados por el rayo.** Los rayos sobre los edificios tienen diferentes efectos según los métodos adoptados para proteger estos edificios. Pueden manifestarse diferencias de tensión que van hasta decenas de kilovoltios en cualquier estructura de edificios o cualquier conductor por donde pasa la corriente del rayo, comprendidos los conductores tomados como referencia eléctrica por razones de seguridad o funcionales.

Hay acoplamiento inductivo mutuo entre todos los circuitos recorridos por la corriente debida al rayo, incluidos los conductores de protección y otros circuitos eléctricos (señales, alimentación, etc.). Se produce un acoplamiento por impedancia común en las líneas de alimentación y de señales que son puestas a tierra cerca de las estructuras de los edificios atravesadas por las corrientes del rayo. Las tensiones que se crean entre las diferentes partes de un sistema dependen de los métodos de instalación.

**6.3.3 Caída de rayo en las líneas de alimentación.** Por razones prácticas, los efectos del rayo sobre las líneas de alimentación de baja tensión se tratan en el apartado 6.6.3.

## 6.4 Descarga electrostática

**6.4.1 Fenómeno básico.** Una descarga electrostática (DES) es una transferencia de cargas eléctricas entre cuerpos a potenciales electrostáticos diferentes. La energía producida por las fuerzas de fricción entre dos aislantes, cuando son frotados uno contra otro, libera portadores de carga situados en las imperfecciones del material hacia la banda de conducción. Estos portadores se acumulan en las superficies respectivas de los materiales. Es el efecto triboeléctrico. La amplitud de carga transferida depende del tamaño, de la forma, y de las propiedades eléctricas de los cuerpos. Las condiciones del entorno, en particular la humedad, pueden afectar a la vez la amplitud de la carga y su tasa de decrecimiento.

Una descarga electrostática hace intervenir tres factores:

- el vector, un objeto que se desplaza llevando una carga, en general un ser humano. Este puede ser también un objeto desplazable como una silla, un equipo montado sobre ruedas o un carrito de almacén;
- el receptor, un objeto estacional hacia el cual el vector se desplaza y con el que intercambiará cargas;
- la víctima, el equipo o la componente afectado por la descarga. La víctima puede ser el receptor o ser un tercer elemento independiente de la descarga que sobreviene entre el vector y el receptor en la proximidad de la víctima.

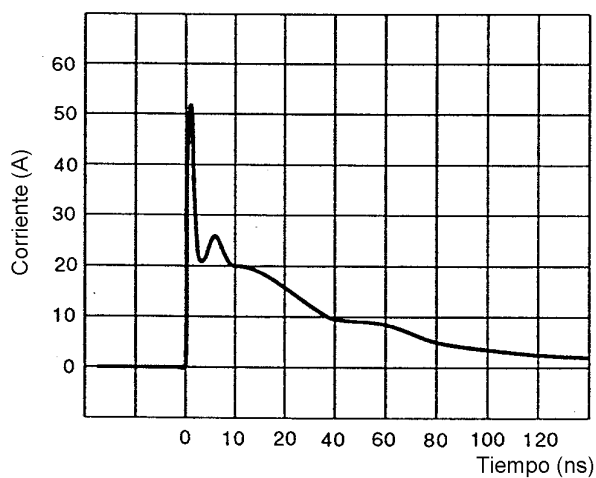
Las descargas electrostáticas pueden afectar a los equipos según dos modos que dependen de la susceptibilidad de la víctima. Uno u otro modo puede ser el más significativo; se considerará el peor de los casos:

- Una descarga electrostática se produce entre el vector y el receptor cuando la víctima es también el receptor (descarga directa) o está cerca del vector y del receptor, sin ser el receptor, (descarga indirecta). En este caso la víctima es un sistema completo más que un circuito impreso o un componente. Los efectos típicos son el mal funcionamiento o en casos extremos el deterioro.
- Una descarga electrostática que implica una componente o un subconjunto como víctima durante el montaje u operaciones de mantenimiento. Estos componentes o subconjuntos pueden funcionar o no durante la descarga. Los efectos típicos son la destrucción inmediata o los fallos latentes.

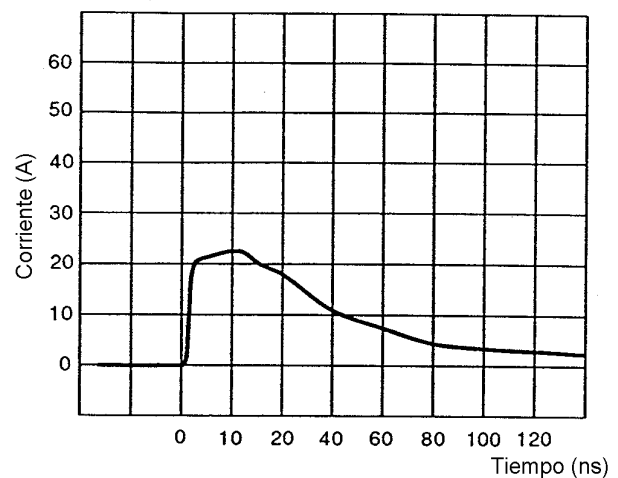
**6.4.2 Corriente conducida.** La forma de onda producida por una DES se determina por los fenómenos eléctricos implicados en la descarga. El tiempo de subida se determina por la capacidad parásita y la inductancia entre el vector y el receptor; la amplitud por la resistencia, la capacidad y la inductancia así como por la tensión inicial.

La física de una descarga en el aire durante una DES resulta en la ocurrencia o no de un impulso de corriente inicial rápido en lo que concierne a las descargas que implican una herramienta manual, el caso más desfavorable. La presencia o ausencia de este impulso marca una gran diferencia en cuanto a los efectos del fenómeno en lo que concierne a las perturbaciones. Uno de los factores que afectan el resultado, y de una manera imprevisible, es el entorno atmosférico (humedad, contaminación). La velocidad de aproximación del vector afecta también el resultado [5]. En el caso de intrusión con un dedo desnudo en vez de una herramienta manual [6], la amplitud y la tasa de variación de la corriente de descarga son generalmente más pequeñas.

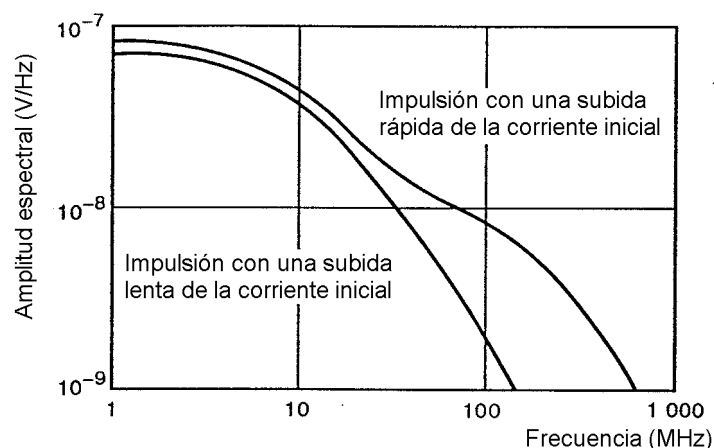
En la figura 12a se muestra una forma de onda típica de DES cuando el impulso inicial de corriente está presente. Esta figura muestra la corriente de descarga que viene de una herramienta, manejada por un operario, cargada a 8 kV, sobre un blanco que incluye un shunt de  $2 \Omega$ , método recomendado para las medidas de DES [7]. La figura 12b muestra una DES, registrada en las mismas condiciones nominales, pero durante la cual no tiene lugar el impulso inicial de corriente. Una evaluación de la densidad espectral de los impulsos, véase figura 12, puede aproximarse por impulsos dobles exponenciales. La suma de dos impulsos dobles exponenciales representa el impulso DES en la figura 12a: uno por la subida del pico inicial y otro por la cola de la onda. El impulso de la figura 12b se representa por un solo doble exponencial. La figura 12c muestra un análisis espectral de estas dos descargas calculado por técnicas normales. Obsérvese que el pico inicial ha aumentado la densidad espectral desde el lado de alta frecuencia, ilustrando la importancia del pico inicial debido a que los mecanismos de acoplamiento son de tipo paso-alto.



**Fig. 12a – Con punta y subida rápida de corriente inicial**



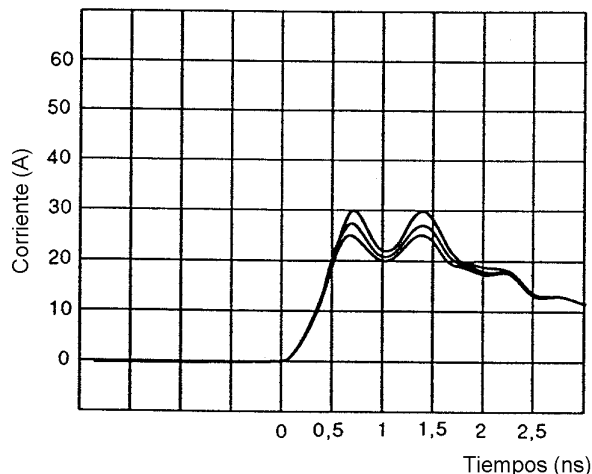
**Fig. 12b – Sin punta y subida de corriente inicial**



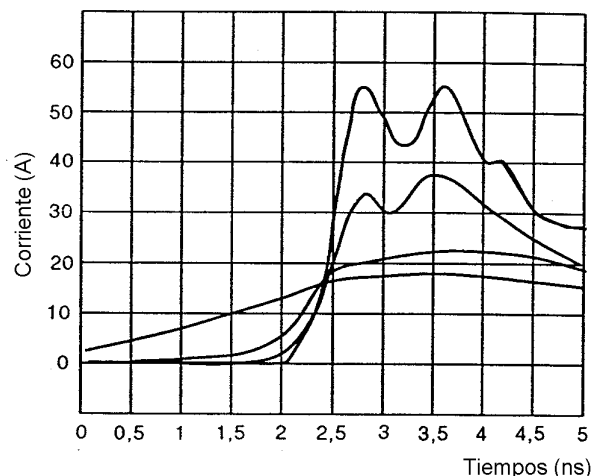
**Fig. 12c – Espectros de las descargas a y b anteriores**

**Fig. 12 – Descargas electrostáticas típicas con herramienta manual con una carga inicial de 8 kV, sobre un blanco de  $2 \Omega$  (TC 65 de CED), registradas con 1GHz de banda pasante**

Para tensiones iniciales de carga bajas (inferiores a 5 kV), hay una mayor probabilidad (pero no una certeza) de producir un transitorio de corriente inicial rápido con la ayuda de una herramienta manual, lo que no es el caso con tensiones más elevadas. La figura 13 muestra las variaciones del tiempo de subida del fenómeno, para una descarga de 4 kV (figura 13a) y de 8 kV (figura 13b), de varias descargas entre una herramienta manual y el blanco CEI. Estos registros han sido realizados sin tratar de controlar la velocidad de aproximación del vector.



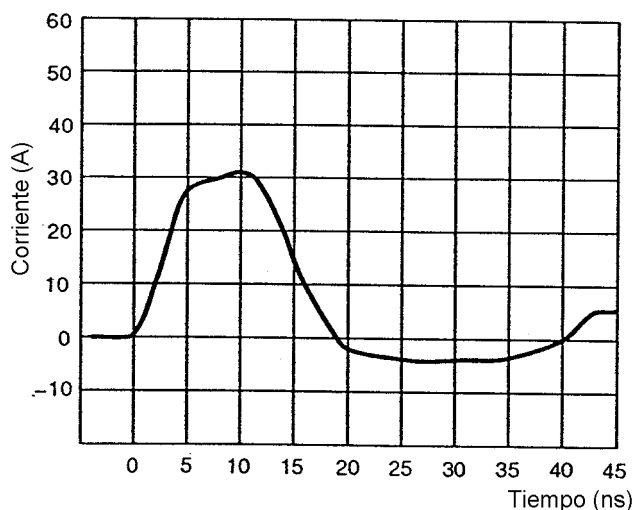
**Fig. 13a –Carga inicial 4 kV**



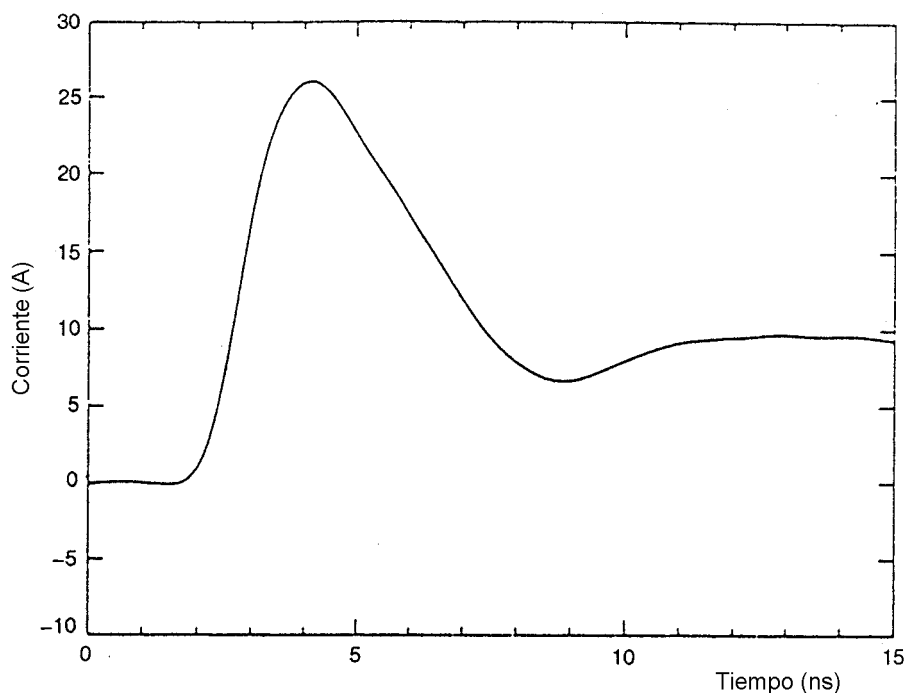
**Fig. 13b –Carga inicial 8 kV**

**Fig. 13 – La subida de la corriente con el procedimiento de una herramienta manual muestra una gran variabilidad a 8 kV, menor a 4kV  
Oscilogramas de descargas repetidas sobre el blanco de 2 Ω (TC 65 de CEI) registradas con 1 GHz de banda pasante**

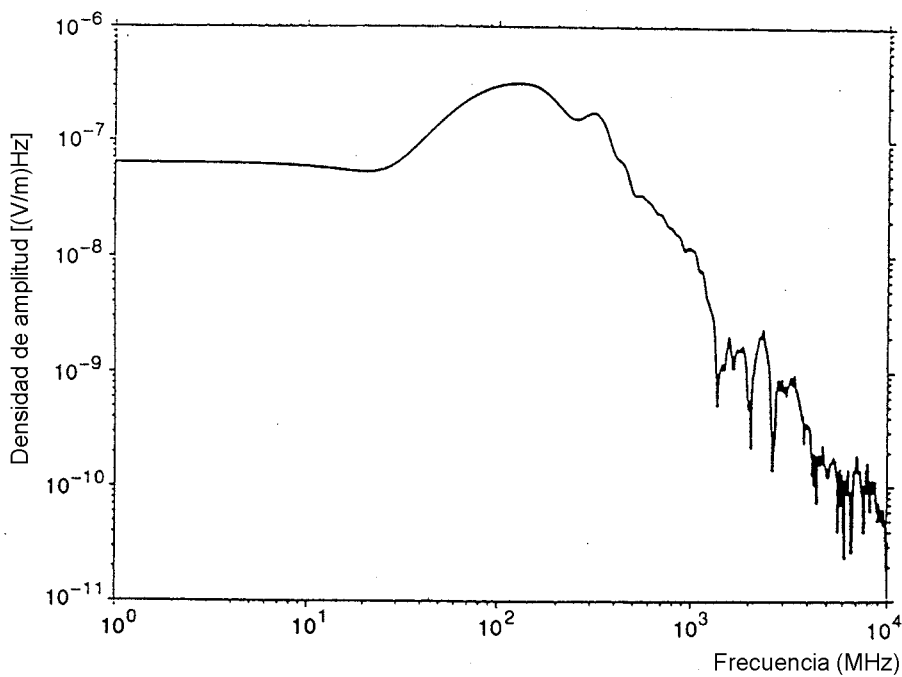
Cuando el vector es un objeto móvil en vez de una herramienta, la descarga presenta en general un frente de subida más lento y una duración más larga. Un ejemplo, figura 14, muestra la descarga de un carro de almacén.



**Fig. 14 – Descarga típica de un carrito de almacén con carga inicial de 4 kV, sobre un blanco de 2 Ω (TC 65 de CEI) registradas con 1 GHz de banda pasante.**



**Fig. 15a – Forma de onda de la corriente registrada con un osciloscopio digital de la descarga de un cañón de ensayo de 4 kV sobre el blanco CEI de 400 MHz**

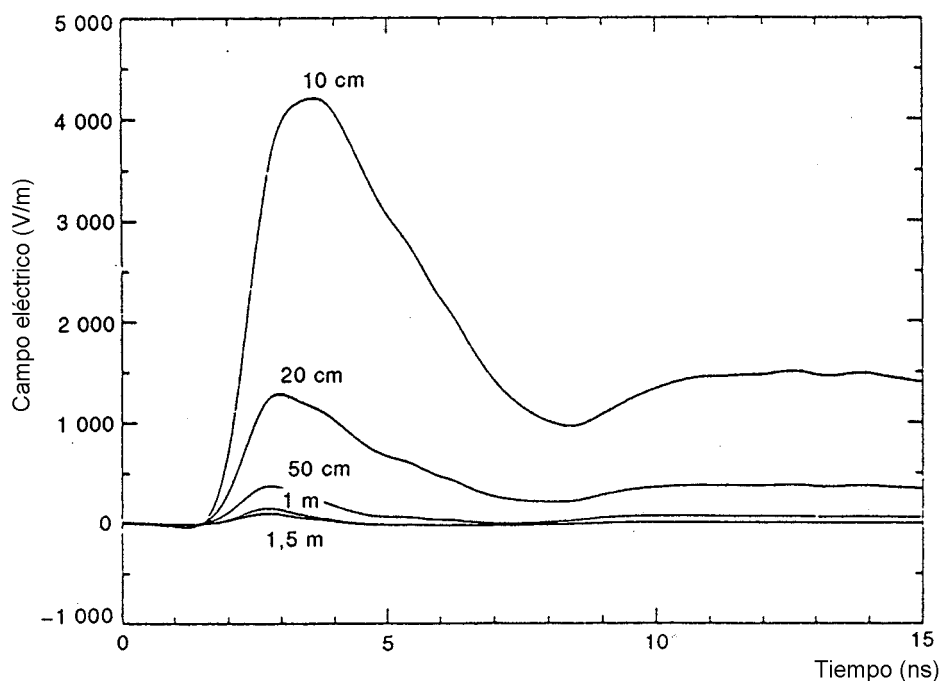


**Fig. 15b – Amplitud espectral del campo asociado a la descarga de corriente representada en 15a anterior**

**Fig. 15 – Relaciones entre la corriente y el campo radiado de una descarga electrostática producida por un cañón de ensayo**

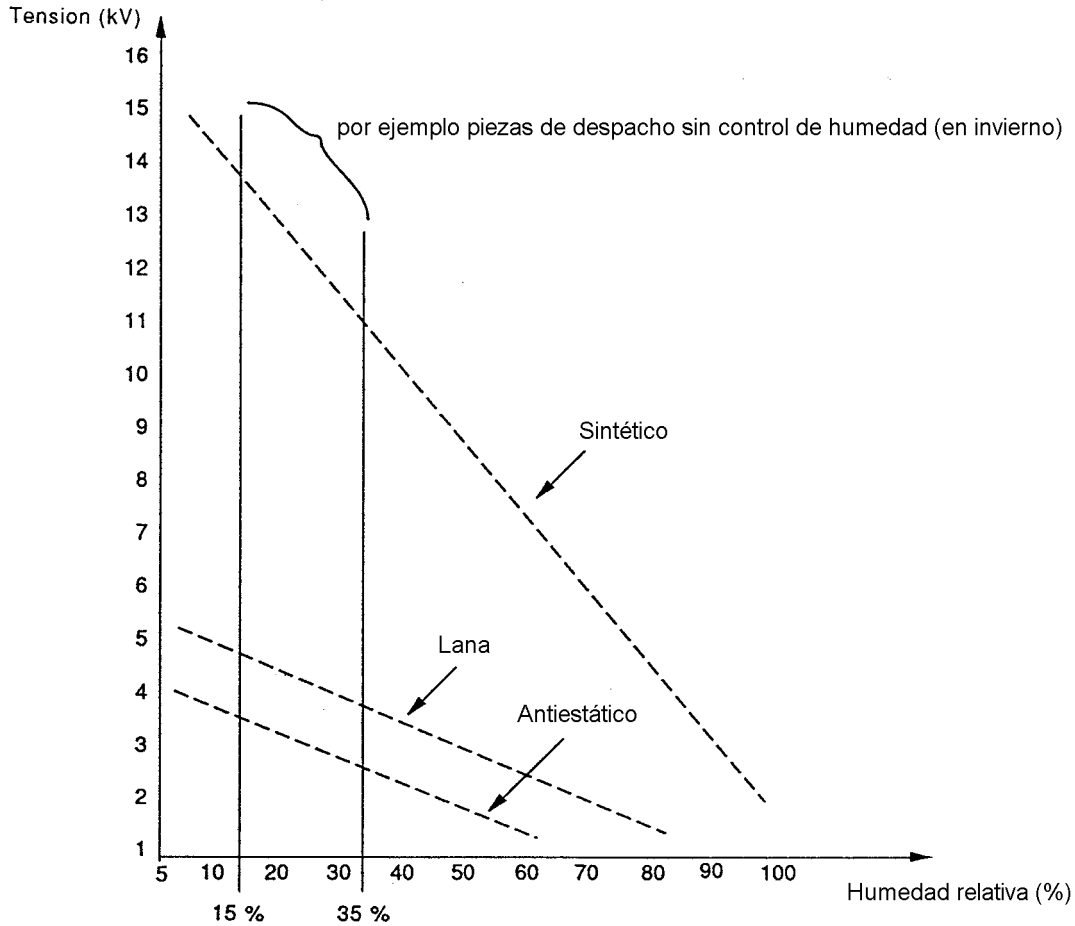
**6.4.3 Campos radiados.** Los campos electromagnéticos producidos por una DES son difíciles de caracterizar debido a las altas frecuencias y a la naturaleza mono-golpe del fenómeno. Se han realizado medidas de campo y una modelización del arco por un dipolo que suministran informaciones básicas sobre los campos [8]. El campo eléctrico producido por una DES depende del tiempo de subida así como de la amplitud de la corriente. Un fenómeno con un pico inicial de corriente producirá campos más grandes que los fenómenos sin ese pico.

La figura 15 muestra la relación existente entre la corriente y el campo correspondiente a una distancia de 1,5 m. La modelización del fenómeno para distancias más cortas, distancias a las que la medida de campo no es posible (según se describe en [8]), predice campos mucho más grandes, como muestra la figura 16.



**Fig. 16 – Campo eléctrico predecible de la descarga a 4 kV de la figura 15a para diferentes distancias desde el punto de observación**

**6.4.4 Rango de niveles de entorno.** Los valores máximos a los que pueden ser cargados los operarios se dan en la figura 17.



**Fig. 17 – Valores máximos de las tensiones electrostáticas de materiales corrientes**

## 6.5 Líneas de alimentación de alta y media tensión

Durante el funcionamiento en régimen permanente y transitorio se producen fenómenos importantes.

### 6.5.1 Funcionamiento en régimen permanente

#### a) Campos a la frecuencia industrial

Las líneas de alimentación engendran en su proximidad campos eléctricos y magnéticos a la frecuencia industrial y a las de sus armónicos. Los niveles de estos campos en un punto dado dependen de la tensión de la línea y de su corriente respectivamente, así como de la configuración de la línea (en particular, altura de la línea por encima del suelo, distancias interfases, número de circuitos y disposición de las fases) [9].

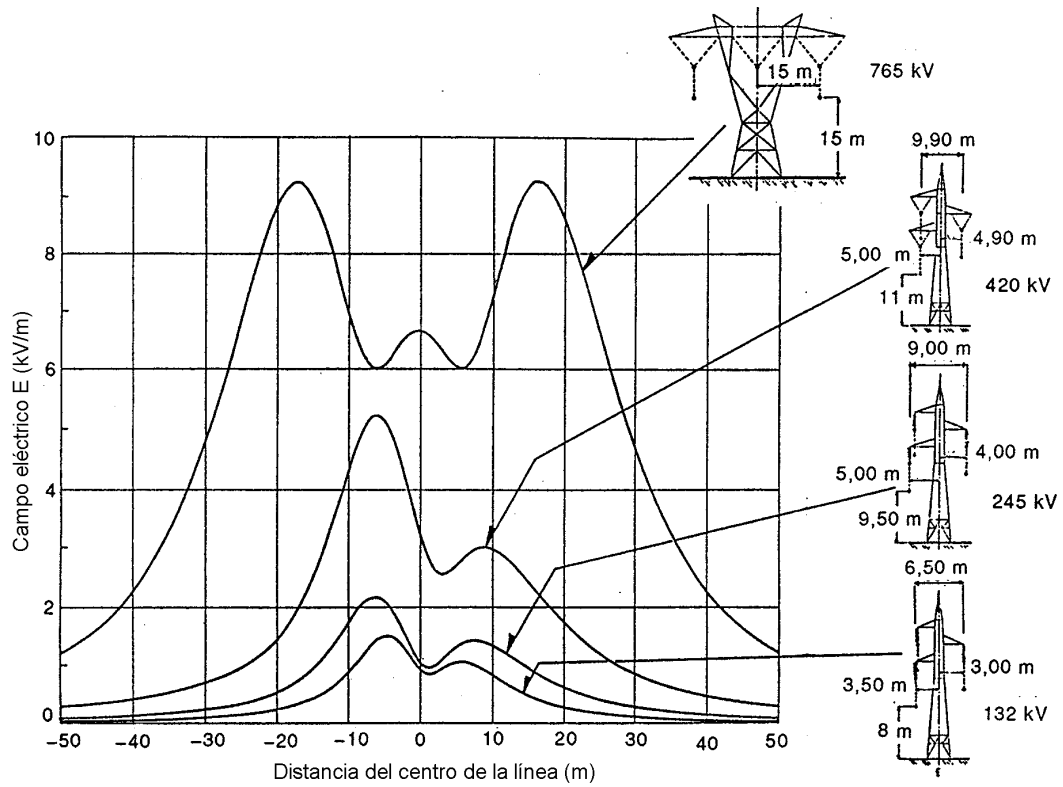


Fig. 18a - Perfiles de campos eléctricos

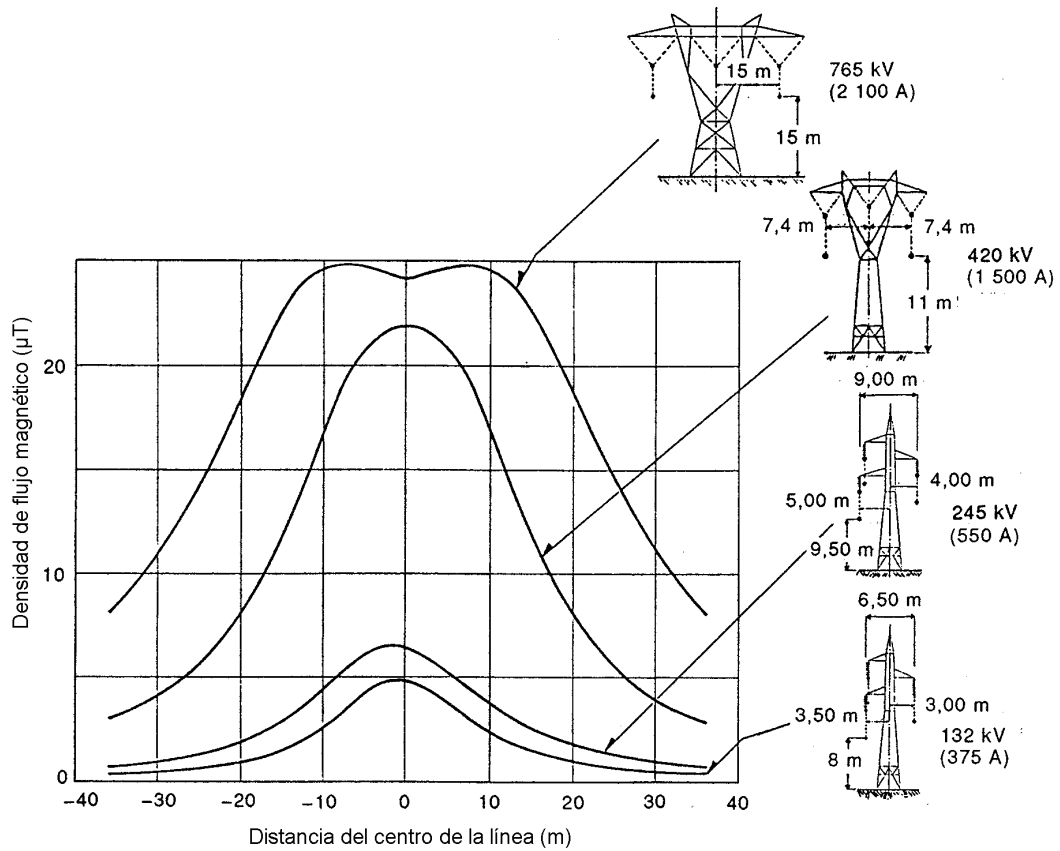


Fig. 18b - Perfiles de campos magnéticos

Fig. 18 - Perfiles de campos eléctricos y magnéticos de líneas de muy alta tensión

A título de ejemplo, la figura 18 da los perfiles laterales, a medio alcance entre postes, de los campos eléctricos y de la componente vertical del campo magnético engendrados por las líneas de muy alta tensión de un circuito simple de características medias en condiciones de carga normal. Debido a la flexión de los conductores, los valores engendrados en otras secciones de la línea son considerablemente inferiores.

La tabla 2 da los niveles del campo eléctrico y de la componente horizontal del campo magnético a prever en la proximidad de líneas de alimentación para diferentes tensiones y corrientes en condiciones normales, para las configuraciones dadas en la figura 18.

**Tabla 2**

**Ejemplos de intensidades de campo eléctrico y magnético cerca de líneas de alimentación de alta tensión**

Tensión de la línea kV	Campo eléctrico kV/m		
	Bajo el eje	Valores Máximos	A 30 m del eje
245	1,5	2,6	0,4
420	3,0	5,1	1,5
765	6,0	9,0	5,0

Corriente típica por fase kA	Campo magnético componente horizontal μT		
	Bajo el eje	Valores Máximos	A 30 m del eje
0,4	2,0	4,3	0,7
1,0	6,6	12,0	4,0
1,5	12,0	15,0	10,0

b) Efecto corona y descargas eléctricas

Las líneas de alimentación pueden ser fuentes de perturbaciones radiadas debido al efecto corona y a las descargas en los aislantes y entre contactos. La gama de frecuencias afectada por el efecto corona se extiende hasta algunos megaherzios mientras que las descargas se caracterizan por espectros de frecuencia que van hasta centenas de megaherzios.

El nivel de las perturbaciones que resultan del efecto corona es afectado por el estado de la superficie del conductor o de los accesorios. Los valores máximos son alcanzados para tiempo húmedo (lluvia, fuerte grado de humedad, niebla, etc.). Por el contrario, las perturbaciones debidas a las descargas son más intensas para tiempo seco.

La tabla 3 indica los valores típicos a 500 kHz. Estos valores se miden según los métodos descritos en la Norma CISPR 18 [10].

Para tiempo seco, los niveles son inferiores en alrededor de 17 dB a los niveles correspondientes para tiempo húmedo.

En el rango de 0,4 MHz a 1,6 MHz el perfil lateral de la perturbación puede generalmente expresarse por la fórmula:

$$E = E_0 - 30 \log D/D_0$$

donde  $E$  y  $E_0$  (dB(μV/m)) son las componentes verticales del campo eléctrico a las distancias  $D$  y  $D_0$  respectivamente [9].

A una distancia de unas decenas de metros de la fuente, los niveles de las perturbaciones debidas al efecto corona pueden extenderse desde varias decenas de μV/m hasta algunas decenas de mV/m, según el gradiente de la tensión de funcionamiento y las condiciones climáticas.

Las perturbaciones que provienen de descargas resultantes de malos contactos o de aislantes son ocasionales y presentan una gran gama de variaciones en función de las superficies de contacto. (Para referencias más amplias véase [9]).



**Tabla 3**  
**Ejemplos de efecto corona en las líneas de alimentación de alta tensión**

Tensión nominal kV	Nivel de perturbación bajo la lluvia dB( $\mu$ V/m) a 500 kHz	
	Bajo el eje de la línea	A la distancia $D^*$
90	Efecto corona despreciable	
150	50	35
245	65	50
420	70	55
765	82	72
* $D = 20$ m de distancia horizontal desde el conductor externo de la línea		

### 6.5.2 Funcionamiento intermitente

#### a) Conmutación

El cierre de un interruptor automático de línea de alta tensión produce un transitorio de frente brusco, con un tiempo de subida del orden de algunas decenas de nanosegundos hasta varios microsegundos, correspondiendo el valor y la polaridad exactas al punto del ciclo donde se produce el cierre. En ausencia de resistencias de pre-inserción, la amplitud del transitorio puede alcanzar tres veces el valor de cresta de la tensión de fase del sistema. Cuando el cierre concierne a una línea sin carga, la amplitud de cresta del extremo de la línea puede alcanzar el doble de la cresta de la tensión de la fase.

Debido a la propagación y a las reflexiones en la línea, el primer transitorio es seguido, a intervalos de tiempo dependiendo de la distancia entre los puntos de variación de impedancia, de transitorios de amplitud más baja. Puede resultar una forma de onda oscilatoria amortiguada. El efecto pelicular tiene una acción de filtrado del frente de onda. Salvo si se produce rotura del aislamiento de la línea, las derivadas de la tensión no exceden nunca el  $dV/dt$  del primer frente del transitorio de tensión. El fenómeno de rebote de los contactos puede determinar la frecuencia de repetición de los transitorios.

La conmutación de transformadores y de reactancias de alimentación produce sobretensiones debidas a la capacidad parásita del orden del nanofaradio. Su amplitud puede ser suficiente para hacer funcionar los pararrayos; su frecuencia de oscilación puede estar comprendida entre 100 Hz y varios kilohertzios. El funcionamiento de los pararrayos hace nacer corrientes transitorias elevadas en los circuitos de alta tensión y en la red de tierra (decenas de kiloamperios de cresta con regímenes de subida que van hasta decenas de kiloamperios por microsegundo).

La conmutación de los seccionadores en las líneas produce transitorios de frente brusco con tiempos de subida del orden de decenas de nanosegundos debido a las pequeñas capacidades concentradas cerca de la fuente (al contrario del caso de los interruptores automáticos). En su propagación en el juego de barras de alta tensión, estos transitorios son filtrados por las capacidades de las estructuras (soportes, aisladores, etc.) y de los equipos de alta tensión (transformadores de tensión capacitivos, transformadores de corriente, etc.). Pueden producirse también oscilaciones amortiguadas. La frecuencia de estas oscilaciones depende de la inductancia de los circuitos de alta tensión concernidos (longitud de la barra) y de la capacidad de los transformadores de tensión y otros componentes. Esta frecuencia varía de 100 kHz a algunos megahertzios.

Durante el funcionamiento de un seccionador, la forma de onda engendrada toma normalmente un carácter repetitivo, en un tiempo del orden del segundo. La duración de cada oscilación elemental no excede de 100  $\mu$ s. La tasa de repetición es variable y es función de la distancia que separa los contactos. La frecuencia de repetición mínima es el doble de la frecuencia de la corriente de alimentación con una amplitud que puede alcanzar dos veces del valor de cresta de la tensión de fase de la red.

#### b) Fallos de funcionamiento

Estos fallos se caracterizan por una caída de la tensión de línea causada por el contacto directo de un conductor o por la formación de un arco. Según el tipo de fallo (entre fases o con la masa), pueden ser inyectadas corrientes transitorias en la red de tierra o en el suelo, de lo que resulta una elevación de la tensión con relación a otras zonas.

La formación de un arco se produce en el aire o en una superficie cuando la rigidez dieléctrica entre dos conductores se sobrepasa. Se establece un canal ionizado cuya corriente depende de los parámetros de la red correspondiente.

La forma de onda de la perturbación local está directamente unida a las características del arco formado, su tiempo de subida está determinado por las características del aislante que separa los electrodos.

El tiempo de subida máximo en la proximidad del arco puede ser inferior a diez nanosegundos por metro de longitud de arco. Un arco que se forma en la superficie de los aislantes puede tener un tiempo de subida de un valor diez veces más elevado.

### 6.6 Líneas de alimentación de baja tensión

Las perturbaciones que sobrevienen en líneas de baja tensión pueden provenir de la conmutación de cargas tanto lineales como no lineales, de la presencia de cargas no equilibradas (líneas trifásicas), de fallos en líneas de alimentación de alta tensión, y de perturbaciones atmosféricas. Para la discusión, estas perturbaciones se dividen en dos categorías: perturbaciones ligadas a la frecuencia de la red, y perturbaciones no ligadas a la frecuencia de la red. Las perturbaciones ligadas a la frecuencia de la red se tratan en la Norma CEI 61000-2-1.

La impedancia de una red es un importante parámetro que determina el nivel de la mayor parte de las perturbaciones de esa red. A bajas frecuencias, por ejemplo de menos de 2 kHz, la impedancia de la red es muy inferior a la de cualquier carga normal que puede ser conectada.

A frecuencias más altas, por ejemplo hasta 20 kHz, la impedancia de la red puede estar determinada por las cargas conectadas y por factores tales como la reactancia de fuga de transformadores de red, reactancia de línea y características de las capacidades que sirven para la corrección del factor de potencia.

A frecuencias aún más altas, la impedancia depende de la longitud de la línea conectada a las cargas u otros dispositivos. A frecuencias superiores a 100 kHz, la impedancia varía normalmente sobre una gran gama de reactancia yendo de una fracción de ohmio a al menos 5 000  $\Omega$ .

**6.6.1 Evolución del entorno.** Antes de la proliferación de dispositivos de protección contra las sobretensiones instalados en las redes BT, se había reconocido una limitación de tensión de cresta: la descarga eléctrica de contorneamiento típicamente entre 2 kV y 8 kV para los equipos de baja tensión [11].

Desde su introducción en 1972 han sido instaladas en las redes de alimentación de corriente alterna de BT millones de dispositivos de protección contra las sobretensiones, varistores en particular. Así existe una nueva limitación para las sobretensiones que aparecen en este entorno de contorneamiento cambiante. Se instalan rutinariamente registradores de perturbaciones para registrar la frecuencia de aparición de estas sobretensiones en los sitios donde van a ser conectadas cargas sensibles. Es importante reconocer que el registro de las sobretensiones puede ser afectado por la presencia de varistores situados cerca. La presencia simultánea de registradores de sobretensiones y de dispositivos de protección puede modificar las medidas actuales y futuras de varias maneras por comparación con las campañas de medidas anteriores. A continuación se presenta cuatro de ellas.

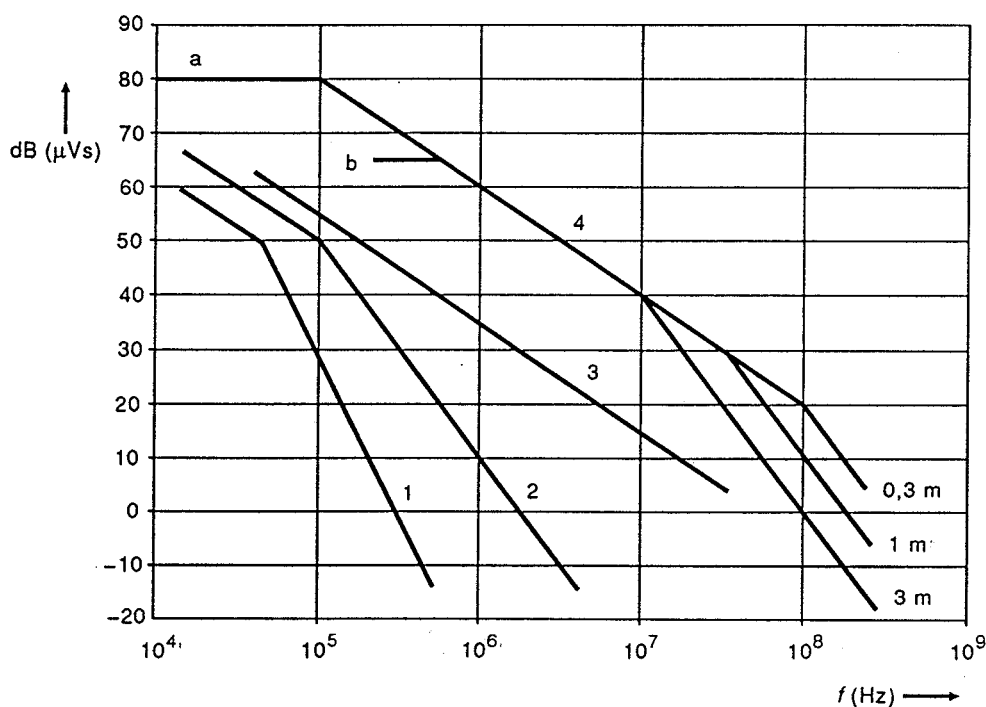
- 1) Los sitios en los que las sobretensiones han sido anteriormente constatadas – si no hay ninguna modificación de la fuente de sobretensión – están realmente sometidos hoy a sobretensiones de valores más bajos, mientras que se producirán impulsos de corriente en los nuevos equipos de protección instalados.
- 2) No solamente han cambiado las crestas de las tensiones, sino también sus formas de onda van a ser modificadas por la presencia de los varistores próximos.
- 3) La función de limitación de las sobretensiones efectuada anteriormente por la descarga eléctrica de los aislantes es realmente ahora efectuada por los nuevos dispositivos de protección de sobretensión constantemente añadidos a los sistemas.

4) Estas tres situaciones producirán una reducción significativa del nivel medio de las sobretensiones registradas para el conjunto de la población total de los diferentes sitios a medida que se instalen varistores. El límite superior de las sobretensiones permanecerá sin embargo el mismo para los sitios donde no se haya instalado ningún varistor. El hecho de centrarse sobre el valor medio de las sobretensiones registradas en las redes de BT puede crear un falso sentimiento de seguridad y una descripción incorrecta del entorno.

**6.6.2 Transitorios de conmutación.** La conmutación de algunos elementos de la red (transformadores, condensadores, etc.) puede entrañar una caída de tensión pronunciada pudiendo alcanzar el 60% de la tensión nominal y de una duración de varias decenas de milisegundos. Los transitorios de tensión se crean usualmente, por ejemplo, por la fusión de fusibles, maniobra de interruptores, o por el funcionamiento de contactores para motores o para equipos electrodomésticos, etc.

La velocidad de subida de la tensión que depende del alejamiento de la fuente del transitorio, es un parámetro importante para la descripción de un transitorio. Los picos de tensión que sobrevienen en las instalaciones de los consumidores, desde el lado de baja tensión, apenas afectan al lado de media tensión y, a lo sumo, afectan los consumidores de baja tensión próximos que son alimentados por el mismo transformador.

Las perturbaciones más importantes son las provocadas por la puesta en circuito de cargas capacitivas y la puesta fuera de circuito de cargas inductivas. Estas perturbaciones pueden representarse por las amplitudes de espectro mostradas en la figura 19.



- 1 = interruptores a semiconductores con antiparasitaje
- 2 = interruptores a semiconductores sin antiparasitaje
- 3 = cierre de un interruptor mecánico
- 4 = apertura de un interruptor mecánico para diferentes longitudes de líneas (a: carga de fuerza, b: carga baja)

**Fig. 19 – Amplitudes espectrales producidas por diferentes tipos de interruptores**

a) Conmutación de cargas capacitivas

La puesta en circuito de cargas capacitivas, por ejemplo lámparas fluorescentes de compensación capacitiva, tiene por efecto provocar un breve cortocircuito en la toma de alimentación. La forma de onda de la tensión de la línea de potencia se desvía de la onda senoidal y vuelve después con una oscilación amortiguada. La tensión de cresta del transitorio puede alcanzar dos veces la tensión de cresta de la línea. La frecuencia de oscilación se establece normalmente entre 5 kHz y 10 kHz. En algunos casos, la frecuencia puede ser más elevada.

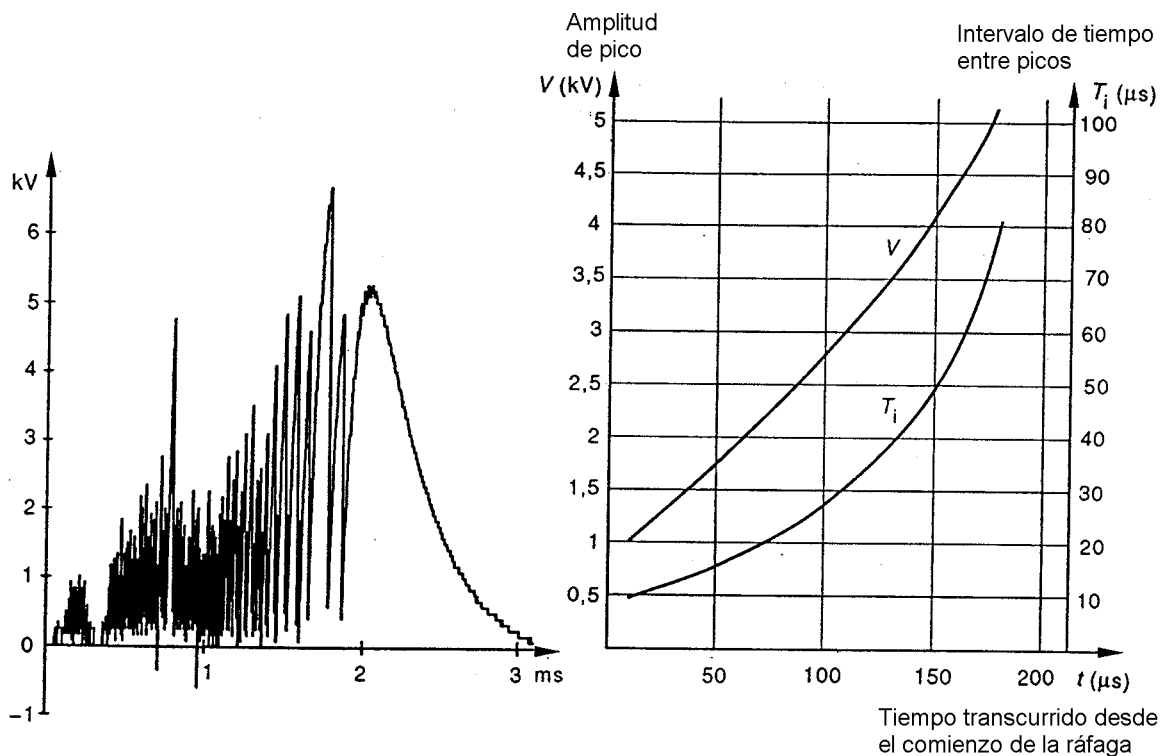


Fig. 20a – Forma de onda de los transitorios desde el lado de carga del relé

Figura 20b – Relación entre los parámetros de la ráfaga

Fig. 20 – Corte de una inductancia

#### b) Conmutación de cargas inductivas

La figura 20a muestra un ejemplo de la forma de onda desde el lado de la carga inductiva (constante de tiempo  $L/R \approx 30$  ms) de la interrupción para el corte de corriente efectuada por un relé de potencia (250 V, 1 A). Los cebados producen transitorios repetidos de subida y de duración muy cortos desde el lado de la línea del interruptor, por ejemplo tiempo de subida  $< 1$  ns, duración 10 ns.

Los transitorios de conmutación, comúnmente llamados transitorios rápidos, pueden también ser descritos en función de la duración de la ráfaga, principalmente determinada por la energía almacenada en la inductancia antes de la conmutación; otra característica es la tasa de repetición de un transitorio y la amplitud variable de los transitorios que componen una ráfaga, principalmente determinados por las características mecánicas y eléctricas del contacto (velocidad de los contactos de apertura, tensión soportada por los contactos en su posición de apertura).

La relación mutua entre los parámetros de un transitorio rápido, para cada sistema de conmutación mecánica (y para una misma carga puesta en o fuera de servicio), puede expresarse por un diagrama, como el de la figura 20b, que muestra la amplitud progresiva de los picos y el intervalo de tiempo que los separa en el curso de la acción de conmutación del relé mostrado en la figura 20a.

Es conveniente observar que tensiones de cresta superiores a 5 kV pueden obtenerse cerca de la fuente con impulsos que se repiten tan frecuentemente como cada 15  $\mu$ s. Las tensiones desde el lado de la línea pueden normalmente alcanzar 2,5 kV. A medida que la distancia de la fuente aumente, la forma de la onda se modifica a causa de las pérdidas de propagación, dispersión, y reflexiones debidas a las distorsiones provocadas por las cargas conectadas [12].

La figura 21 muestra la amplitud del espectro de la tensión perturbadora provocada por un relé de potencia.

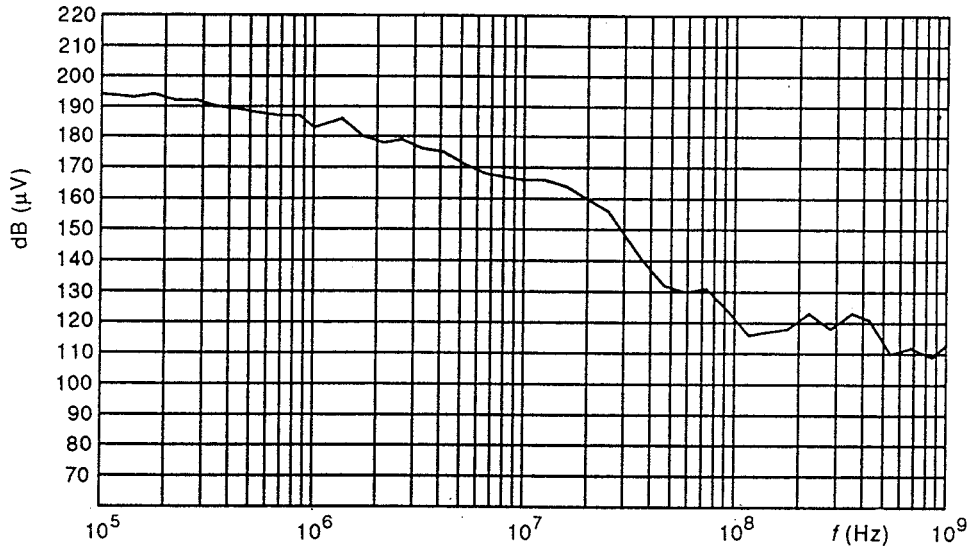


Fig. 21 – Amplitud espectral de la tensión perturbadora de un relé en la red de potencia

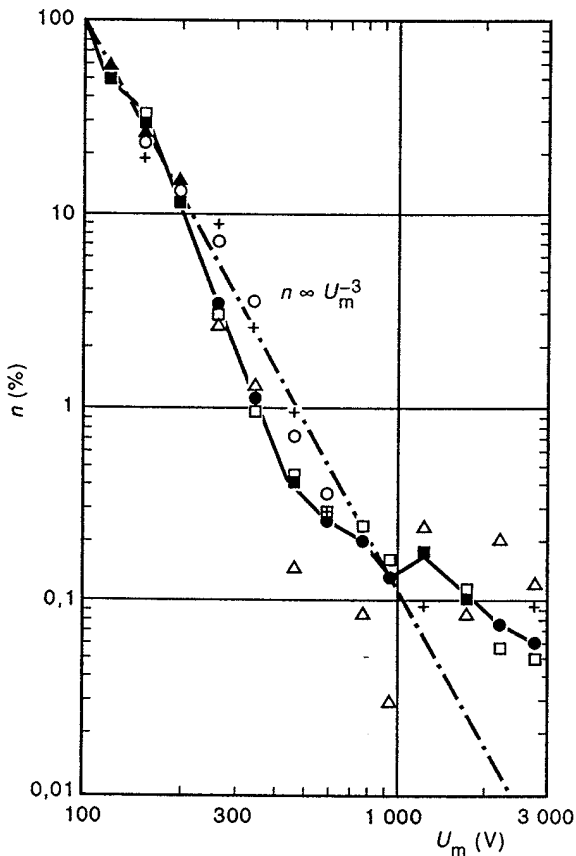


Fig. 22a – Número relativo de transitorios en función de su amplitud máxima.

- Total ( $n = 27811$  trans.),
- industrial ( $n = 23054$ ),
- △ oficina ( $n = 3014$ ),
- residencia ( $n = 287$ )
- + laboratorio ( $n = 1069$ )

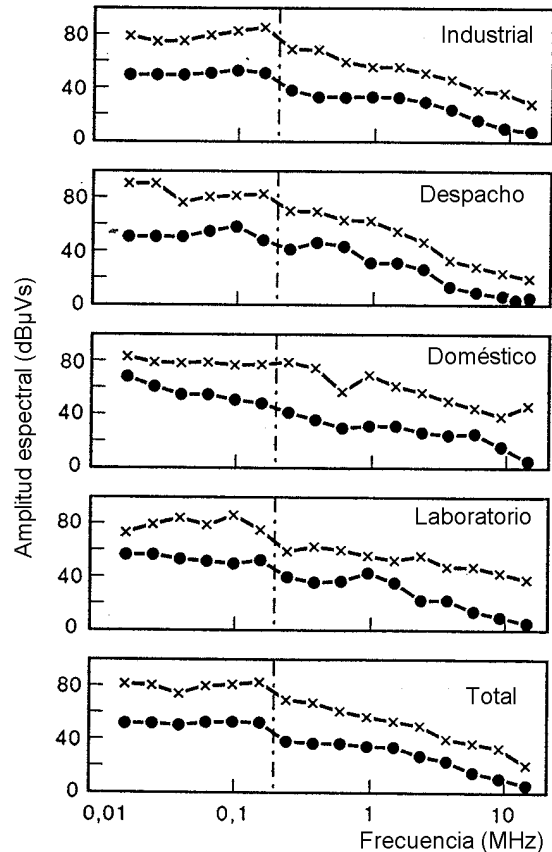


Fig. 22b – Evaluación estadística de las amplitudes espectrales de los transitorios registrados en las clases de lugares de la figura 22a.

Distribución log-normal: nivel para 50%, media  $\bar{x}$  (puntos), y el nivel para el 98%,  $\bar{x} + 3\sigma$  (cruces), donde  $\sigma$  es la desviación típica.

Fig. 22 – Resultados de medidas de transitorios de conmutación

Las figuras 22a y 22b presentan los resultados de investigaciones efectuadas en Alemania [13] sobre los transitorios de conmutación. En el curso de estas investigaciones, que han durado alrededor de 3 400 h., cerca de 28 000 perturbaciones transitorias (registradas en 40 puntos de medida) fueron medidas entre la línea y el conductor de protección en redes que eran casi todas de tipo TN [14]. El cableado de las redes estaba enterrado, en el exterior de los edificios.

La figura 22a indica el número relativo de transitorios, en diversas zonas, en función de la amplitud máxima del transitorio. Los valores analizados dan hasta 3 kV. Algunos casos que sobrepasaban 3 kV fueron registrados. El número relativo decrece con aproximadamente el cubo de la amplitud en cualquier clase de localización, si bien el número absoluto de casos varía de una clase a otra. Una conclusión similar ha sido extraída de resultados obtenidos por otras investigaciones [15].

Para alrededor de un tercio de las perturbaciones transitorias medidas, los análisis de Fourier han dado informaciones en el dominio frecuencial, véase figura 22b, que indica la densidad del espectro de amplitud para las diversas clases. La cantidad de información sería suficiente para concluir que, en todas las frecuencias, la densidad espectral de amplitud es coherente con una distribución normal-logarítmica. De lo que resulta que estas informaciones tienen una significación estadística.

**6.6.3 Transitorios debidos al rayo.** Estos transitorios se producen a la vez directa e indirectamente (por una acción de conmutación subsecuente) por el rayo. Se han efectuado medidas y cálculos sobre los efectos del rayo para obtener informaciones sobre los niveles que pueden ser producidos, incluso si se desconoce el mecanismo exacto de cualquier sobretensión particular. Las experiencias en magnitud real sobre las protecciones del rayo han dado también indicaciones indirectas sobre la severidad de los efectos del rayo sobre las redes de alta y baja tensión.

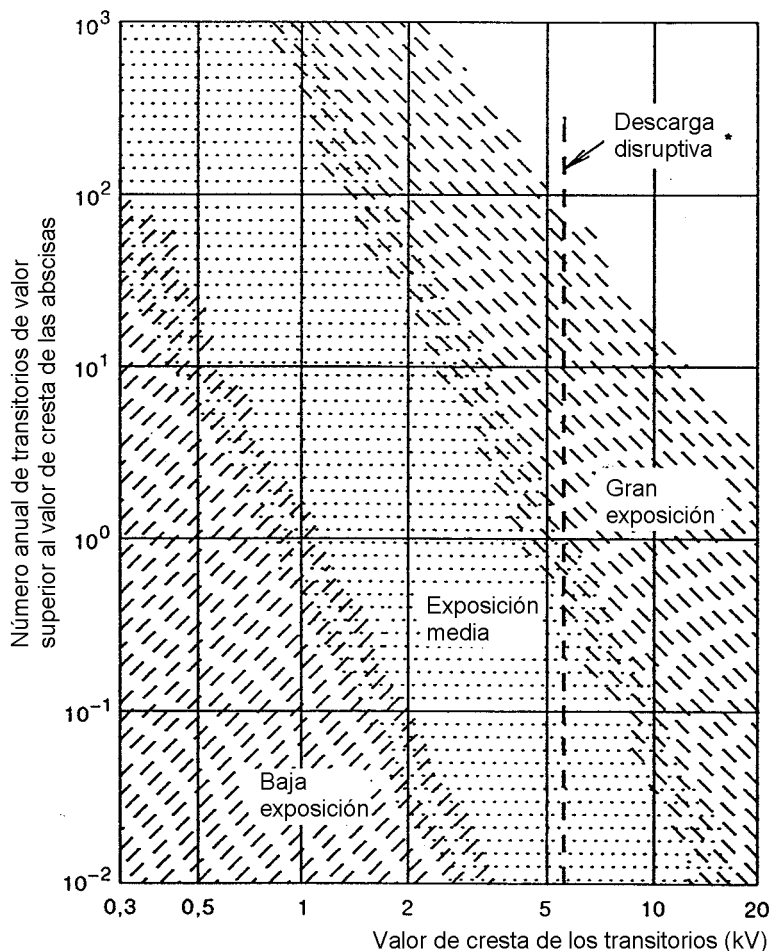
El número de transitorios que se producen en un tiempo dado varía en grandes límites según la red de alimentación. Predecir este número para un sistema particular es siempre difícil, y frecuentemente imposible. Está ligado al nivel de las sobretensiones. Las sobretensiones de bajo nivel son más frecuentes que las sobretensiones de nivel elevado [16].

Es esencial saber que las sobretensiones observadas en un sistema de alimentación pueden resultar bien de la tensión de origen, o de la tensión limitada por una descarga disruptiva en el sistema. De lo que se deriva que la expresión “circuito no protegido” debe ser entendida como que designa no un circuito que no posee dispositivo de protección de baja tensión, sino en el que una descarga disruptiva puede, si se presenta el caso, limitar la tensión máxima [12].

El reparto de los niveles de sobretensión está, en consecuencia, influenciado tanto por el mecanismo productor de sobretensiones como por las tensiones de descarga eléctrica en el sistema. Esta distinción entre la sobretensión de excitación real y la tensión limitada por la disrupción es particularmente importante en la interfaz entre equipos exteriores e interiores. Los equipos exteriores tienen generalmente distancias de aislamiento más grandes y, en consecuencia, tensiones de descarga eléctrica más elevadas: un nivel de 10 kV puede ser normal, pero un nivel de 20 kV es posible. Por comparación, la mayor parte de las instalaciones previstas para 120 V y 230 V tienen tensiones de aislamiento de alrededor de 6 kV. Se puede pues elegir este nivel de 6 kV como un valor típico de la amplitud de las sobretensiones que se producen en los sistemas de alimentación interiores [16].

Los datos obtenidos en numerosas campañas de medida sobre la frecuencia de aparición de las sobretensiones en función del nivel de tensión han permitido establecer el diagrama de la figura 23. El diagrama de la figura 23 sólo muestra con certeza una frecuencia “relativa”, mientras que el número absoluto sólo puede dar lugar a una clasificación en “baja exposición”, “media exposición” o “gran exposición”. Se pueden definir estos niveles de exposición de una manera general como se indica a continuación:

- “baja exposición”           Redes en regiones geográficas conocidas por presentar una baja actividad tormentosa, o con redes de distribución enterradas;
- “media exposición”        Redes en regiones geográficas conocidas por presentar una gran actividad tormentosa, o con redes de distribución aéreas;
- “gran exposición”         Redes raras pero reales alimentadas por largas líneas aéreas sujetas a reflexiones en sus extremos, y cuyas características de instalación crean niveles elevados sin el efecto limitador de los dispositivos de protección.



**Fig. 23 – Rayos de aparición de transitorios en función del nivel de tensión**

La zona de gran exposición debe ser reconocida pero no debe aplicarse sin discriminación en todas las redes, porque representa un caso extremo. Esto penalizaría la gran mayoría de las instalaciones para las que el nivel de exposición es más bajo.

Sobre la base de los valores relativos de la figura 23 se pueden citar dos niveles típicos, para aplicaciones prácticas. Primeramente las previsiones del caso de transitorios de 3 kV son de 0,01 a 10 por año en un lugar dado, cifra que es suficientemente elevada para justificar el recomendar una aptitud para soportar 3 kV como mínimo. En segundo lugar, la descarga disruptiva de los sistemas de cableado indica que una facultad de soportar 6 kV puede ser suficiente para asegurar la supervivencia de los equipos situados en interiores, pero puede ser necesaria una facultad de soportar 10 kV, o más, en el exterior.

La forma de onda tipo para las líneas de alimentación exteriores es un impulso unidireccional con un tiempo de subida del orden de 1  $\mu$ s y una duración de varias decenas de microsegundos. La onda de corriente asociada a esta onda de tensión, cuando se aplica a un dispositivo de protección no lineal es típicamente 8/20  $\mu$ s (esta onda se llama onda unidireccional “híbrida” o “combinada”).

La forma de onda tipo representativa de las líneas de baja tensión para el interior es una onda oscilatoria amortiguada, incluso si la onda original del rayo es unidireccional. En un edificio, las oscilaciones naturales de los elementos del circuito y las múltiples reflexiones modifican la perturbación inicial [17]. La frecuencia de las oscilaciones varía de 5 kHz a 500 kHz, en función de las dimensiones del sistema, con un tiempo de subida inicial del orden de una fracción de microsegundo.

En la interfaz entre el edificio y la red de distribución, una descripción representativa debería incluir a la vez la onda oscilatoria amortiguada y la onda unidireccional. Pueden producirse fenómenos secundarios debidos a las descargas disruptivas en la red y modificar significativamente los tiempos de subida y, en un menor nivel, la duración.

Los valores dados en la bibliografía son valores típicos con una alta probabilidad de aparición.

### **6.7 Líneas de señales y de control**

Las líneas de señales y de control no son normalmente consideradas como emisores, ya que son dispositivos pasivos. Sin embargo son medios de acoplamiento importantes entre las fuentes activas y los dispositivos susceptibles. Pueden observarse dos fenómenos básicos:

- a) fuga de energía intencionalmente conducida a lo largo de la línea,
- b) energía inducida en la línea y en consecuencia aplicada al contenedor de un equipo o a los circuitos internos del contenedor.

Un punto importante en la evaluación de los efectos de estos fenómenos es saber si la línea está blindada o no. Si la línea no está blindada, la emisión proviene normalmente de la propagación en modo diferencial, pero en la mayor parte de los casos, exceptuado cuando se transmiten potencias relativamente importantes, los niveles producidos son bajos. A altas frecuencias (superiores a 100 kHz) puede haber una conversión de modo diferencial en modo común significativa. Si la línea es blindada los fenómenos de emisión y de inducción son probablemente del tipo modo común. Los niveles de emisión pueden evaluarse utilizando las técnicas presentadas en el apartado 3.2. Cuando existen blindajes puede ser vital determinar la eficacia del blindaje. Estas técnicas se describen en la literatura publicada.

### **6.8 Equipos**

Esta categoría comprende numerosos equipos individuales que pueden producir todas las formas de perturbaciones por conducción y por radiación.

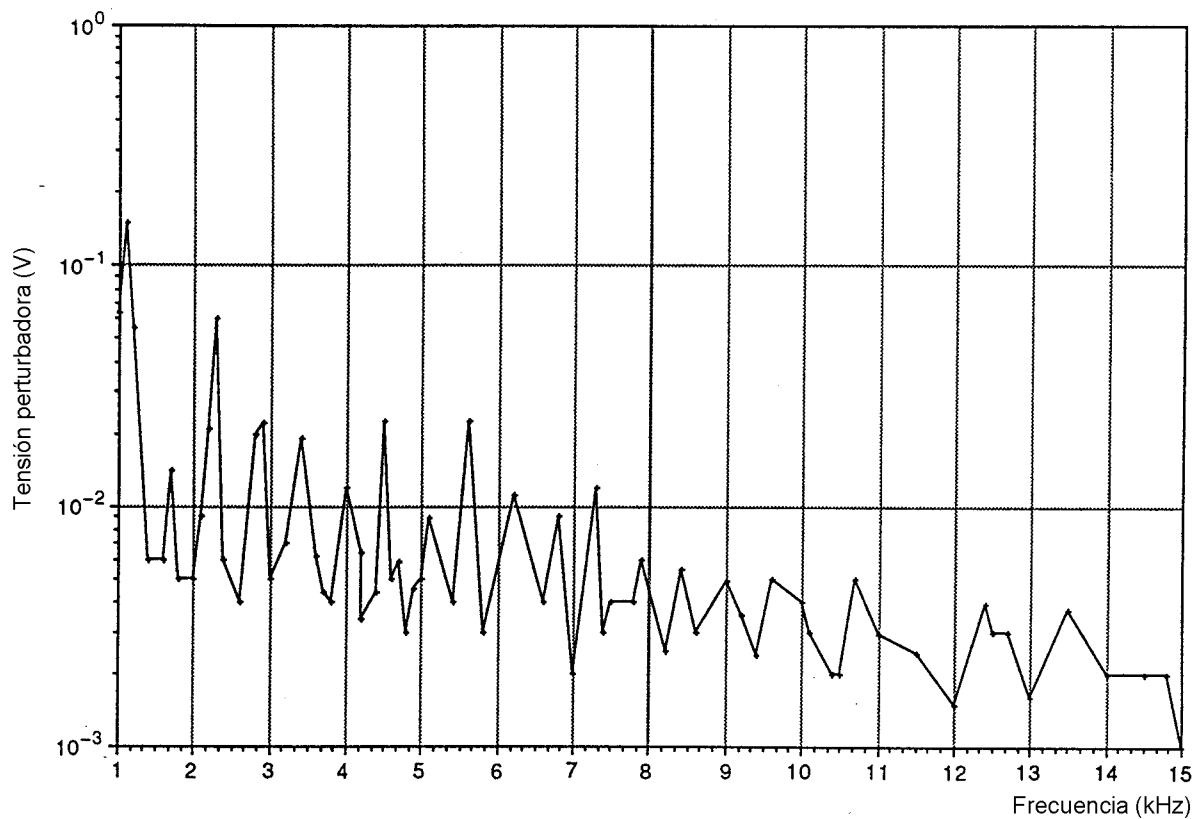
### **6.9 Motores**

Las perturbaciones debidas a los motores pueden provenir de su puesta en, y fuera de, servicio y de su funcionamiento. La conmutación produce transitorios que son tratados en el apartado 6.5.2. Normalmente, los motores de inducción de corriente alterna producen poca o ninguna perturbación. Una fuente importante de perturbaciones es la que se produce por los motores de colector, bien sean del tipo de corriente alterna o de corriente continua.

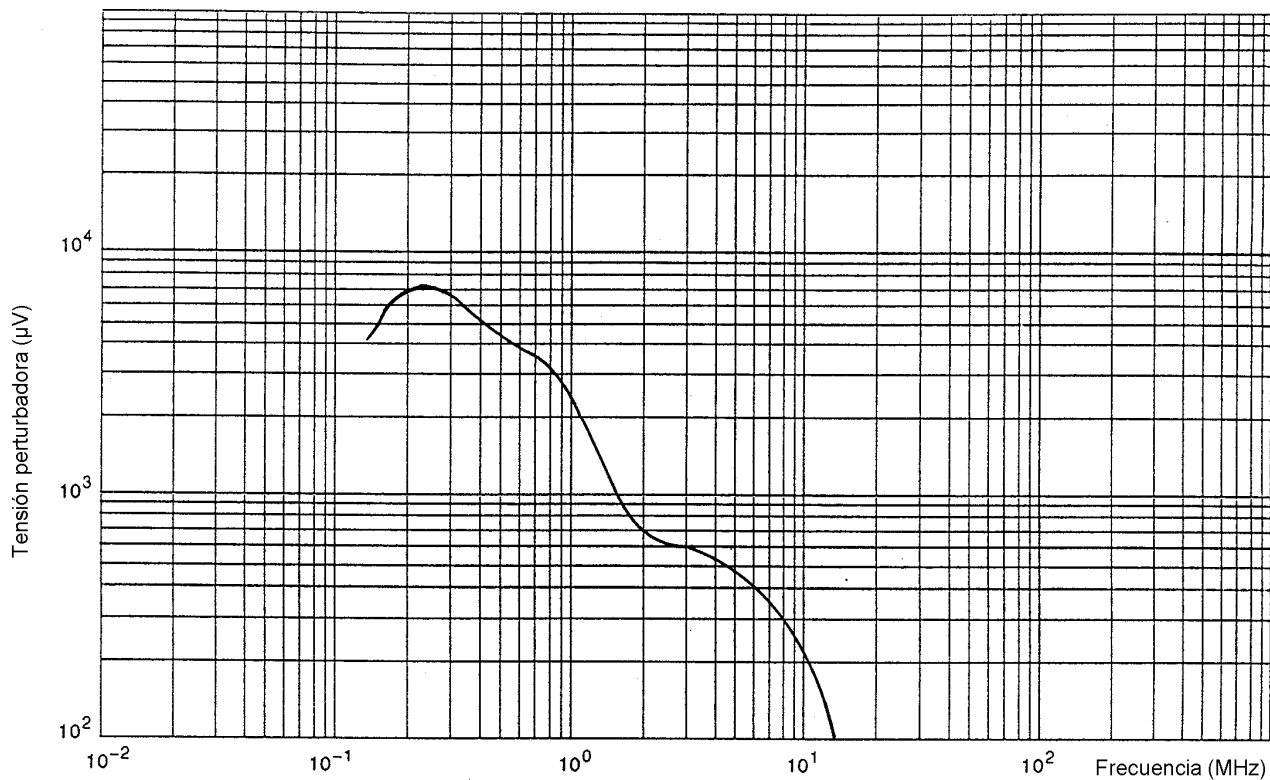
#### **Emisión conducida**

La figura 24a muestra niveles de perturbación para un generador de corriente continua de 0,5 kW en la banda de frecuencias que va desde 1 kHz a 15 kHz. Estas medidas han sido realizadas en una banda de análisis de 60 Hz. La figura 24b muestra resultados similares para una dinamo. En este caso la banda de medida era 5 kHz.





**Fig. 24a –Tensión de ruido conducida de un generador c.c. de 500 W a plena carga (1 725 r.p.m, 115 V c.c. 4,4 A, R = 2,76  $\Omega$ )**



**Fig. 24b – Tensión perturbadora conducida entre línea y tierra por un conmutador 14-250 V c.c.**

### **6.10 Sistemas y dispositivos digitales**

Los dispositivos y los sistemas digitales engendran un ruido continuo de frecuencias discretas. Las fuentes principales son los relojes, los circuitos de distribución así como los convertidores de potencia. La gran mayoría de las frecuencias de reloj está comprendida entre 1 MHz y 30 MHz. Debido a la brevedad del tiempo de subida y de bajada de las señales, pueden existir armónicos que se elevan hasta 1 GHz. La frecuencia de funcionamiento de los convertidores de potencia está comprendida entre 2 kHz y varios centenares de kHz en la mayor parte de los casos. Existen armónicos perturbadores muy grandes hasta el orden del MHz.

#### **Emisiones conducidas**

Las interfaces de conducción con el entorno se efectúan por las líneas de potencia, de señales, de datos y de telecomunicación.

Los límites para las emisiones conducidas se especifican por CISPR. La figura 8 de este informe muestra los límites a observar. Estos límites se inscriben bajo el título Equipo de Tecnología de la Información (ETI). Se dividen en:

- ETI clase B valor medio
- ETI clase B cuasi-cresta
- ETI clase A valor medio
- ETI clase A cuasi-cresta

Para el empleo general de los equipos ETI, deben aplicarse los límites de la clase B. En casos especiales – zonas industriales, emplazamientos definidos – se pueden aplicar los límites de la clase A. Por otra parte, existe una diferencia en la evaluación de los resultados de las medidas de emisión entre banda estrecha (valor medio) y banda ancha (cuasi-cresta).

Para respetar los límites de las especificaciones, es necesaria la supresión de las perturbaciones de las emisiones conducidas en la mayor parte de los casos. El empleo de dispositivos o de sistemas no certificados, o la ausencia de supresión de las perturbaciones, puede engendrar niveles de ruido 30 a 100 veces más elevados.

#### **Emisiones radiadas**

Los límites de las emisiones radiadas se especifican por el CISPR. La figura 9 de este informe, muestra los límites para los Equipos de Tecnología de la Información (ETI) y para los equipos Industriales, Científicos y Médicos (ICM). En algunas instalaciones en que los límites de CISPR no pueden aplicarse, por ejemplo en los centros de conmutación de las telecomunicaciones, los niveles pueden exceder sensiblemente los límites de CISPR.

### **6.11 Receptores de televisión y de radio, monitores y grabadoras de vídeo**

Los receptores de televisión y de radio y los monitores generan emisiones de naturaleza senoidal (banda estrecha) debidas a los osciladores locales y a sus armónicos. Los armónicos de los osciladores de desviación horizontal de los tubos catódicos se manifiestan igualmente en el caso de los receptores de televisión y de los monitores.

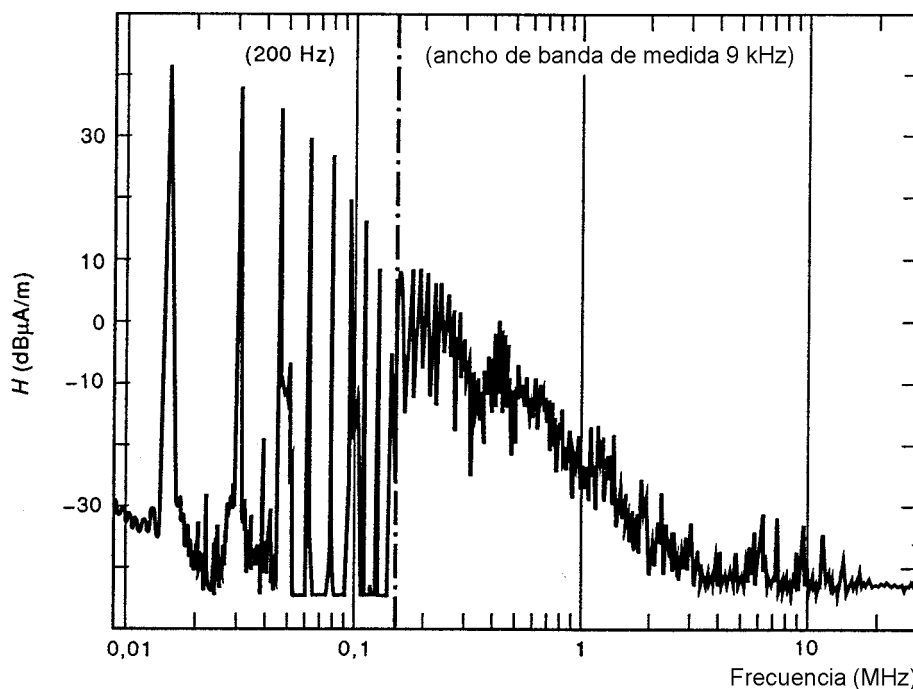
Las emisiones superiores a 150 kHz que emanan de los receptores de radio y de televisión están generalmente reglamentadas en los diversos países.

#### **Emisiones conducidas**

Los límites de las emisiones conducidas que provienen de receptores de televisión y de radio se especifican hasta la frecuencia de 1 GHz. Se limita igualmente la tensión de ruido en los extremos de las antenas (véase la figura 8, curvas 7 a 9).

#### **Emisiones radiadas**

Dentro de los receptores y monitores, las principales fuentes de perturbación son los osciladores horizontales. Las bobinas de deflexión de los tubos catódicos producen fuertes campos magnéticos (véase la figura 25).



**Fig. 25 – Campo magnético producido por las bobinas de un monitor de vídeo (medido a 10 m)**

Se puede considerar que los niveles máximos producidos por el oscilador local en el rango de frecuencias superiores a 150 kHz están cerca de los que se indican en la figura 9.

Para los receptores de televisión que presenta una alta definición, está en estudio un límite de un nivel más elevado en el rango de frecuencias situado por debajo de 150 kHz.

### 6.12 Lámparas fluorescentes

Se puede distinguir dos categorías principales de lámparas fluorescentes:

- 1) Lámparas que funcionan a la frecuencia industrial con un balasto pasivo;
- 2) Lámparas que funcionan en el rango de frecuencias de 20 kHz a 50 kHz con un balasto a sólido activo.

Los datos de emisión dependen de varios parámetros tales como: balasto simétrico o asimétrico, estabilización inductiva o capacitiva de la corriente de la lámpara, lámparas con o sin “starter”, una o varias lámparas por luminaria, atenuación de las radiofrecuencias provocadas por la luminaria, diagrama de radiación del conjunto lámpara mas luminaria, etc.

#### Emisiones conducidas

Durante el funcionamiento normal de una lámpara fluorescente, un ruido de banda ancha resulta del ruido del encendido y de extinción en el cátodo del tubo, y de las oscilaciones de plasma en el ánodo del tubo. Cuando la potencia de emisión de electrones del electrodo llega a ser baja, puede estar presente en el lado del cátodo un ruido doble.

En la mayor parte de los casos, las componentes de los ruidos radioeléctricos (150 kHz – 1,6 MHz) se limitan por la atenuación recomendada de la luminaria [18], a un nivel correspondiente más o menos al indicado en [19]. La figura 26a muestra los resultados típicos (medidos como en [20]), para una lámpara de tipo 1 que utiliza dos valores de la impedancia de la red artificial. Se puede concluir que una lámpara de tipo 1 en su luminaria se comporta como una fuente de corriente (una gran impedancia de fuente comparada a las impedancias de medida), ya que la diferencia entre las dos curvas es del orden de 10 dB. Las lámparas de tipo 2 producen una mezcla de ruido de banda ancha y banda estrecha. La figura 26b muestra los resultados típicos para una lámpara de tipo 2. En las figuras 27a y 27b [21] se dan otras informaciones para grupos de lámparas de tipo 1 y 2, y en este caso la corriente fue medida con la ayuda de una sonda de corriente situada en el conductor de fase de la alimentación.

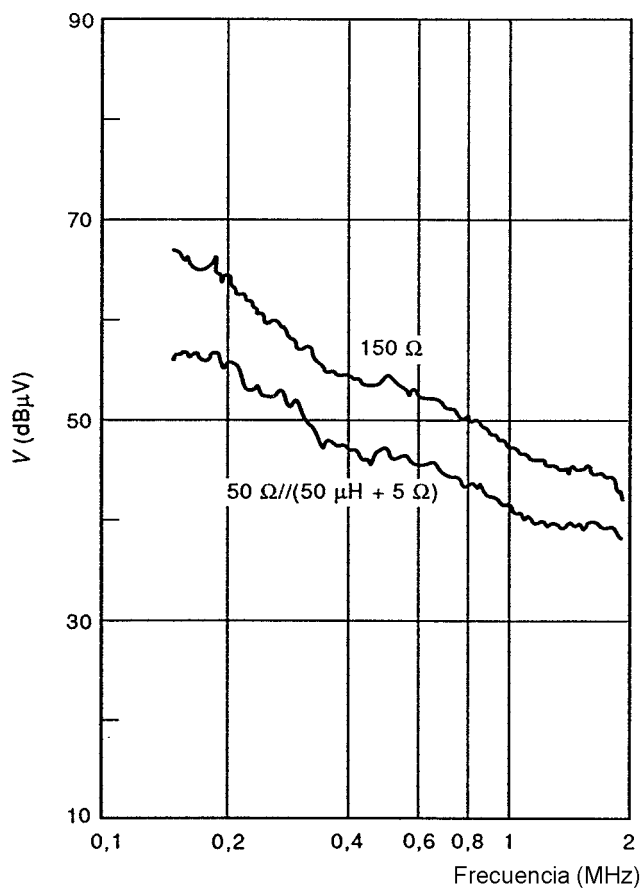


Fig. 26a – Tensión perturbadora en los bornes de una lámpara de tipo 1 (medida según CISPR)

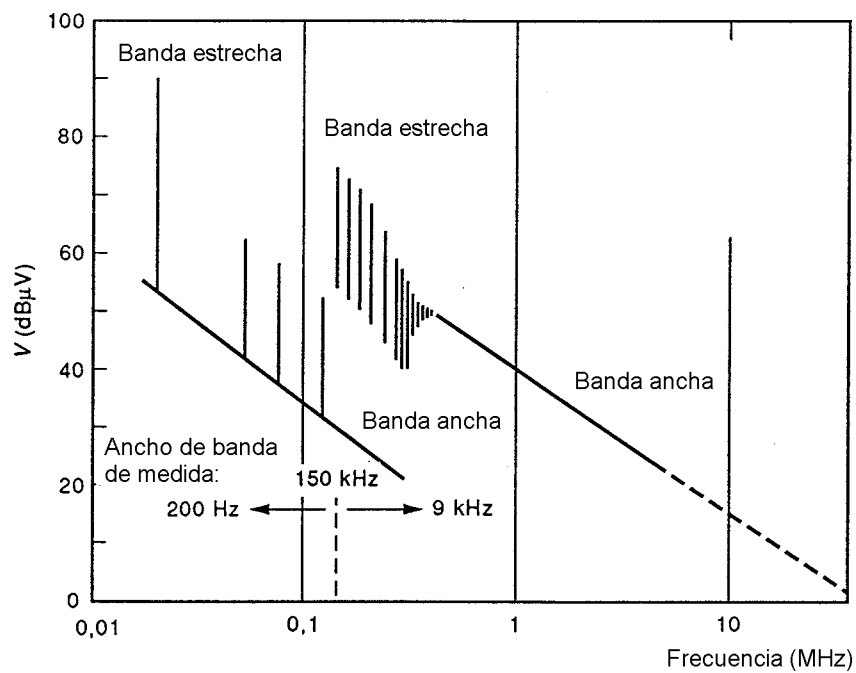
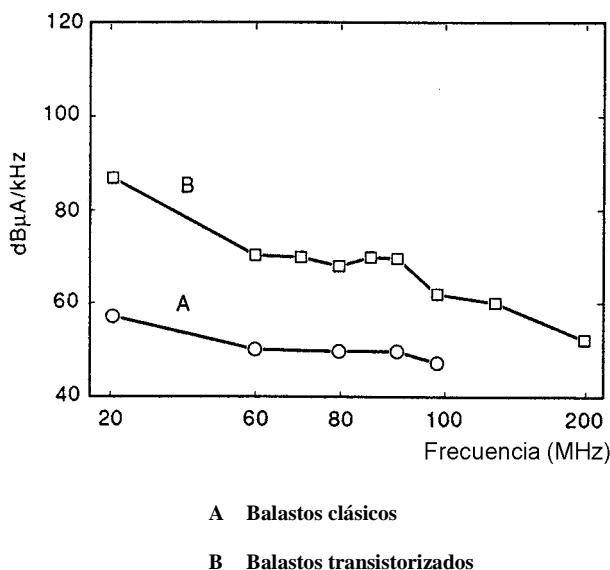
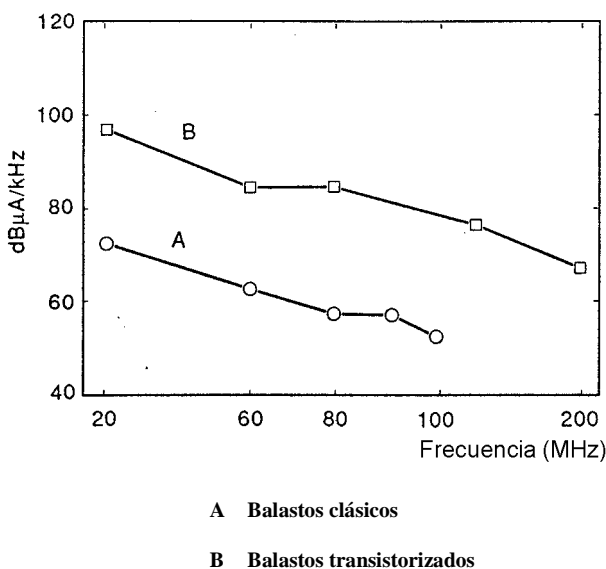


Figura 26b – Tensión perturbadora en los bornes de una lámpara de tipo 2 sin antiparasitaje adicional (medida según CISPR)



**Fig. 27a – Perturbaciones electromagnéticas conducidas en una suite de director con 36 luminarias de dos lámparas**



**Fig. 27b – Perturbaciones electromagnéticas conducidas en una clínica ambulante con 140 luminarias de dos lámparas**

Se provoca un tipo particular de ruido de banda ancha por la puesta en circuito y fuera de circuito de tales lámparas (transitorios de conmutación). En este caso las lámparas de tipo 1 deben considerarse de forma particular si la luminaria posee una capacidad de supresión de las perturbaciones para cumplir las recomendaciones de atenuación de las radiofrecuencias de los alumbrados. En la figura 28 se da un ejemplo típico de transitorio medido entre la fase y el neutro en los bornes de un alumbrado. Valores de cresta de hasta 10 kV han sido medidos directamente en estos bornes. Tensiones asimétricas de hasta 1 kV han sido medidas en las tomas murales de viviendas. No se conoce ningún estudio sistemático de estos transitorios de conmutación. La forma de onda de tensión puede describirse considerando un circuito resonante constituido por la inductancia del balasto (del orden de 0,75 H) y de la capacidad de supresión de las perturbaciones (típicamente 22 nF). La tensión cresta es proporcional a la corriente de la lámpara en el momento en que el arco del interruptor se extingue. En ausencia de capacidad de supresión, la tensión cresta se determina de manera preponderante por la tensión de corte de los contactos del interruptor.

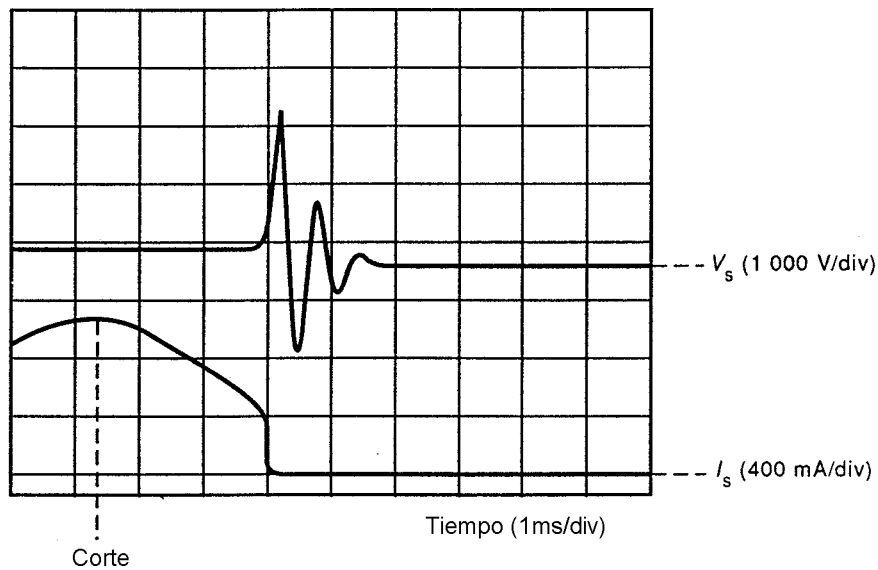


Fig. 28 – Ejemplo de transitorio provocado por una lámpara fluorescente de tipo 1

### Emisiones radiadas

El ruido de banda estrecha puede dividirse en dos partes, los armónicos de la frecuencia de la red y el ruido no ligado a la frecuencia de la red.

Las lámparas de tipo 1, que incluyen las estructuras de cableado y conexión a tierra, emiten una cantidad apreciable de campo magnético del armónico de corriente de orden 3. Se han medido densidades de flujo magnético de alrededor de 100 dB(pT) a 1 m por encima del suelo de hormigón armado, (estructura de tierra), y se han encontrado valores 14 dB más altos cerca del suelo, mostrando así la influencia de la conexión a tierra. No se posee información sobre el campo magnético de baja frecuencia para las lámparas de tipo 2.

Las lámparas de tipo 2 emiten campos eléctricos y magnéticos no ligados a la frecuencia de la red. A partir de una distancia superior a la longitud del tubo fluorescente las características de emisión están próximas a las de un dipolo magnético por el que circularía la corriente de la lámpara. La constante de proporcionalidad  $K$ , entre la amplitud del campo magnético y la corriente de la lámpara depende del tipo de luminaria, véase figura 29. En la figura 29, se da también un ejemplo de la corriente de lámpara en función de la frecuencia. En la figura 30 se da un ejemplo de la amplitud del campo eléctrico, en que la curva A corresponde al ruido de banda ancha y la curva B es la envolvente del ruido de banda estrecha. El campo eléctrico  $E$  se mide con la ayuda de una antena monopolo de 1 m (41 pulgadas) cuyo plano del suelo estaba situado aproximadamente a 1 m bajo la luminaria. Esta contenía dos lámparas de tipo 2 (1,2 m cada una).

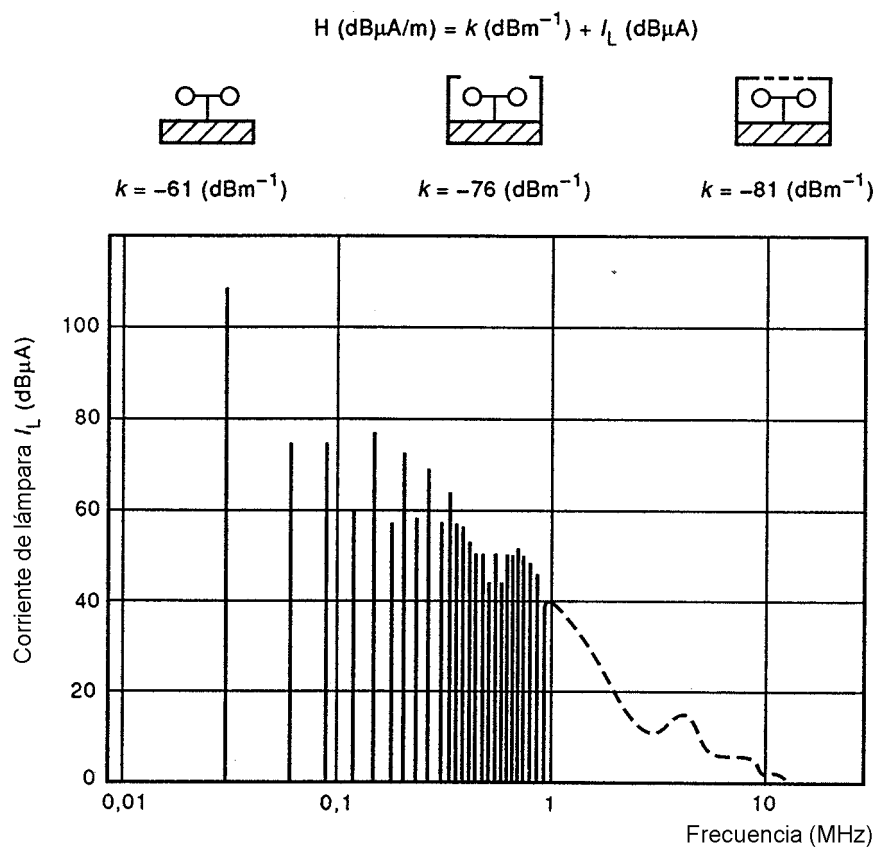


Fig. 29 – Corriente de lámpara/campo magnético de una lámpara de tipo 2 de diversas luminarias (medida a 1 m)

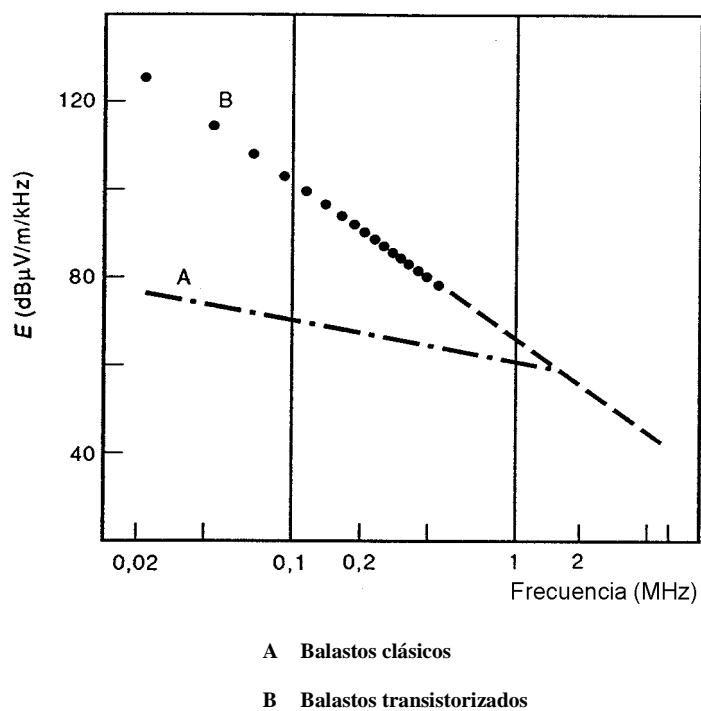


Fig. 30 – Campo eléctrico de una lámpara de tipo 2

## 6.13 Equipo industrial

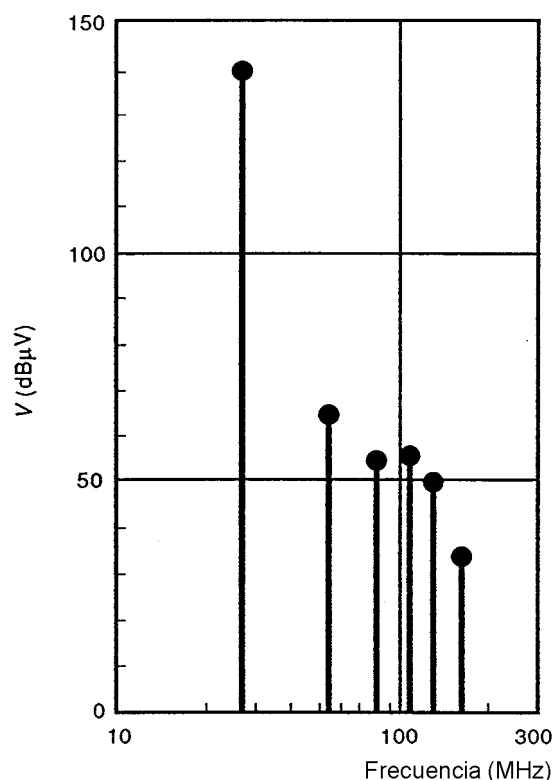
### 6.13.1 Equipo ICM

En este informe, los equipos industriales, científicos y médicos (ICM) son aquéllos en los que se engendra intencionadamente una energía radioeléctrica para el tratamiento externo de los materiales. Se les puede distinguir de los equipos en los que la energía es necesaria para el funcionamiento interno de los equipos como el caso de las lámparas fluorescentes de tipo 2 (véase en 6.12). Se puede citar como ejemplos: el equipo industrial de calefacción, de soldadura y encoladura, la producción de plasma, la diatermia médica. Muchos equipos ICM, pero no todos, funcionan en las bandas de frecuencia definidas por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT), véase [22]. Estos equipos no están sometidos a los límites fijados por CISPR ni a los indicados en la figura 9. Un ejemplo de equipo ICM funcionando según las frecuencias no definidas por la UIT, es un equipo de calefacción industrial que funciona en una frecuencia básica comprendida entre 50 kHz y 500 kHz.

#### Emisiones conducidas

No hay disponible ningún dato sobre medidas en banda ancha. En general, las perturbaciones de banda estrecha dominarán mientras las perturbaciones de banda ancha puedan causarse por los rectificadores y los motores de equipos.

Los niveles de emisiones de banda estrecha, a frecuencias distintas de las definidas por la UIT, se supone que respetan los límites mencionados en [22]. Sin embargo, se sabe que muchos no los respetan. La figura 31 muestra un ejemplo de medidas efectuadas en los bornes de una red en V en un equipo de diatermia de 27 MHz con utilización de una sonda de 150  $\Omega$ .



**Fig. 31 – Perturbaciones conducidas por un equipo de diatermia de 27 MHz**

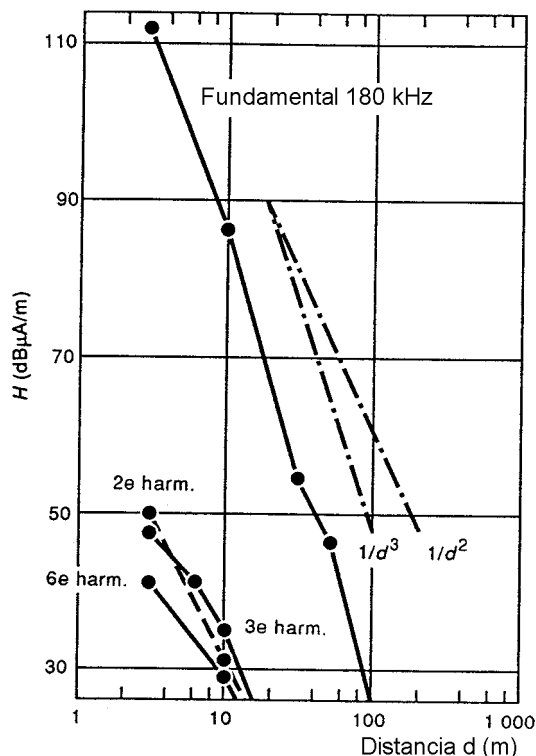
El valor grande de la componente fundamental conducida, mostrada en la figura 31, resulta del nivel elevado del campo emitido que se acopla directamente con la red de alimentación exterior. En este caso, no es eficaz un filtro de alimentación.



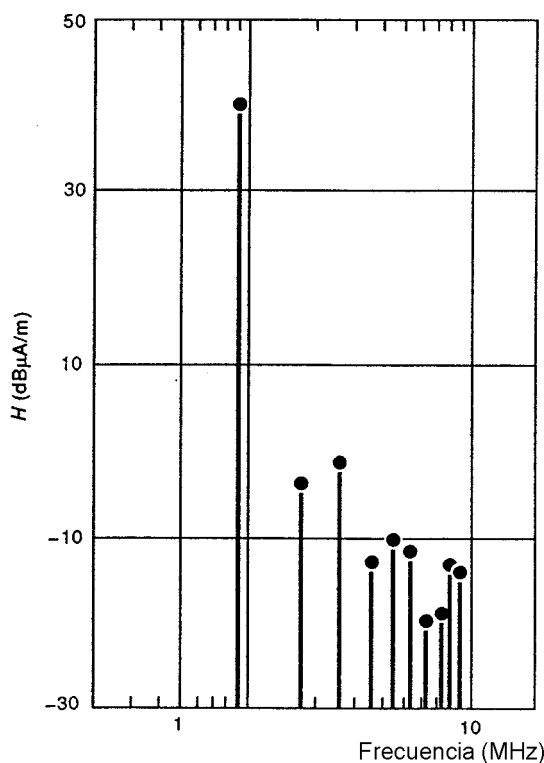
Los armónicos mostrados en la figura 31 son relativamente bajos porque era utilizada una carga resistiva ficticia. Sin embargo, los diversos tipos de cargas reales, las diferentes maneras de conectarlas al generador y el nivel de las componentes engendradas pueden afectar considerablemente al nivel de las emisiones armónicas [23].

**Emisiones radiadas**

En campo magnético próximo, no se dispone de ningún dato en banda ancha. La figura 32 muestra los resultados de medidas de la componente del campo magnético en dB( $\mu$ A/m), en función de la distancia de la fuente, y correspondiente a un equipo de calefacción industrial



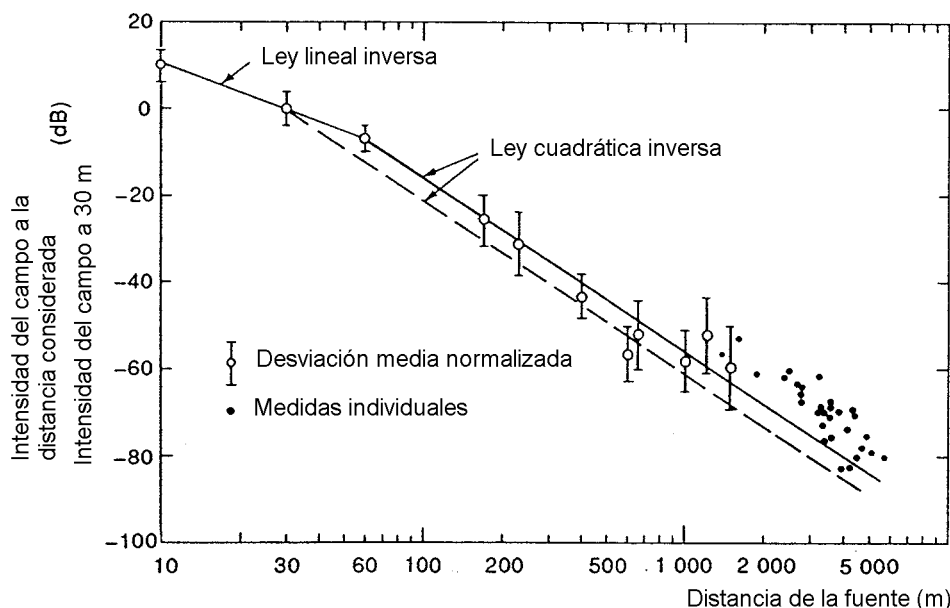
**Fig. 32 – Variación del campo magnético de un equipo de calefacción industrial en función de la distancia (corriente de bobina de 100 A)**



**Fig. 33 – Variación del campo magnético de un equipo de calefacción industrial en función de la distancia (medida a 2 m)**

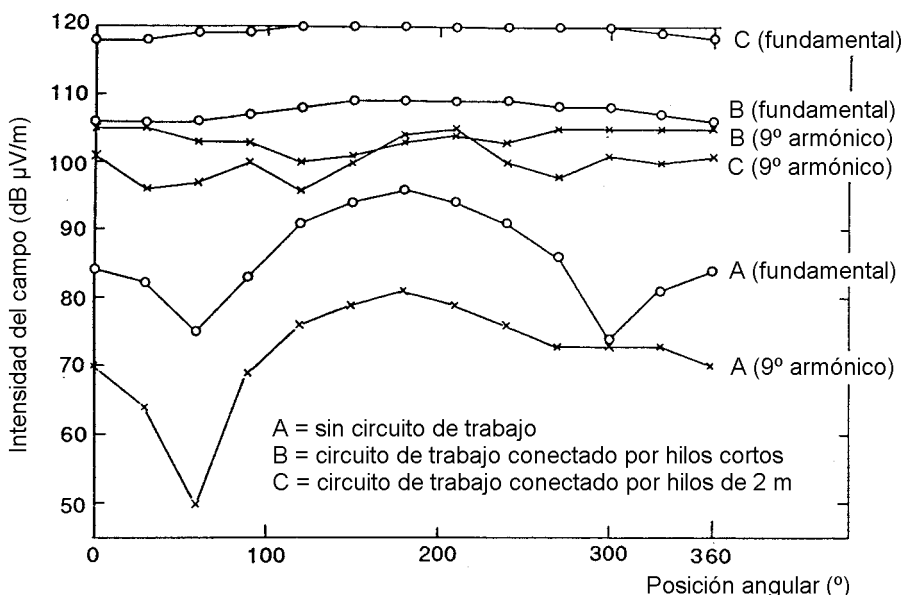
La figura 33 muestra el campo magnético  $H$  en función de la frecuencia. En este ejemplo, la bobina de inducción tenía un diámetro de 30 mm, la potencia era de 4,5 kW, la antena magnética era de la misma altura que la bobina (alrededor de 1,5 m por encima del suelo), y la distancia de medida era de 2 m. Obsérvese que la componente fundamental no era de una frecuencia definida por la UIT en los dos ejemplos.

En campo eléctrico próximo, no se dispone de datos de banda ancha. La figura 34 da un ejemplo del campo en banda estrecha en función de la distancia a la fuente mientras que la figura 35 muestra diagramas polares con variaciones en el circuito como parámetro. Los datos han sido registrados en dos máquinas de precalentamiento de plástico, dos máquinas de soldar plástico y tres máquinas de encolar la madera cuya potencia iba de 1 kW a 2 kW. Los valores indicados en la figura 35 se han obtenido con una antena distante 30 m. Las frecuencias fundamentales estaban cerca de 10 MHz y 35 MHz.



**Fig. 34 – Variación de la intensidad de campo de un equipo ICM en función de la distancia**

Algunos valores indicados en la figura 35 representaban los niveles en campo remoto. En la figura 36 se muestran los datos de una fuente de plasma de alta frecuencia que funciona a 127 MHz. Las propiedades de propagación pueden deducirse de las figuras 32, 34 y 36. Se puede concluir que un equipo de calefacción por inducción se comporta más o menos como un dipolo magnético. En la figura 36, la intensidad del campo en el exterior del edificio no es inversamente proporcional a la distancia. Ello resulta de la dispersión de las ondas causada por el edificio que crea así, para la antena de medida, una recepción en diferentes ángulos.



**Fig. 35 – Diagramas polares de la intensidad de campo de un equipo ICM**

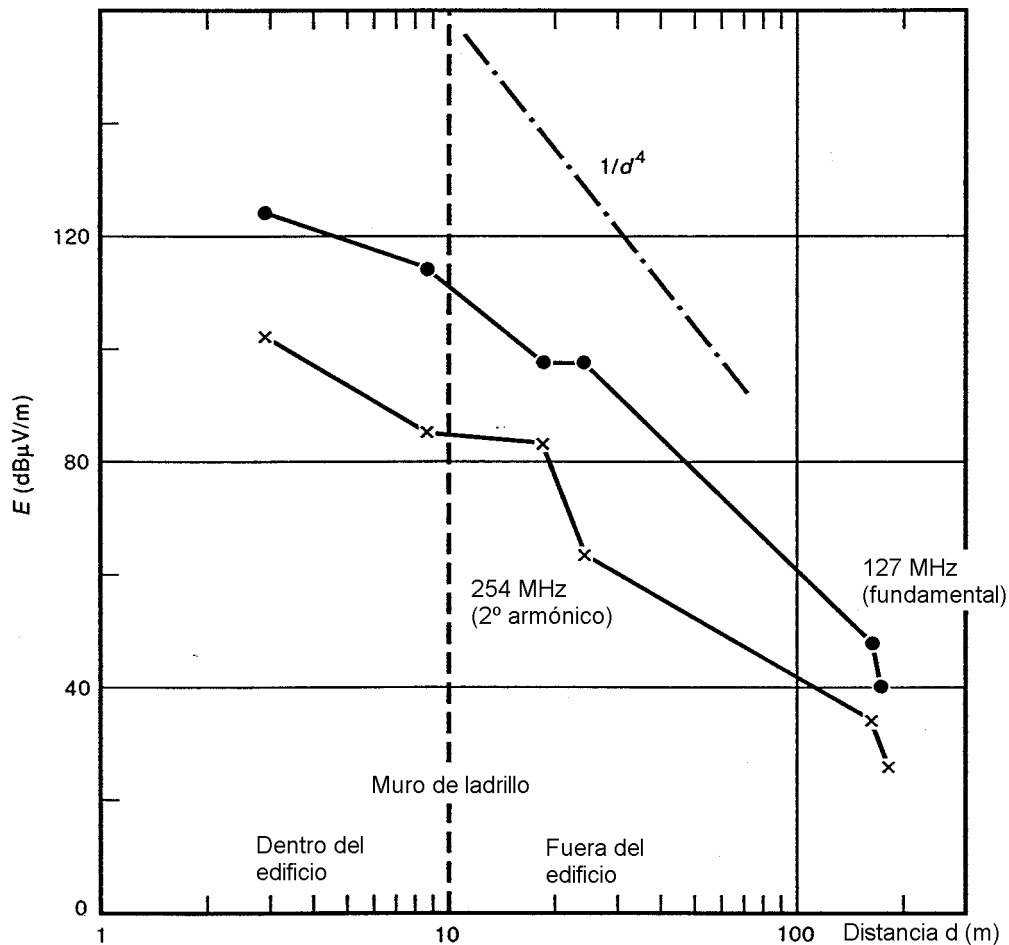


Fig. 36 – Campo eléctrico de una fuente de plasma de frecuencia radioeléctrica

### 6.13.2 Máquinas de soldar por arco

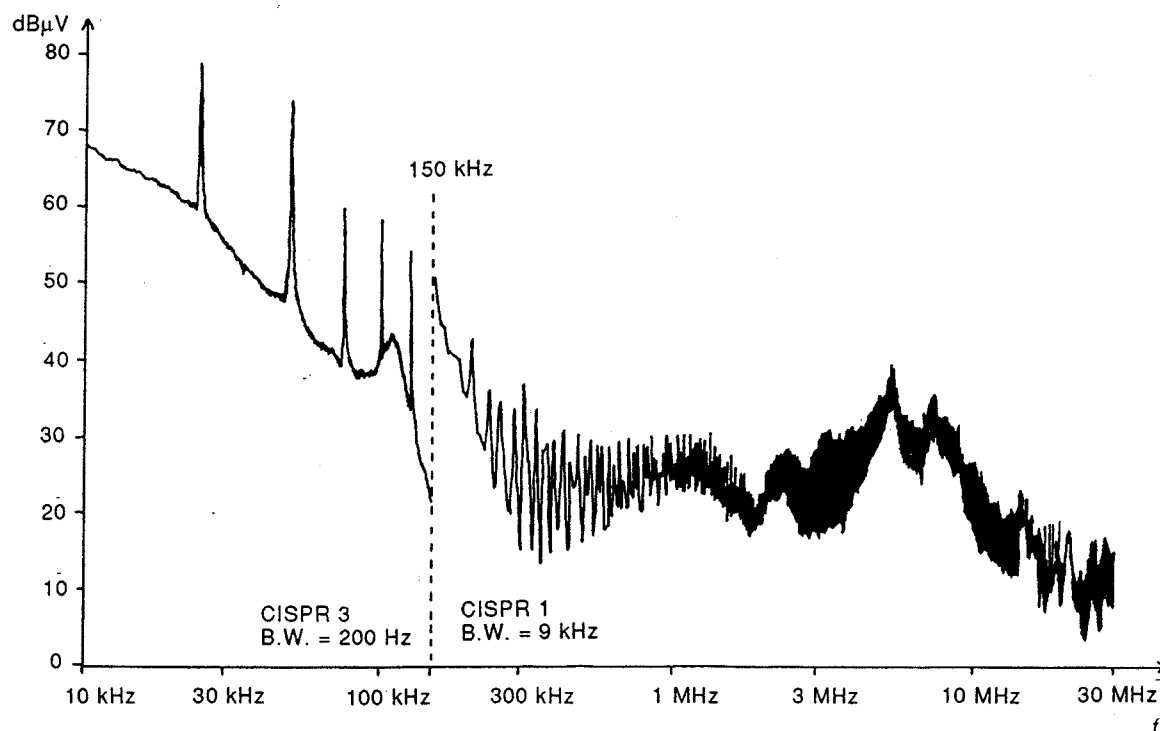
En estudio.

**6.13.3 Convertidores de potencia y sistemas de alimentación ininterrumpida.** Para potencias de salida entre 100 W y 5 kW, la mayor parte de los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) utilizan una frecuencia de conmutación entre 10 kHz y 200 kHz. Utilizan transistores bipolares o transistores MOS como componentes de conmutación. Los SAI de potencia superior tienen habitualmente una emisión muy superior, por que la utilización de filtros eficaces viene a ser a la vez técnicamente delicada y costosa.

### Emisiones conducidas

La emisión conducida de un SAI está principalmente determinada por:

- la tecnología utilizada,
- la potencia de salida del SAI,
- el tipo de secuencia de conmutación y de modulación,
- el tipo de filtro instalado a la entrada y a la salida del SAI.



**Fig. 37 – Perturbaciones conducidas, tensión entre línea y tierra, 50  $\Omega$  + receptor**

En la figura 37 se da la emisión conducida típica de un SAI de 1 kW, para la tensión no simétrica medida en el campo frecuencial, en los bornes de una red en V de CISPR. La corriente de modo común correspondiente se da en la figura 38, y la impedancia en este modo es principalmente capacitiva por debajo de 100 kHz. La parte imaginaria de esta impedancia de modo común es la reactancia de una capacidad cuyo valor se sitúa entre 1 nF y 40 nF. Los valores de impedancia dados dependen fuertemente del tipo de filtro utilizado, y sólo son válidos para los tipos de filtros más corrientes.

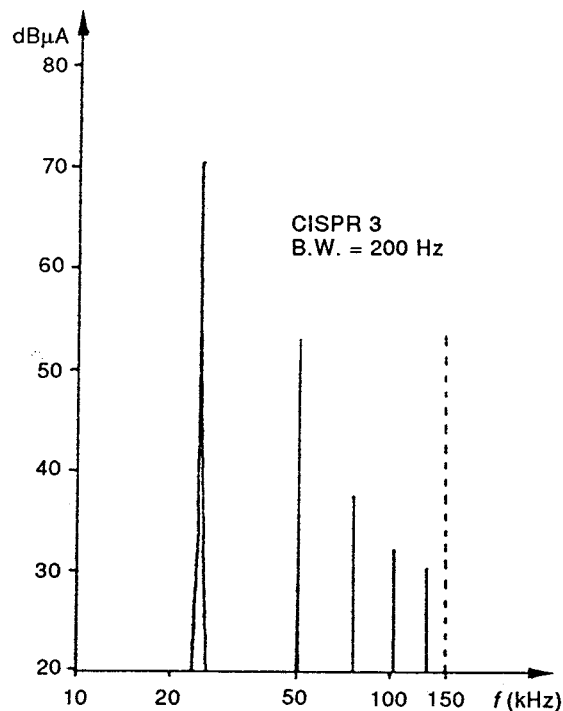


Fig. 38 – Perturbaciones conducidas: corriente en modo común

### Emisiones radiadas

La emisión radiada debida a un SAI estará determinada principalmente por la emisión de los cables empalmados a los bornes del SAI.

### 6.14 Sistemas de tracción

Los sistemas de tracción eléctrica pueden dividirse básicamente en dos categorías:

#### a) Sistemas de corriente continua

La potencia de tracción se desarrolla por motores de corriente continua que funcionan en un rango de tensión que va de 500 V a 3 000 V. La corriente llega por un raíl de alimentación en tensión o por un cable aéreo por catenaria, efectuándose el retorno de la corriente por raíles normales o un cuarto raíl utilizado como conductor de retorno. El sistema se alimenta por la red de media tensión utilizando rectificadores trifásicos que dan una ondulación fundamental de seis o doce veces la frecuencia de la red.

#### b) Sistemas de corriente alterna de alta tensión

Las tensiones de alimentación están comprendidas entre 15 kV y 25 kV, siendo la frecuencia de alimentación de 16 2/3 Hz, 50 Hz o 60 Hz. La corriente llega por un cable aéreo, con o sin empleo de un autotransformador o de un transformador elevador.

En los dos casos los motores pueden ser regulados por un mando de conmutador, o por un mando convencional de control de fase, o de modulación de anchura de impulso cuyas frecuencias son diferentes de las de la red, por ejemplo: 69 Hz, 209 Hz y 260 Hz. Se producen importantes armónicos impares, a frecuencias del orden de la frecuencia de la red, o mucho más altas (hasta 50 kHz).

La interferencia con otros sistemas se debe principalmente al acoplamiento por impedancia común por las redes de tierra y al acoplamiento inductivo de los campos magnéticos con sistemas próximos. En condiciones de aceleración, la intensidad del dipolo magnético puede ser tan alta como  $3 \text{ kA} \cdot \text{m}^2$ . Las amplitudes del espectro de frecuencia se atenúan normalmente como  $1/f$ .

Se producen perturbaciones de radiofrecuencia por tiristores, así como por las descargas que se producen entre el pantógrafo y el cable de alimentación.

### 6.15 Sistemas de ignición

Este apartado tiene por objeto los sistemas de ignición de los motores de combustión interna. Por lo que concierne a los sistemas de ignición de los automóviles, los niveles radiados fijados por los límites definidos por CISPR (figura 9) son representativos porque, prácticamente, todos los vehículos de motor están sometidos a estas reglas, o a reglas similares. Los niveles observados están sujetos a variaciones estadísticas considerables como se muestra en la figura 39 [24].

Los límites definidos por CISPR sólo controlan indirectamente los niveles dentro de los vehículos. Los niveles conducidos pueden controlarse en cierta medida por la utilización de filtros situados en puntos apropiados del sistema eléctrico. Para la recepción dentro del vehículo, como con un teléfono móvil, puede preverse un dispositivo de antiparasitaje complementario que da valores inferiores a los que son requeridos por CISPR, particularmente para algunos rangos de frecuencias.

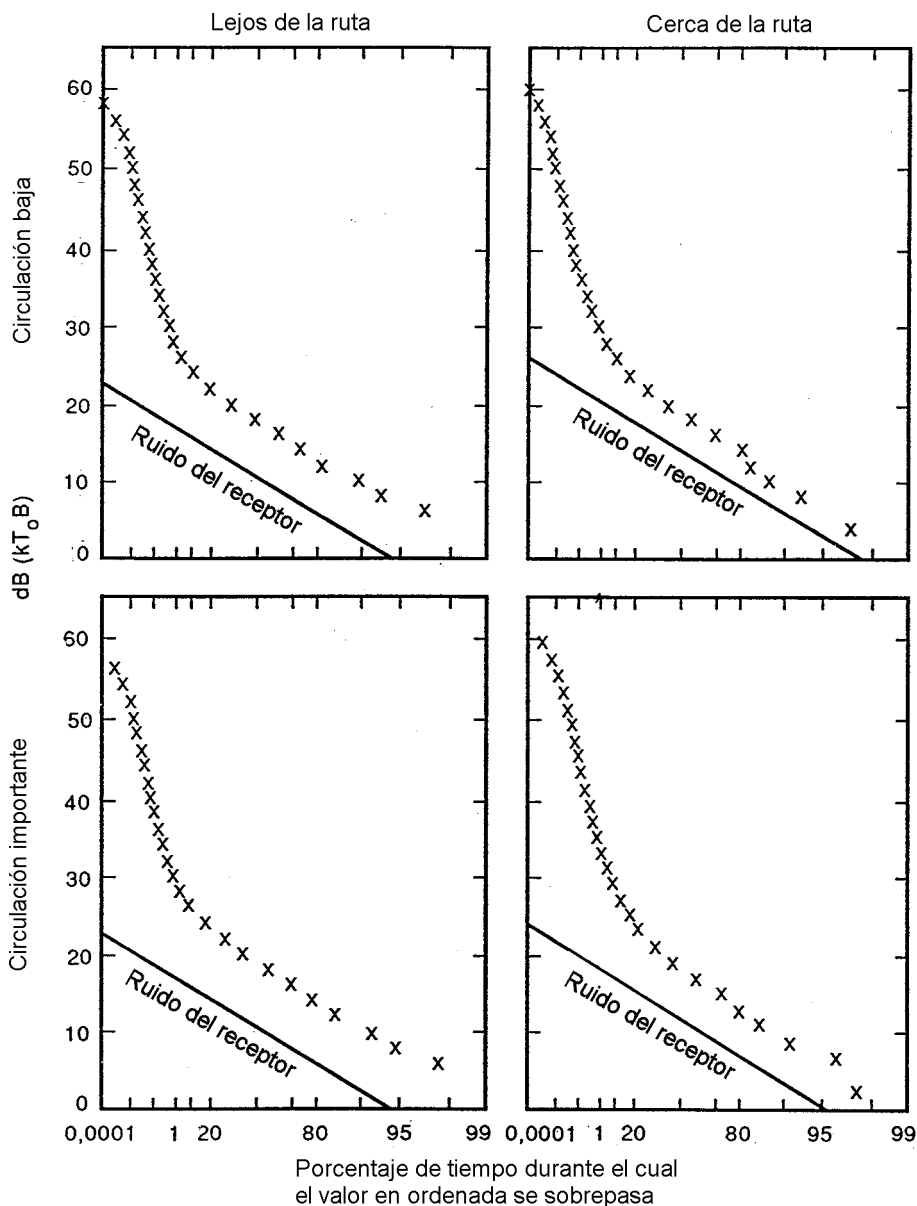


Fig. 39 – Distribuciones medias de probabilidad del ruido de la circulación por carretera a 24,11 MHz

## 7 EJEMPLOS DE ENTORNOS

La utilidad de la descripción del entorno electromagnético reside en su aplicación para asegurar que la compatibilidad electromagnética se realiza en sistemas particulares. Así, en el estudio de un sistema específico, es necesario prever las condiciones de entorno a las que este sistema será sometido para determinar las características de inmunidad que asegurarán el funcionamiento satisfactorio del sistema. En los apartados siguientes se dan ejemplos de entornos. Está en estudio una clasificación más sistemática y más extensa y será objeto de un documento separado.

### 7.1 Entornos residenciales y comerciales

El entorno residencial se caracteriza por fuentes de perturbaciones eléctricas que operan según niveles de potencia relativamente bajos. Sin embargo, equipos específicos pueden producir niveles de perturbación elevados, tal como se explica a continuación.

#### Niveles conducidos

Pueden producirse eventualmente transitorios de conmutación de nivel importante (de cresta superior a 1 kV, incluso hasta 4 kV) por la puesta en circuito, o desconexión, de equipos que tienen una carga inductiva o capacitiva a la línea. El transitorio básico puede ser de tipo arco en ráfaga, o de tipo oscilatorio amortiguado.

Pueden producirse transitorios repetidos de valor de cresta un poco más bajo que el de la tensión de línea, por ejemplo, por graduadores de alumbrado, lámparas fluorescentes, receptores de televisión, fuentes conmutadas. Los aspiradores y los mezcladores que tienen motores universales pueden producir niveles de perturbación relativamente elevados.

Los rayos en la estructura del edificio, en una tierra próxima, en las tuberías, en el sistema de acondicionamiento de aire o de ventilación, en la red de alimentación eléctrica, o en sistemas de mando, de señal o de datos pueden producir diferencias de tensiones transitorias fuertes entre estos elementos dentro de un edificio. Cuando estos elementos no están unidos, intencionalmente o no, la corriente del rayo que retorna a tierra por caminos inductivos no definidos, puede desarrollar tensiones transitorias pudiendo alcanzar varias decenas de kilovoltios. El hecho de unir estos elementos, allí donde está permitido o es obligatorio, por conexiones de baja impedancia o por dispositivos de protección contra las sobretensiones, puede reducir estos transitorios a niveles tolerables.

Dentro de un sistema (red de alimentación eléctrica, sistema de señal, mando o de datos), los transitorios de modo común tanto como de modo diferencial estarán limitados por las características de cebado de las tomas o del cableado de ese sistema [11]. Este cebado tiene lugar típicamente para tensiones comprendidas entre 2 kV a 10 kV, pero como no está controlado, el nivel es imprevisible.

En el entorno comercial los suelos están en general recubiertos por materiales que pueden conducir tensiones de carga muy elevadas y como consecuencia descargas electrostáticas particularmente severas (véase el apartado 6.4).

#### Niveles radiados

Se producen campos radioeléctricos por emisores de radio o de televisión, los emisores de radioaficionados, las radios "citizen band", y los equipos de comunicación móviles que pueden ser manejados a mano o instalados en automóviles. Pueden encontrarse intensidades de campo máximas superiores a 10 V/m pero, en la mayor parte de los casos, la intensidad del campo será inferior a 1 V/m. Por ejemplo, un emisor de radio, a la distancia de 100 m y con una potencia de 1 kW, producirá 2 V/m, un walkie-talkie de una potencia de 10 W a una distancia de 1 m producirá 22 V/m. Por otra parte, en las zonas donde funcionan sistemas de radar, por ejemplo cerca de los aeropuertos, se podrán constatar intensidades de campo que alcanzan hasta 100 V/m.

En puntos cerca de lámparas fluorescentes aparecen campos radiados de nivel importante. Estos campos pueden existir a frecuencias armónicas de la frecuencia de alimentación, o a frecuencias de oscilación del plasma. Como estos campos son típicamente campos de inducción, se atenúan rápidamente con la distancia (véase el apartado 6.12 para los niveles típicos).



## 7.2 Entornos industriales

Existe una gran diversidad de entornos industriales que van desde entornos especialmente protegidos: lugares remotos de fuentes de perturbación de origen humano o locales blindados y filtrados que sirven a la investigación y a los ensayos de gran sensibilidad, hasta entornos particularmente riguroso como laboratorios de ensayo de alta tensión; el equipo ICM (véase el apartado 6.13.1) aparece en este entorno. El procedimiento adoptado aquí consiste en discutir lo que se puede llamar el entorno industrial más general.

### Niveles conducidos

En un entorno industrial se pueden prever niveles semejantes a los de un entorno residencial o comercial (véase el apartado 7.1), salvo que los transitorios de conmutación pueden producirse más frecuentemente, con valores de cresta que aumentan aproximadamente con la tensión de funcionamiento de los equipos. Los transitorios de origen atmosférico pueden limitarse por la descarga disruptiva de las protecciones, que no es directamente proporcional a la tensión del sistema.

### Niveles radiados

El entorno a prever es semejante al que se describe en el apartado 7.1, salvo que los emisores “citizen band” no están presentes. Sin embargo, los walkie-talkies y los sistemas de búsqueda de personas están presentes.

Los campos inductivos, en particular de corriente continua y a las frecuencias de alimentación, pueden ser especialmente fuertes.

Pueden estar presentes campos a la frecuencia de alimentación, así como campos transitorios, cuando tienen su origen en dispositivos específicos. La intensidad del campo decrece proporcionalmente al cubo de la distancia de la fuente.

Cuando la fuente es una línea de alimentación o de transporte de energía, la intensidad del campo decrece en razón de la inversa del cuadrado de la distancia, cuando la distancia a la línea de alimentación es mucho más grande que la separación entre los conductores.

Una línea de transporte de energía o una línea de alimentación producirán normalmente un campo de intensidad que va hasta 30 dB( $\mu$ T). Un transformador tipo de 500 kW tendrá un dipolo de una intensidad de 24 dB( $\text{Am}^2$ ) correspondiente a 4 dB( $\mu$ T) a la distancia de 10 m.

## 7.3 Subestaciones de alta tensión

En las subestaciones, el entorno es muy severo debido a la presencia a la vez de altas tensiones y de diferentes clases de equipo:

- interruptores automáticos;
- seccionadores.

### 7.3.1 Fenómenos primarios

#### Interruptores automáticos

El cierre de interruptores automáticos con puesta en circuito de líneas de alta tensión produce transitorios de frente de onda brusco (tiempo de subida 10 ns a 1  $\mu$ s), seguidos de la forma de onda de la fuente de alimentación. La amplitud de los transitorios se extiende entre el valor de cresta de la tensión de alimentación y el doble de este valor si no se conecta ninguna carga a la línea.

Debido a las reflexiones que se producen durante la propagación del transitorio, el transitorio inicial es seguido de un cierto número de transitorios de menor amplitud. Cuando se produce un rebote de contacto, puede también afectar a estos fenómenos.

### Seccionadores

Las operaciones de conmutación producen transitorios de frente de onda brusco (algunas decenas de nanosegundos). El frente de onda de la tensión presenta una evolución que incluye reflexiones causadas por las inadaptaciones y su frecuencia fundamental de oscilación es representativa de la longitud del circuito desconectado. Estos transitorios se superponen a la tensión de alimentación. El cierre y la apertura de un seccionador toman un tiempo relativamente largo (algunos segundos), lo que causa la repetición del transitorio inicial. La tasa de repetición varía con la separación de los contactos (puede ser de 2 000 por segundo). La amplitud de los transitorios puede alcanzar el doble de la de la tensión de la fuente de alimentación.

**7.3.2 Efectos de acoplamiento.** El funcionamiento de los interruptores automáticos o de seccionadores, produce por acoplamiento resistivo, capacitivo o inductivo, transitorios en las líneas de baja tensión. Estos transitorios se caracterizan por un impulso que tiene un breve tiempo de subida (alrededor de 100 ns) seguido de ondas oscilatorias amortiguadas en la banda de 10 kHz a algunos megaherzios. Otro efecto del funcionamiento de los interruptores automáticos y de los seccionadores es la creación de un importante campo electromagnético.

**7.3.3 Rango de los niveles del entorno.** Los niveles de las perturbaciones conducidas en las líneas de baja tensión son muy importantes. Se pueden prever valores del orden de varios kilovoltios.

En la proximidad de los interruptores automáticos y de los seccionadores, el campo electromagnético puede alcanzar varias decenas de kV/m o A/m. Estos valores de perturbaciones conducidas o radiadas justifican una atención especial en lo que concierne a los métodos de instalación, la utilización de dispositivos de blindaje y la aplicación de las técnicas de equipotencialidad.

### 7.4 Centros de conmutación de telecomunicaciones

Los equipos de conmutación de una central telefónica están normalmente instalados en edificios especialmente dedicados a este uso y en los que los equipos ICM (Industriales, Científicos, Médicos), los equipos de radioaficionados y los walkie-talkies no se admiten normalmente. Pueden ser tomadas precauciones para limitar las tensiones DES (Descargas Electroestáticas) a 4 kV.

La distribución de corriente continua se da por un rectificador central que alimenta de forma permanente una importante batería de acumuladores. Se producen transitorios por la fusión de fusibles y por la desconexión de interruptores automáticos. Estos transitorios están limitados por la dimensión de la instalación a 250 V como máximo.

En el edificio penetran numerosos cables, blindados o no. Estos cables pueden tener varios kilómetros de longitud y pueden seguir un camino paralelo al de las líneas de la alimentación y de tracción de tensión media o alta. Protectores de sobretensiones adaptados a los cables expuestos tienen por efecto limitar las tensiones diferenciales y de modo común a 1 kV. Las sobretensiones inducidas que resultan de los fallos en la línea de alimentación de potencia están limitadas por la directivas CCITT a 650 V [25].

En otros aspectos, el entorno será el mismo que el que se describe para zonas residenciales y comerciales.

### 7.5 Hospitales

El hospital tipo tiene un entorno electromagnético muy complejo [26]. La razón es que contiene numerosos equipos emisores de gran potencia así como sistemas extremadamente sensibles. Con el fin de separar todos estos equipos, son instaladas zonas protegidas, por ejemplo la sala de operación donde se utiliza el escalpelo eléctrico y la sala donde se encuentra el electroencefalógrafo se sitúan en zonas protegidas por blindajes. Además de los emisores característicos del entorno residencial y del entorno comercial, el hospital puede poseer equipos de gran potencia como relés que controlan motores de montacargas y otros sistemas, equipos de rayos X que engendran corrientes de alta pulsación, numerosos sistemas digitales y una gran diversidad de sistemas de control. Muchos de estos equipos sólo pueden producir algunos efectos locales, como el campo magnético del equipo de resonancia magnética. Otros equipos, como los relés, pueden engendrar transitorios que pueden afectar a todo el sistema de alimentación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.D. Spaulding y R.T. Disney, *"Man-made radio Noise: Part 1: Estimated for business, residential and rural areas"*, OT Report 74-38, Junio 1974. U.S. Department of Commerce, Office of Telecommunications.
- [2] *"World distribution and characteristics of atmospheric radio noise"*, Report 322, International radio consultative committee (CCIR), Union Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra Suiza, 1964.
- [3] K. Berger, R.B. Anderson y H. Kröninger, *"Parameters of lightning flashes"*, Electra No. 41, Julio 1975, pp. 23-27.
- [4] R.B. Anderson y A.J. Eriksson, *"Lightning parameters for engineering application"*, Electra No. 69, March 1980, pp. 65-102.
- [5] B. Daout y H. Ryser, *"Fast discharge mode in ESD testing"*, Proceedings, 1985, Zürich EMC Symposium, pp. 41-46.
- [6] P. Richman, *"The effect of hand-associated object geometry and hand-to-object coupling impedance on ESD current waves"*, Proceedings, 1987 Zurich EMC Symposium.
- [7] CEI 60801-2 (1991): *"Electromagnetic compatibility for industrial-process measurement and control equipment -Part 2: Electrostatic discharge requirements"*.
- [8] P.F. Wilson & M.T. Ma, *"Fields radiated by electrostatic discharges"*, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 33, No. 1, Febrero 1991, pp. 10-18.
- [9] CIGRÉ Guía *"Electric and magnetic fields produced by transmission systems"*, Study Committee 36, Group 36.01, 1980.
- [10] CISPR 18: *"Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment"*. Part 1 (1982): *"Description of phenomena"*. Part 2 (1986): *"Methods of measurement and procedure for determining limits"*. Part 3 (1986): *"Code of practice for minimizing the generation of radio noise"*.
- [11] CEI 60664 (1980): *"Insulation coordination within low-voltage systems including clearances and creepage distances for equipment"*.
- [12] F .D. Martzloff y P.F. Wilson, *"Electrical fast transients: Trivial or terminal pursuit?"*, Proceedings, 1987 Zurich EMC Symposium, pp. 283-288.
- [13] J.J. Goedbloed, *"Transients in low-voltage supply networks"*, IEEE - EMC, Vol. EMC 29, No. 2, Mayo 1987, pp. 104-115.
- [14] CEI 60364-3 (1977): *"Electrical installations of buildings. Part 3: General characteristics"*.
- [15] F.D. Martzloff y T.M. Gruz, *"Power quality site survey: Facts, fictions and fallacies"* , Minutes IEEE Vol. IA-24, No. 6, 1988.
- [16] ANSI/IEEE C62.41-1991: *"Recommended practice on surge voltages in low-voltage a.c., power circuits"*.
- [17] F.O. Martzloff, *"The coupling, propagation and side effects of surges in industrial buildings wiring system"*. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 26, No. 2, Marzo/Abril 1992, pp. 193-203.

- [18] CISPR 15 (1985): "*Límites y métodos de medida de las características de perturbación radioeléctrica de lámparas fluorescente y luminarias*".
- [19] CISPR 14 (1985): "*Límites y métodos de medida de las características de perturbación radioeléctrica de los aparatos electrodomésticos, herramientas portátiles y aparatos eléctricos similares*".
- [20] CISPR 16 (1987): "*Aparatos y métodos de medida de las perturbaciones radioeléctricas*".
- [21] A.A. Arthur et al, "*Electromagnetic interference measurement of fluorescent lamps operated with solid-state ballasts*", IEEE Transactions on industry applications, Vol. IA-18, No. 6, 1982.
- [22] CISPR 11 (1990): "*Limits and methods of measurement of electromagnetic disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radiofrequency equipment*".
- [23] S.F. Pearce, J.H. Bull, "*Interference from ISM-equipment*", ERA Report 5053,1964.
- [24] R.A. Shepherd et al, "*Measurement of automotive noise at HF*". Final report of contract N00039-71-A-0223. Naval electronic systems command, Department of the Navy, Washington. DC., Febrero 1973.
- [25] Directives CCITT, Volumen 6, Capítulos 5-4 referentes a la protección de líneas de telecomunicación ante los efectos perjudiciales de las líneas eléctricas, 1989.
- [26] U.A. Frank and R.T. Londner, "*The hospital electromagnetic interference environment*", Journal of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation, Vol. 5, No. 4, 1971.



---

---

**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**