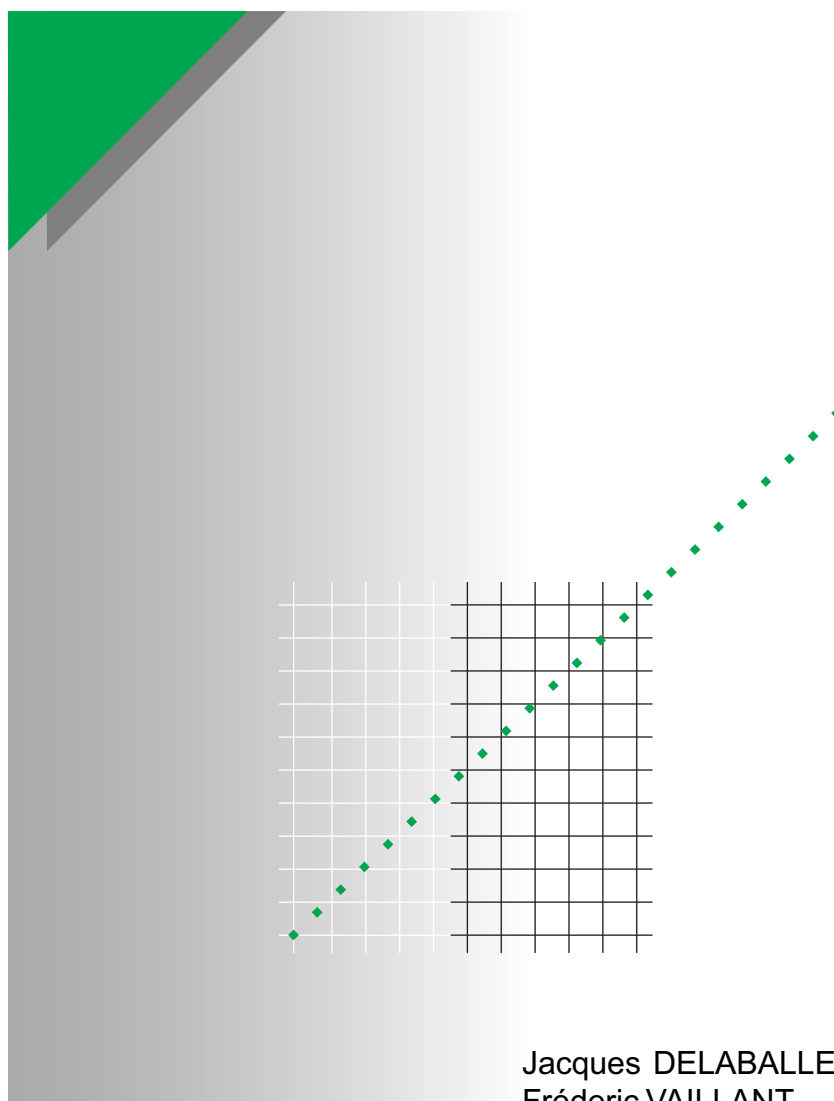


Cuaderno Técnico nº 149

La CEM: la compatibilidad electromagnética



Jacques DELABALLE
Frédéric VAILLANT

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 149 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 149

La CEM: la compatibilidad electromagnética



Frédéric VAILLANT

Diplomado en la Escuela Politécnica en 1984 (X81) y doctor en microelectrónica en 1987 (tesis preparada bajo un contrato CIFRE con la empresa Saint Gobain).

Su carrera en Merlin Gerin comienza en 1987.

De 1988 a 1991 ha sido el responsable del área de Compatibilidad Electromagnética en el Centro de Competencias en Electrónica de la Dirección Técnica.



Jacques DELABALLE

Animador de la red de competencia CEM de Schneider Electric y responsable de los laboratorios de ensayo CEM, ha participado en la actualización de este Cuaderno Técnico para las reediciones de 1996, 1998 y 1999.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: marzo 1999

Versión española: marzo 2000

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique



Terminología

Compatibilidad ElectroMagnética, CEM (abreviatura) (VEI 161-01-07)

Capacidad de un aparato o de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentra en este entorno.

Perturbación (electromagnética) (VEI 161-01-05)

Fenómeno electromagnético susceptible de crear problemas en el funcionamiento de un dispositivo, de un aparato o de un sistema, o de afectar desfavorablemente la materia viva o inerte.

Nota: una perturbación electromagnética puede ser un ruido, una señal no deseada o una modificación de un medio de propagación en sí mismo.

Nivel de compatibilidad (electromagnética) (VEI 161-03-10)

Nivel máximo especificado de perturbaciones electromagnéticas a que se puede someter un dispositivo, aparato o sistema que funciona en condiciones particulares.

Nota: en la práctica el nivel de compatibilidad electromagnética no es un nivel máximo absoluto ya que, aunque debe de ser poco probable, puede ser superado.

Nivel de perturbación (no definido en el VEI 161)

Valor de una perturbación electromagnética de forma dada, medida en condiciones especificadas.

Límite de perturbación (VEI 161-03-08)

Nivel máximo admisible de perturbaciones electromagnéticas medido en condiciones especificadas.

Nivel de inmunidad (VEI 161-03-14)

Nivel máximo de una perturbación electromagnética de forma dada que actúa sobre un dispositivo, aparato o sistema particular, sin que éste deje de funcionar con la calidad deseada.

Susceptibilidad (electromagnética) (VEI 161-01-21)

Incapacidad de un dispositivo, aparato o sistema de funcionar sin degradar la calidad en presencia de una perturbación electromagnética.

La **figura 1** permite situar los diferentes conceptos citados anteriormente en términos de nivel.

Decibelio

Unidad de potencia sonora, también utilizada para expresar razones de amplitud según la relación:

$X/X_o \text{ (dB@)} = 20.\log_{10} X/X_o$, con

X = amplitud medida,

Xo = amplitud de referencia,

@ = unidad de medida de X y Xo.

Se pueden ver algunos ejemplos en la tabla de la **figura 2**.

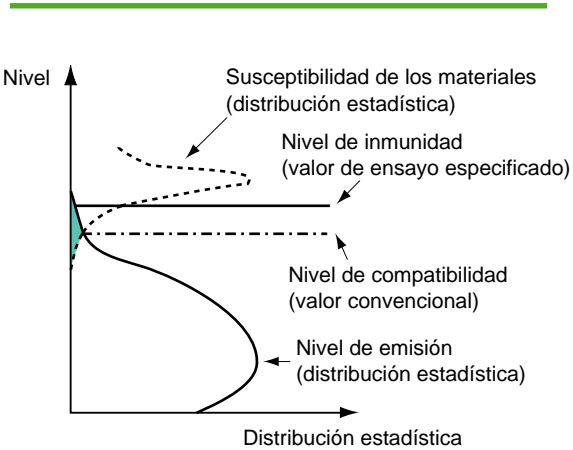


Fig. 1: Situación de los niveles de CEM.

Razón de amplitudes	dB
1	0
1,12	1
1,25	2
1,41	3
2	6
3,2	10
4	12
5	14
10	20
100	40
1000	60

Fig. 2: Razones de amplitud expresadas en dB.

La CEM: la compatibilidad electromagnética

La CEM se ha de tener en cuenta en el estudio para la fabricación de materiales electromagnéticos. Y también debe de tenerse en cuenta a la hora de instalarlos. Así, desde el arquitecto que diseña los edificios hasta los cableadores, sin olvidar a los ingenieros de diseño de redes y los instaladores, todos tienen algo que ver con esta disciplina de «paz»; disciplina que tiene por objeto hacer convivir en buena armonía materiales susceptibles de ser perturbados y/o de perturbaciones.

Este Cuaderno Técnico, editado y escrito por Schneider Electric es fruto de una larga experiencia. En él se explican las perturbaciones y se aportan algunas soluciones prácticas.

Índice

1 introducción	1.1 La compatibilidad electromagnética -CEM- es un hecho, pero también una disciplina	p. 6
	1.2 Actualmente la CEM es indispensable	p. 6
	1.3 Su teoría es compleja	p. 7
2 El generador de perturbaciones o fuente	2.1 Es muy importante conocer bien la fuente de las perturbaciones	p. 8
	2.2 Un ejemplo de fuentes permanentes de perturbaciones por conducción en electrónica de potencia	p. 9
	2.3 Un ejemplo de fuentes de perturbación por radiación: el cierre de aparamenta en las centrales MT y MAT	p. 11
3 El acoplamiento	3.1 Diferentes tipos de acoplamiento que existen	p. 12
	3.2 El acoplamiento campo a cable, en modo común o diferencial	p. 15
	3.3 El acoplamiento por impedancia común	p. 14
	3.4 El acoplamiento cable a cable en tipo diferencial o diafonía	p. 15
4 La víctima	4.1 Los fallos de funcionamiento	p. 16
	4.2 Algunas soluciones	p. 16
5 La instalación	5.1 La instalación es una variable importante en la CEM global de un sistema	p. 19
	5.2 El diseño de la instalación	p. 19
	5.3 El montaje de la instalación	p. 20
	5.4 Ejemplos prácticos	p. 20
6 Normas, medios de ensayo y ensayos	6.1 Las normas	p. 22
	6.2 Los medios de ensayos	p. 23
	6.3 Los ensayos	p. 23
7 Conclusión		p. 29
Anexo 1: Impedancia de un conductor en AF		p. 30
Anexo 2: Las partes de un cable		p. 32
Anexo 3: Ensayos hechos en los laboratorios CEM de Schneider Electric		p. 32
	Ensayos normativos	p. 32
	Ensayos fuera de las normas	p. 33
Anexo 4: Bibliografía		p. 34

1 Introducción

1.1 La compatibilidad electromagnética -CEM- es un hecho, pero también una disciplina

La CEM es un hecho debido a que equipos y sistemas soportan mutuamente sus efectos electromagnéticos.

Según el vocabulario electrotécnico internacional VEI 161-01-07, la CEM es la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema, de funcionar de manera satisfactoria en su entorno electromagnético sin introducir

perturbaciones en cuanto se halle en dicho entorno.

Esta definición es la misma que adopta la norma NF C 15-100, apartado 33.

Actualmente, la CEM es una disciplina que trata de mejorar la convivencia entre elementos que pueden emitir perturbaciones electromagnéticas y/o de ser susceptibles de padecerlas.

1.2 Actualmente la CEM es indispensable

De hecho y desde siempre, todo aparato está sometido a diversas perturbaciones electromagnéticas y en mayor o menor medida todo aparato eléctrico las genera.

Estas perturbaciones se generan de diversas maneras. En principio, las principales causas generadoras son variaciones bruscas de magnitudes eléctricas, tensión o corriente.

En el Cuaderno Técnico nº 141 aparece una presentación de las perturbaciones eléctricas más frecuentes (**figura 3**) en el campo de la electrotecnia de BT. El Cuaderno Técnico nº 143 trata, por otra parte, de las perturbaciones debidas a las maniobras de la aparamenta MT (Media Tensión).

Estas perturbaciones se pueden propagar por conducción, a lo largo de los hilos de los cables, o por radiación, en forma de ondas

electromagnéticas. Las perturbaciones producen fenómenos indeseables; dos ejemplos de ello pueden ser los ruidos y chasquidos que oímos en la radio, y las interferencias de estas emisiones radioeléctricas en los sistemas control y mando.

En estos últimos años se han presentado una serie de factores que dan más importancia a la CEM:

- las perturbaciones son cada vez más importantes ya que tensiones e intensidades van en aumento,
- los circuitos electrónicos son cada vez más sensibles,
- las distancias entre los circuitos sensibles (a menudo electrónicos) y los circuitos perturbadores (de potencia) se reducen.

Clases	Tipos	Orígenes
Energéticas	Picos de tensión	<ul style="list-style-type: none">■ Conmutación de fuentes■ Cortocircuito■ Arranque de motores de gran potencia
Frecuencias medias	Armónicos	<ul style="list-style-type: none">■ Sistemas con semiconductores de potencia■ Hornos de arco
Altas frecuencias	Subidas de tensión	<ul style="list-style-type: none">■ Caídas de rayo directas o indirectas■ Maniobras de aparatos de mando■ Corte de corrientes de cortocircuito con aparatos de protección
	Descargas electrostáticas	<ul style="list-style-type: none">■ Descargas de la electricidad estática acumulada por una persona

Fig. 3: Las perturbaciones eléctricas más corrientes.

Para desarrollar sus nuevos productos, Schneider Electric ha tenido que profundizar en el estudio de la CEM para después poder aplicarla. En efecto, en la aparatación eléctrica moderna conviven estrechamente las bajas corrientes señal y las grandes corrientes del transporte de energía, electrónica de control y mando y electrónica de potencia.

La CEM es, pues, un criterio fundamental que se ha de respetar en todas las fases de desarrollo y fabricación de productos (**figura 4**), pero también en las fases de instalación y de cableado.

Actualmente además, las normas tienen en cuenta la CEM y esta compatibilidad se está convirtiendo en un requisito legal imprescindible.

La experiencia de Schneider Electric y sus productos no se limitan a conseguir un buen funcionamiento de cualquier sistema eléctrico y/o electrónico en un entorno electromagnético habitual. Sus equipos y montajes, por ejemplo, son capaces también de resistir al entorno electromagnético más adverso, como es el de impulsos electromagnéticos originados por explosiones nucleares de gran altura.

Por eso, el endurecimiento a las radiaciones o la mejora de la resistencia de sistemas sometidos a impulsos electromagnéticos de origen nuclear, requiere la aplicación de las mejores técnicas de instalación de la CEM.



Fig. 4: Un ejemplo de aplicación de la CEM: una celda MT «SM6» integra un interruptor automático que corta cientos de amperios a decenas de kilovoltios, y una unidad programable SEPAM de protección y de control y mando. El conjunto debe de estar siempre operativo bajo cualquier circunstancia.

1.3 Su teoría es compleja

Cualquier aproximación a la CEM implica el estudio de un sistema compuesto de tres elementos:

- el generador de perturbaciones o fuente,
- la propagación o acoplamiento,
- y el elemento perturbado o víctima.

Aunque estos tres elementos no son estrictamente independientes, en la práctica se tratan como si lo fueran.

Hay que resaltar que la instalación, que se tratará en el **capítulo 5**, tiene un papel preponderante en la propagación de perturbaciones.

El estudio teórico es difícil, ya que está muy relacionado con el de la propagación de ondas electromagnéticas descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales complejas: las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones generalmente no se pueden resolver de forma exacta en las estructuras físicas reales; incluso con los sistemas informáticos más potentes es muy difícil conseguir un resultado numérico suficientemente aproximado.

En la práctica, hay que tratar los problemas de compatibilidad electromagnética utilizando un cierto número de hipótesis simplificadoras, usando modelos y, sobre todo, recurriendo constantemente a la experimentación y a la medida.

2 El generador de perturbaciones o fuente

2.1 Es muy importante conocer bien la fuente de las perturbaciones

El conocimiento de las fuentes, mejor aún, su identificación y medida, es indispensable porque permite determinar qué solución se ha de aplicar para:

- limitar la perturbación (por ejemplo, poner en paralelo con la bobina de un contactor un bloque antiparásito RC, si es en ca, o un diodo, si es en cc),
- evitar los acoplamientos (por ejemplo, separar dos elementos difícilmente compatibles),
- insensibilizar a las víctimas potenciales (usando, por ejemplo, blindajes).

Sus causas principales

Se considera una fuente cualquier aparato o fenómeno físico-eléctrico que emita una perturbación electromagnética, por conducción o radiación. Entre las principales causas de las perturbaciones hay que destacar: la distribución de energía eléctrica, las ondas hercianas, las descargas electrostáticas y el rayo.

■ En la distribución de la energía eléctrica gran parte de las perturbaciones provienen de maniobras de cierre y apertura de circuitos:

□ en BT, las aperturas de circuitos inductivos, como las bobinas de contactores, motores, electroválvulas..., producen en los bornes de estos arrollamientos subidas de tensión muy importantes y de alta frecuencia (algunos kV y decenas y hasta centenares de MHz),

□ en MT y AT la apertura y el cierre de los elementos de corte provoca la aparición de ondas de frente muy abrupto (de algunos nanosegundos). Estas ondas perturban, en especial, a los sistemas con microprocesadores.

■ Para algunos equipos electrónicos, las ondas hercianas que provienen de los sistemas de televigilancia y telemando, de comunicaciones por radio, televisión, walkie-talkie... son fuentes de perturbación que pueden llegar a ser del orden de algunos voltios por metro. El uso de todos estos elementos emisores va en aumento, lo que lleva a la necesidad de endurecer (proteger) estos equipos.

■ Por último, hay que tener presente que las personas se pueden cargar

electrostáticamente, por ejemplo caminando sobre una moqueta.

Con un tiempo frío y seco, ¡el cuerpo humano puede llegar a un potencial superior a 25 kV! Cualquier contacto con un equipo electrónico provoca entonces una descarga eléctrica que puede afectar al aparato por conducción o por radiación, y cuya rampa de subida (muy corta, de algunos nanosegundos) produce una gran cantidad de perturbaciones.

Principales características de estas perturbaciones

Las fuentes de perturbaciones pueden ser «necesarias» (emisora de radio) o «no necesarias» (equipo de soldadura por arco). Pero se distinguen de forma general por las características de las perturbaciones que inducen:

- espectro,
- forma de onda, o el tiempo de subida, o la envolvente del espectro,
- amplitud,
- energía.

■ El espectro, o banda de frecuencias cubierta por las perturbaciones, puede ser muy estrecho, como es el caso de los radioteléfonos, o por el contrario, muy ancho, como por ejemplo el horno de arco.

Las perturbaciones impulsionales tienen de particular que su espectro es muy ancho, pudiendo llegar hasta un centenar de MHz (**figura 5**). En esta categoría podemos encontrar, esencialmente, las perturbaciones que tienen como fuente:

- las descargas electrostáticas,
- el funcionamiento de la aparamenta, como por ejemplo, relés, seccionadores, contactores, interruptores e interruptores automáticos, en BT y en MT/AT,
- y, finalmente, en un campo más «específico», los impulsos electromagnéticos nucleares.

Teniendo en cuenta que la frecuencia determina el tipo de acoplamiento, en la CEM se utiliza muy a menudo la representación en frecuencia de las perturbaciones electromagnéticas. Esta representación consiste, para una señal repetitiva, en su descomposición en serie de Fourier (como una suma de armónicos).

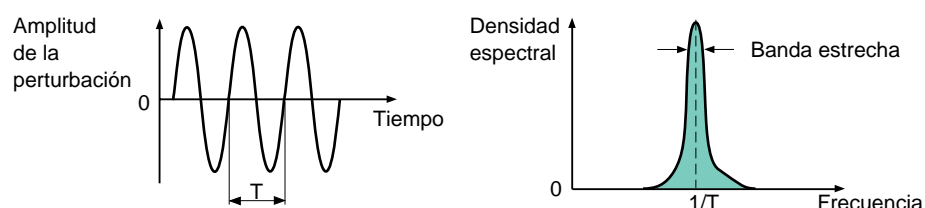
■ La forma de onda es característica de la variación temporal de la perturbación, por ejemplo sinusoidal amortiguada o biexponencial. Se expresa bajo la forma de un tiempo de subida t_m , de una frecuencia equivalente al tiempo de incremento ($0,35/t_m$), o simplemente de la frecuencia de la perturbación si ésta es de banda estrecha, o, finalmente, bajo la forma de una longitud de

onda λ que se relaciona con la frecuencia f por la expresión $\lambda = c/f$ donde c es la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

■ La amplitud es el valor máximo conseguido por la señal, tensión (voltio), campo eléctrico (voltio/metro)...

■ La energía de la perturbación es la integral de la potencia en toda la duración de esta perturbación (en julios).

Caso de una señal de radio



Caso del efecto indirecto de la descarga de un rayo

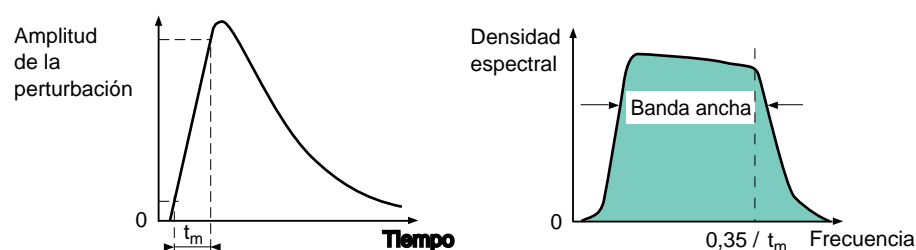


Fig. 5: Ejemplo de características espectrales de perturbaciones.

2.2 Un ejemplo de fuentes permanentes de perturbaciones por conducción en electrónica de potencia

En electrónica de potencia, las fuentes de perturbaciones son principalmente transitorios de tensión, y más raramente, de corriente. La tensión puede variar en unas cuantas centenas de voltios en unas decenas de nanosegundo, lo que representa una dV/dt superior a 10^9 V/s . Es un ejemplo de esto la técnica de generación de una onda senoidal a partir de una tensión continua mediante la modulación de ancho de impulso (PWM) (figura 6) en la que se presentan variaciones de tensión entre 0 y U_{cc} (660 V en trifásica-rectificada) de tiempos muy cortos, de algunos nanosegundos a microsegundos, según las tecnologías.

Estas variaciones bruscas de tensión producen diversos fenómenos perturbadores, de los que el más molesto es la circulación de corriente a través de todas las capacidades

parasitarias. La corriente, en modo común, de esta capacidad parásita C_p , es $I_{MC} = C_p \cdot dV/dt$. Por tanto, los valores de frentes antes citados sobre una capacidad parásita de 100 pF, son suficientes para producir corrientes de bastantes centenas de mA. Esta corriente perturbadora circula por el conductor de referencia de tensión de los aparatos electrónicos (circuito 0 V) y puede modificar la información (de datos o de programas) superponiéndose a sus débiles señales, y hasta perjudicar a otros equipos al ser reinyectada a la red de distribución pública.

Este tipo de fenómenos se podrían tratar y por tanto controlar la CEM, haciendo más lenta la subida de tensión. Pero una solución como ésta, conlleva un sensible aumento de las pérdidas por conmutación en los transistores, lo que no sería muy favorable desde el punto de

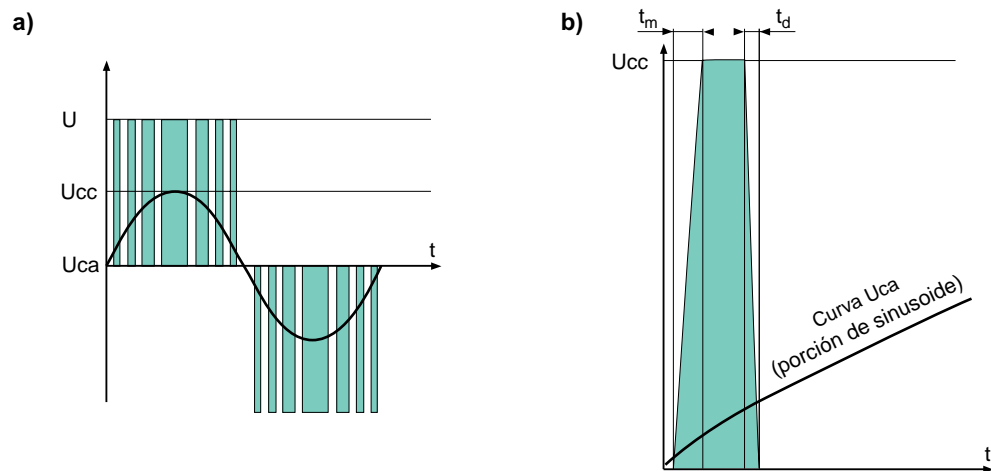


Fig. 6: Una fuente de perturbaciones en los equipos de electrónica de potencia con generación de la senoide por modulación de ancho de impulso (PMW):

a: principio,

b: un impulso muy ampliado (la escala ampliada es la de tiempo t), la porción de senoide está desproporcionada ya que, en realidad, ocupa 20 ms; $t_m \approx 2$ a $3 t_d$ (de 10 ns a 1 μ s).

vista de las sobrecargas térmicas. Otra forma eficaz de reducir estas corrientes es aumentar la impedancia de tipo común (entre estructuras y masa). Así por ejemplo, para el montaje de los compuestos electrónicos de potencia, se utilizan normalmente dos soluciones:

- o dejar flotantes (sin unión eléctrica) los radiadores de refrigeración de los componentes (**figura 7**), cuando las reglas de seguridad de personas lo permiten,
- o disminuir la capacidad parasitaria entre el componente y el radiador, con el uso de un aislante con una capa de dieléctrico muy delgada (**figura 8**).

Todas estas precauciones son las que distinguen un convertidor contaminante de un convertidor que reinyecta el menor número posible de perturbaciones en la red.

Cabe señalar que la electrónica de baja corriente (control y mando) de un convertidor debe de estar, y lo está, protegida contra las perturbaciones generadas por sus propios circuitos de potencia.

Para limitar de una manera eficaz y económica la emisión por conducción se necesita comprender y dominar el fenómeno en la «fuente». Existen otras fuentes de perturbación por conducción que se dan con menos frecuencia, como la del rayo o las subidas de tensión de maniobra, capaces de generar unas dV/dt y dI/dt importantes. Estas perturbaciones generan también campos radiados.

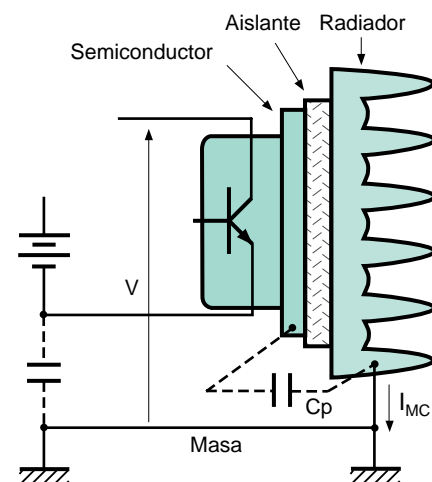


Fig. 7: La capacidad parasitaria de un radiador de refrigeración de componentes electrónicos, un elemento tomado en cuenta en el diseño de las «ramas de un ondulator».

Arandela aislante cápsula TO3	Grosor (mm)	Capacidad parásita (pF)
Mica	0,1	160
Plástico	0,2	95
Aluminio	2	22

Fig. 8: Capacidades parasitarias típicas de los principales aislantes usados para el montaje de los componentes electrónicos.

2.3 Un ejemplo de fuentes de perturbación por radiación: el cierre de aparamenta en las centrales MT y MAT

Alrededor de los centros de transformación de MT y AT pueden aparecer campos electromagnéticos impulsionales muy intensos.

Ciertas maniobras de la aparamenta generan variaciones de tensión muy superiores a las nominales y en tiempos muy cortos. Por ejemplo, al cerrar un interruptor de 24 kV los chisporroteos de precebado hacen variar la tensión en algunas decenas de kV en unos pocos nanosegundos (10^{-9}).

Las medidas efectuadas en los laboratorios Schneider han puesto de manifiesto que a un metro de una celda MT de 24 kV, durante la maniobra, los campos impulsionales sinusoidales amortiguados alcanzan un valor de cresta de 7,7 kV/m y una frecuencia de 80 MHz. (Estos valores de campo son extremadamente importantes. A título comparativo, un aparato portátil emisor de ondas de radio de 1 W, por ejemplo un walkie-talkie, genera, a un metro de su antena, campos del orden de 3 a 5 V/m). Aquellas variaciones se propagan por los conductores, juegos de barras, cables y líneas aéreas. Teniendo en cuenta las frecuencias en juego, dicho de otra forma, la rapidez del fenómeno, las estructuras conductoras (juegos de barras) se convierten en verdaderas antenas y las

características de los campos electromagnéticos que generan dependen en gran medida del entorno físico, especialmente de las envolventes metálicas (tabiques, celdas).

En los centros de transformación blindados de muy alta tensión, los campos electromagnéticos son particularmente importantes. Las envolventes metálicas blindadas aisladas con SF₆ tienen una estructura coaxial y presentan una impedancia característica constante. Cuando se producen variaciones bruscas de tensión, en el interior de las envolventes metálicas tubulares se crean fenómenos de ondas estacionarias, que se deben a reflexiones sobre elementos que representan cambios bruscos de impedancia, por ejemplo, los aisladores pasamuros de salida de la celda. La amplitud y la duración del fenómeno se ven así aumentadas.

El entorno electromagnético que hay entre la MT y la MAT exige, pues, estudios avanzados de compatibilidad electromagnética para el desarrollo, la instalación de relés y de dispositivos de control y mando. Tanto más cuanto que estas perturbaciones por radiación no son las únicas que generan centros de transformación sino que también son fuente de los transitorios conducidos de tensión citados al principio de este párrafo (figura 9).



Fig. 9: SEPAM y unidad de control de Masterpact; aparatos de protección de MT y BT, de control y mando, con elementos electrónicos digitales, desarrollados por Schneider Electric y diseñados teniendo en cuenta los estudios de la CEM.

3 El acoplamiento

3.1 Diferentes tipos de acoplamiento que existen

Se entiende aquí por acoplamiento el enlace, el paso o transmisión de perturbaciones electromagnéticas de la fuente a la víctima.

El acoplamiento se caracteriza por un coeficiente k_f , llamado de acoplamiento, expresado en dB (-75 dB, por ejemplo), y que puede definirse como la eficacia de la transmisión de una perturbación de la fuente a la víctima potencial [$k = 20 \log (A_{\text{recibida}}/A_{\text{transmitida}})$], siendo A la amplitud de la perturbación.

Para conocer la CEM es importante definir este coeficiente, ya que, cuanto más pequeño es (y por tanto mayor es su valor absoluto en decibelios), menor es la perturbación que realmente sufre la víctima potencial y mejor es la CEM.

Clásicamente se distinguen tres tipos de acoplamiento:

- el acoplamiento de campo a cable, en modo común o diferencial,
- el acoplamiento por impedancia común,
- el acoplamiento de cable a cable en modo diferencial o diafonía.

3.2 El acoplamiento campo a cable, en modo común o diferencial

Un campo electromagnético se puede acoplar a cualquier estructura filamentososa, por tanto a todos los cables, y generar, en estas estructuras, tensiones ya sea de tipo común (respecto a masa), ya sea de tipo diferencial (entre hilos), o las dos. Estos acoplamientos

se denominan campo a cable; es el efecto de antena (captadora) de los cables, de las pistas de circuitos impresos, etc.

- Los acoplamientos en modo común son los que captan perturbaciones de tensión o de corriente en modo común.

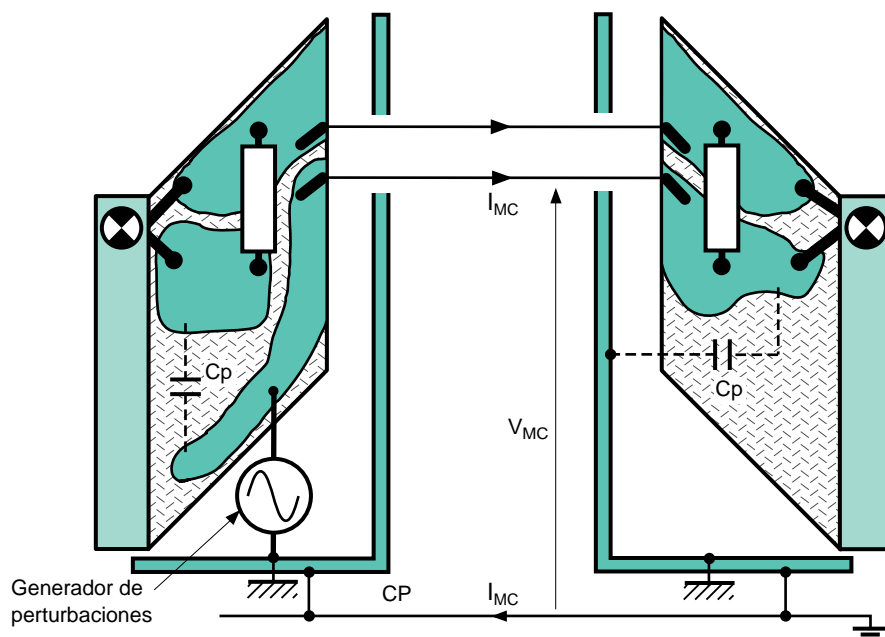


Fig. 10: Tensión y corriente de modo común entre dos relés de una caja de aparatura BT de una celda MT.

Una tensión conducida en modo común (V_{MC}) es una tensión que se aplica al conjunto de los conductores activos. Esta tensión se referencia respecto a masa o respecto a tierra (caso habitual en electrotecnia): así los ensayos de aislamiento en modo común de los interruptores automáticos BT se hacen entre todas las fases conectadas y tierra.

Una corriente en modo común (I_{MC}) es una corriente que recorre todos los conductores activos en el mismo sentido (figura 10). La corriente inducida por la caída de un rayo sobre una línea de BT es una corriente en modo común.

■ Los acoplamientos en modo diferencial implican tensiones o corrientes en el sentido clásico de la palabra, por ejemplo entre las dos fases de un interruptor automático o entre los dos hilos que conducen una señal de medida a un elemento electrónico.

Las ecuaciones que rigen el acoplamiento entre un campo electromagnético (de una impedancia de una onda cualquiera) y una estructura filamentososa (que también puede ser de cualquier forma) son muy complicadas.

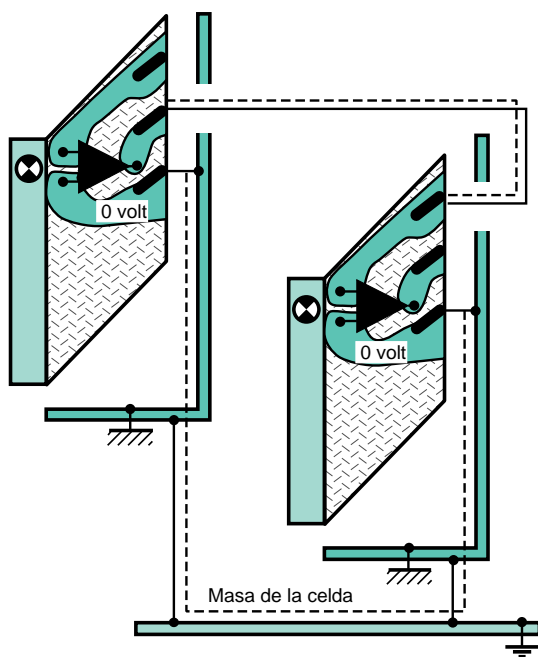


Fig. 12: Ejemplo de bucle de masa en la caja de un equipo de aparcamiento BT de una celda MT.

En la mayor parte de los casos, no se pueden resolver ni de manera analítica, ni incluso con cálculo informático-digital.

Sin embargo uno de estos acoplamientos, simple y de los más frecuentes, se puede expresar de forma analítica, si se trata de un acoplamiento entre el componente magnético de un campo electromagnético y un bucle de superficie S formada por conductores (figura 11).

La componente magnética H del campo induce en serie en el bucle una tensión igual a:

$$e = \mu_0 S \, dH/dt,$$

donde μ_0 = la permeabilidad del vacío ($4 \pi 10^{-7} \text{ H/m}$).

Así, por ejemplo, en un centro de transformación MT, en un bucle (de un hilo o de un cable) de 100 cm^2 situado a 1 m de una celda (figura 12), sometido a un campo impulsional de $5,5 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{m}$ (valor medido en un laboratorio), se inducirá una tensión transitoria en serie, igual a 15 V .

Esta ley se considera como válida si el lado mayor del bucle no sobrepasa una décima de la longitud de onda de la perturbación.

Recordemos que un bucle de este tipo (figura 12) se crea fácilmente, por ejemplo, en la «caja de relés» con los cables verde-amarillo cuando están conectados en estrella a la masa.

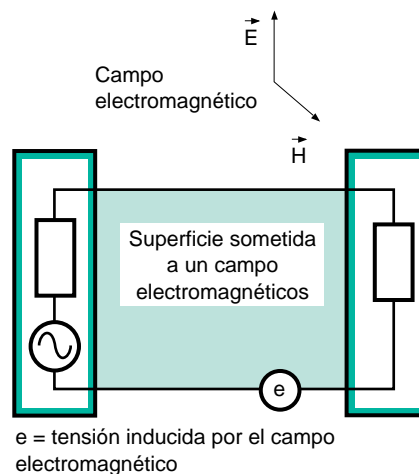


Fig. 11: Un ejemplo de acoplamiento campo a cable de tipo diferencial.

3.3 El acoplamiento por impedancia común

Como su propio nombre indica, el acoplamiento por impedancia común es el resultado de la presencia de una impedancia común a dos o varios circuitos. Esta impedancia común puede ser el conjunto de masa, la red de tierra, la red de distribución de energía, el conductor de retorno de gran parte de las señales en un mismo conjunto de baja corriente, etc.

Veamos un ejemplo (figura 13) que nos permita comprender la gran importancia de este tipo de acoplamiento: una corriente perturbadora en un circuito A de una decena de mA es suficiente para crear en un circuito B tensiones perturbadoras de varios voltios. El circuito de medida debería tener como referencia el punto M y no el punto A. Esto seguramente puede ser perjudicial en los aparatos electrónicos con circuitos integrados que trabajan con tensiones del mismo orden de magnitud.

En este ejemplo, la impedancia común puede ser los pocos metros de un cable común entre los dos circuitos A y B.

La perturbación tiene, entonces, un valor U_c , donde $U_c = I_a Z_c$, siendo:

- I_a : corriente perturbadora.
- Z_c : impedancia común (figura 14).

En baja frecuencia, es normal que el valor de la impedancia común sea extremadamente bajo. Para una red de tierra, por ejemplo, la seguridad obliga a usar unos valores mínimos de sección de los conductores de protección según el régimen de neutro. El valor de impedancia a 50 Hz entre dos puntos de la red de masa es siempre muy inferior a 1Ω .

Pero lo que aquí nos importa es considerar el valor de esta misma impedancia en las frecuencias características de los fenómenos de perturbación descritos anteriormente. En estos casos el valor de esta impedancia toma unos valores mucho más importantes, algunos k Ω e incluso más (anexo 1).

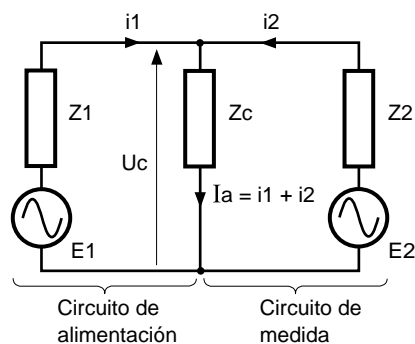


Fig. 14: Esquema de impedancia común.

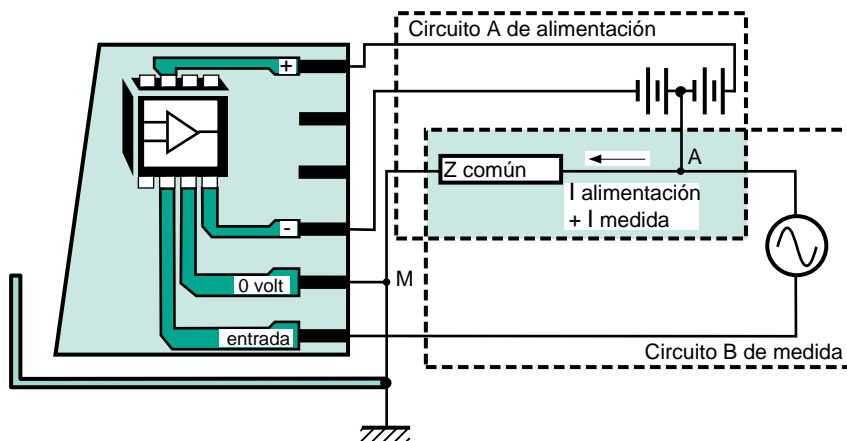


Fig. 13: Las medidas efectuadas por el amplificador operacional serán erróneas, ya que una corriente perturbadora en el circuito A (de alimentación) es suficiente para crear en el circuito B (de medida) tensiones perturbadoras.

3.4 El acoplamiento cable a cable en tipo diferencial o diafonía

La diafonía es un tipo de acoplamiento que se parece al acoplamiento campo a cable. Y se denomina diafonía capacitiva o diafonía inductiva según que su origen sea una variación de la tensión o una variación de la intensidad.

Una variación brusca de tensión entre un cable y un plano de masa o entre dos cables (figura 15) genera un campo que a corta distancia, con ciertas aproximaciones, puede considerarse como principalmente eléctrico. Este campo puede inducirse en otra estructura de hilos paralela. Es la diafonía capacitiva.

De la misma forma, una variación de corriente en un hilo o en un cable genera un campo electromagnético que, mediante las mismas aproximaciones, se puede considerar como puramente magnético. Este campo puede, entonces acoplarse formando un par e inducir una tensión perturbadora. Esto es la diafonía inductiva (figura 16).

De hecho, la diafonía capacitativa y la diafonía inductiva se dan desde que los conductores tienen un trazado paralelo y próximo. La diafonía puede presentarse en cualquier tubo o canaleta de cables, y más concretamente entre cables de potencia que transporten, en modo diferencial, perturbaciones HF, y los pares de hilos de una red que transporte señales digitales. Además, estas diafonías son tanto más importantes cuanto mayor sea la longitud de los cables que circulan paralelamente, cuanto menor es la separación de los cables o pares y cuanto más elevada sea la frecuencia de los fenómenos.

Por ejemplo, para la diafonía capacitiva y con las observaciones de la figura 15, el coeficiente de acoplamiento, en tensión, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{j 2 \pi f \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \right]}{j 2 \pi f + \left[\frac{1}{R (C_{12} + C_{20})} \right]}$$

siendo:

- V_1 , tensión de la fuente,
- V_N , tensión perturbadora inducida por el acoplamiento,
- C_{12} , capacidad de transferencia entre los dos hilos, proporcional a su longitud y a un coeficiente aproximado igual a $\text{Log} [1+(h/e)^2]$ donde h es la separación de los dos hilos del par, y e la separación de los pares,

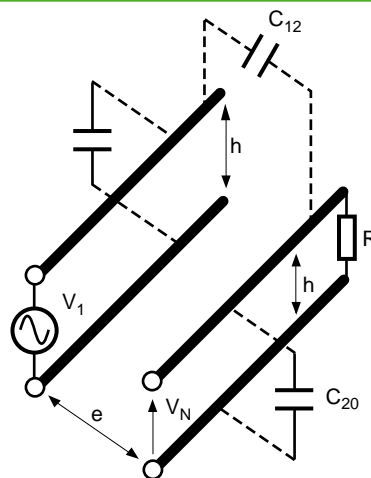


Fig. 15: Una variación brusca de tensión V_1 entre dos hilos genera un campo que, a corta distancia, se puede considerar como eléctrico, y puede inducir una tensión V_N en otro conjunto de hilos paralelo; este tipo de acoplamiento se llama diafonía capacitiva.

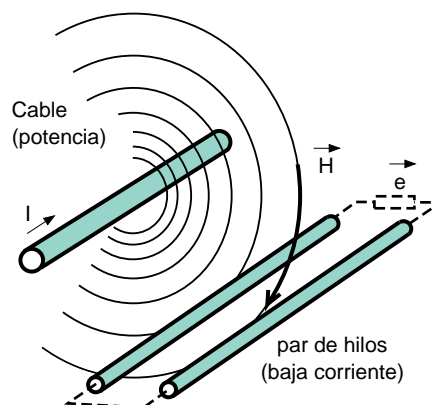


Fig. 16: Una variación de corriente en un cable genera un campo electromagnético que, a corta distancia, se puede considerar como puramente magnético y puede inducir, entonces, una tensión perturbadora en los cables que forman un bucle; este tipo de acoplamiento se llama diafonía inductiva.

- C_{20} , capacidad de fuga entre los dos hilos del par víctima,
- R , impedancia de carga del par víctima.

En esta fórmula el primer término del denominador puede obviarse generalmente con relación al segundo término. Por tanto, en una primera aproximación, se puede escribir que:

$$\left| \frac{V_N}{V_1} \right| \approx 2\pi f \frac{\left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \right]}{\left[\frac{1}{R(C_{12} + C_{20})} \right]}$$

$$= 2\pi f R C_{12}$$

$$= \omega R C_{12}$$

Para fijar los conceptos, consideremos dos pares de hilos discurrendo paralelamente durante 10 m, con $h = 1$ cm, $e = 2$ cm y $R = 1$ k Ω . El cálculo da, para una señal de 1 MHz, un coeficiente de acoplamiento de -22 dB, es decir:

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{1}{12}$$

En la realidad, los acoplamientos capacitivos e inductivos de este tipo se reducen considerablemente con el uso de pares retorcidos e incluso blindados.

4 La víctima

La víctima, en la trilogía fuente/acoplamiento/víctima, es cualquier material susceptible de ser perturbado.

Se trata generalmente de un equipo que tiene una parte electrónica y que presenta una

disfunción debido a la presencia de perturbaciones electromagnéticas generalmente de origen externo.

4.1 Los fallos de funcionamiento

Se clasifican en cuatro tipos:

- permanente y que se pueda medir,
- aleatorio y no repetitivo que aparece al mismo tiempo que las perturbaciones,
- aleatorio y no repetitivo que persiste después de la aparición de las perturbaciones,
- defecto permanente sufrido por el equipo (con destrucción de componente(s)).

Estos cuatro tipos caracterizan la duración de un fallo, pero no su gravedad.

La gravedad de un fallo es un criterio que depende de la funcionalidad, de lo crítico que sea cada equipo.

Ciertos fallos, como puede ser una pérdida momentánea de visualización en un display, se pueden aceptar temporalmente; otros son inaceptables, por ejemplo el que un equipo de seguridad deje de actuar.

4.2 Algunas soluciones

Hay numerosas disposiciones constructivas que permiten obtener, a bajo coste, materiales que tienen una buena resistencia a las perturbaciones electromagnéticas. Estas precauciones están relacionadas con:

- el diseño de circuitos impresos (respecto a la separación funcional de circuitos, su trazado y forma de conexión),
- la elección de componentes electrónicos,
- la forma de estar hechas las carcasas o envoltentes,
- la interconexión de las masas,
- el cableado.

En la elección intervienen numerosos factores, y por eso la elección debe hacerse en la fase de estudio para evitar sobrecostes que siempre son importantes en el caso de la modificación en el diseño una vez puesto en marcha el proyecto.

El tener en cuenta todas estas precauciones requiere un saber hacer que va más allá de la adición de filtros y blindajes, solución que a veces se defiende como válida para «endurecer» un equipo recién acabado y cuya eficiencia frente a la CEM no siempre se ha tenido en cuenta a tiempo.

El diseño de circuitos impresos

En el diseño de tarjetas se tiene que respetar un cierto número de reglas. Estas reglas se refieren a la distribución funcional y al trazado de pistas.

Desde que se diseña la ubicación de los componentes ya es posible reducir los acoplamientos entre unos y otros debidos a su proximidad; por ejemplo, el reagrupar elementos que pertenecen a la misma categoría de circuito (digitales - analógicos - de potencia), según su susceptibilidad, reduce las interferencias.

Por otra parte, el trazado de las pistas sobre un circuito impreso tiene una incidencia importante sobre la susceptibilidad de una tarjeta: el mismo esquema eléctrico, implantado de diferentes maneras tendrá una inmunidad a las perturbaciones que podrá variar con un factor de uno a unas cuantas decenas. Por ejemplo, un trazado de circuitos «a la inglesa» (figura 17), quitando el mínimo de cobre, reduce su radiación y sensibilidad.

La elección de componentes electrónicos

Numerosos componentes permiten asegurar una protección eficaz contra las perturbaciones por conducción. La elección de estos componentes depende de la potencia de los circuitos que se tienen que proteger (alimentación, control y mando,...), y del tipo de perturbaciones. Así, contra las perturbaciones en modo común en un circuito de potencia se usará un transformador si éstas son de baja frecuencia (< 1 kHz), pero será preferible un filtro para las altas frecuencias.

La tabla de la figura 18 da una lista, no exhaustiva, de los componentes de protección. No todos son equivalentes: un filtro no protege de las sobretensiones, y un limitador de sobretensión no elimina las perturbaciones AF.

Cajas y envoltentes conductoras

Colocar una envoltente conductora (blindaje) alrededor de equipos sensibles es una manera de protegerlos contra los campos electromagnéticos.

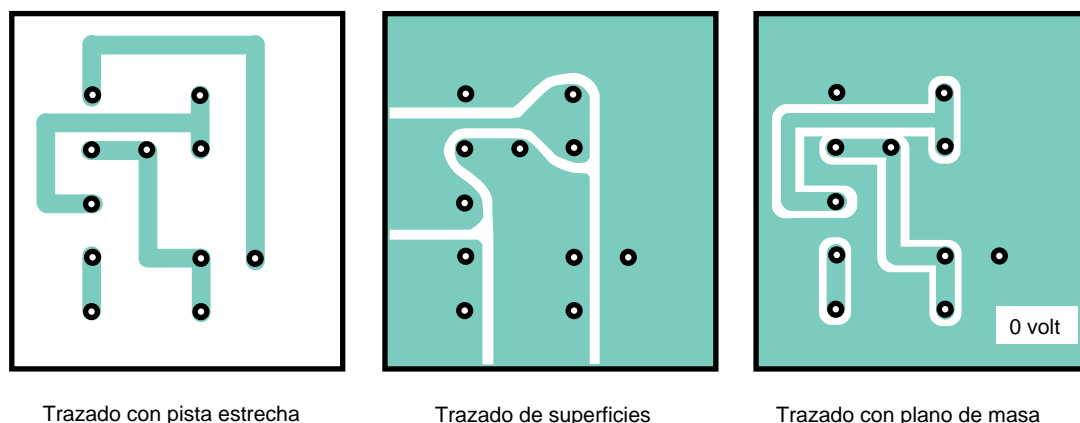


Fig. 17: El trazado de circuitos puede reducir la susceptibilidad de una tarjeta, ya sea para minimizar impedancias (trazado a la inglesa), ya sea para reducir acoplamientos debidos al campo electromagnético (trazado con plano de masa).

Tipos	Ejemplos	Aplicaciones
Limitadores de sobretensión	Chispómetro, pararrayos, limitadores de sobretensión,	Instalación, alimentación, control y mando
	Varistancia, diodo zener	Circuitos electrónicos
Componentes para filtraje	Transformador, inductancia, condensador, filtros	Alimentación, control y mando (instalación y circuitos electrónicos)
Componentes para blindaje	Mallas, plano de masa, cable blindado, juntas para AF dedo de contacto	Transmisión de información (armarios en lugares con perturbaciones y parásitos)

Fig. 18: Lista de componentes de protección.

Para que el blindaje sea eficaz, el grosor del material conductor usado debe sobrepasar el valor de absorción a las frecuencias perturbadoras consideradas (figura 19). Ante una perturbación de una frecuencia muy alta o ante un campo eléctrico, se puede utilizar con eficacia un barniz conductor. Pero sólo un revestimiento hecho con un material de gran permeabilidad permite detener los campos magnéticos en BF.

La interconexión de masas

En este campo, la continuidad eléctrica entre las diversas partes de la caja es extremadamente importante. Su conexión debe de hacerse con cuidado protegiendo, por ejemplo, las zonas de contacto de cualquier depósito de pintura, pero también usando trenzas anchas y cortas (para reducir al máximo la impedancia).

El cableado

Igual importancia tiene el blindaje de cables, a veces llamado pantalla, que es una extensión de la envolvente conductora que se ha hecho alrededor del equipo sensible. Este blindaje del cableado ha de estar conectado a la masa de la envolvente de la forma más corta posible. Además debería envolver a los cables completamente en todo su perímetro, para la protección contra las perturbaciones de alta frecuencia.

Como en los acoplamientos de campos electromagnéticos con una estructura de hilo (capítulo 3), la teoría sobre el blindaje de

cables es muy compleja y es difícil abordarla en este documento. En la bibliografía citamos algunas obras de referencia.

Teniendo en cuenta todas estas reglas de diseño y de fabricación se llega a conseguir que el producto o el sistema sea inmune a las perturbaciones electromagnéticas de forma suficiente y considerando el medio en el que está situado.

Sin embargo, esta inmunidad no se puede validar más que de forma experimental mediante medidas que permiten cuantificar la eficacia de las diferentes situaciones. Así, por ejemplo, en Merlin Gerin, las diferentes maquetas de los proyectos de relés electrónicos de los interruptores automáticos se someten a un conjunto de ensayos muy estrictos, representativos de las peores perturbaciones a las que pueden verse sometidos estos relés.

El objetivo final de estos ensayos es el de verificar que el relé no dispara intempestivamente, que el interruptor automático abre adecuadamente y que, cuando ha de actuar, lo hace en el tiempo exigido.

Las normas «productos» ya incorporan estas exigencias; es el caso, por ejemplo de las normas:

- CEI 947-2, que se refiere a los interruptores automáticos industriales,
- CEI 1131-2, que se refiere a los autómatas programables.

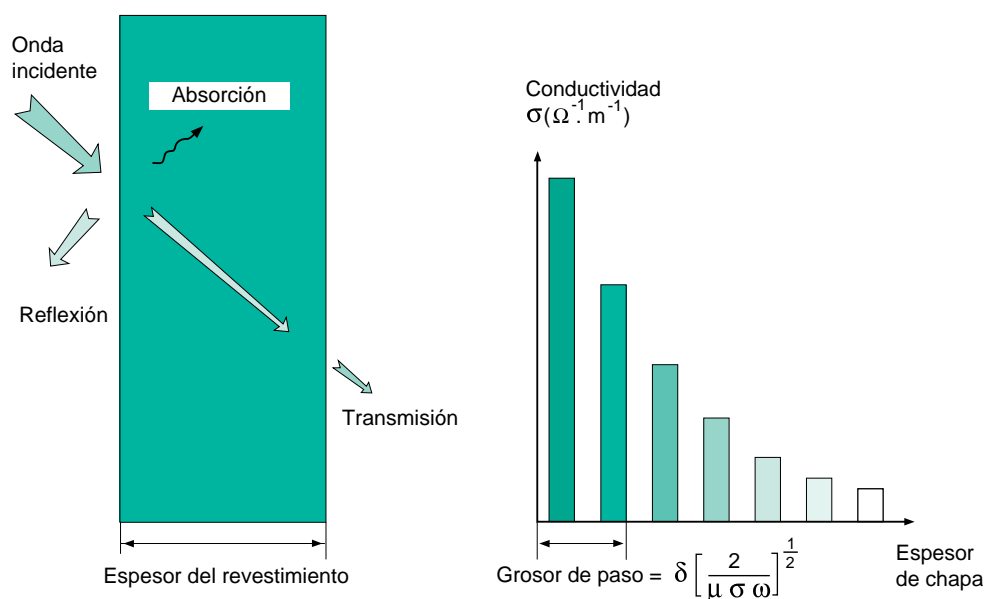


Fig. 19: Fenómeno pantalla de un revestimiento metálico.

5 La instalación

5.1 La instalación es una variable importante en la CEM global de un sistema

Como prueba tenemos la norma NF C 15-100, norma general de instalación en BT, que dedica un apartado completo, el apartado 33, a la compatibilidad electromagnética.

Los dos capítulos anteriores demuestran la importancia que puede tener la forma de instalar en los fenómenos de la CEM, tanto en el diseño como en su instalación.

5.2 El diseño de la instalación

En los estudios y en la implantación de la CEM pueden influir especialmente dos factores: la elección de los materiales y su disposición relativas (**figura 20**).

El primer factor está relacionado a la vez con la selección de las fuentes y de las víctimas: un aparato escogido para una función dada puede ser más o menos generador de perturbaciones y/o susceptible de sufrirlas.

Por ejemplo, si dos aparatos han de funcionar próximos el uno del otro, deberán:

- o bien asociar una fuente poco perturbadora y una víctima «ordinaria» (medianamente sensible),

- o bien, al contrario, asociar una fuente «ordinaria» (medianamente perturbadora) y una víctima poco sensible,

- o al menos satisfacer un compromiso entre los dos extremos.

Y el segundo factor, que depende directamente del primero, consiste en colocar los componentes, ya escogidos y definidos, según sus características relativas para satisfacer las necesidades de la CEM.

Es fácil comprender que la selección debe de tener en cuenta tanto el coste de los materiales como el de su instalación.

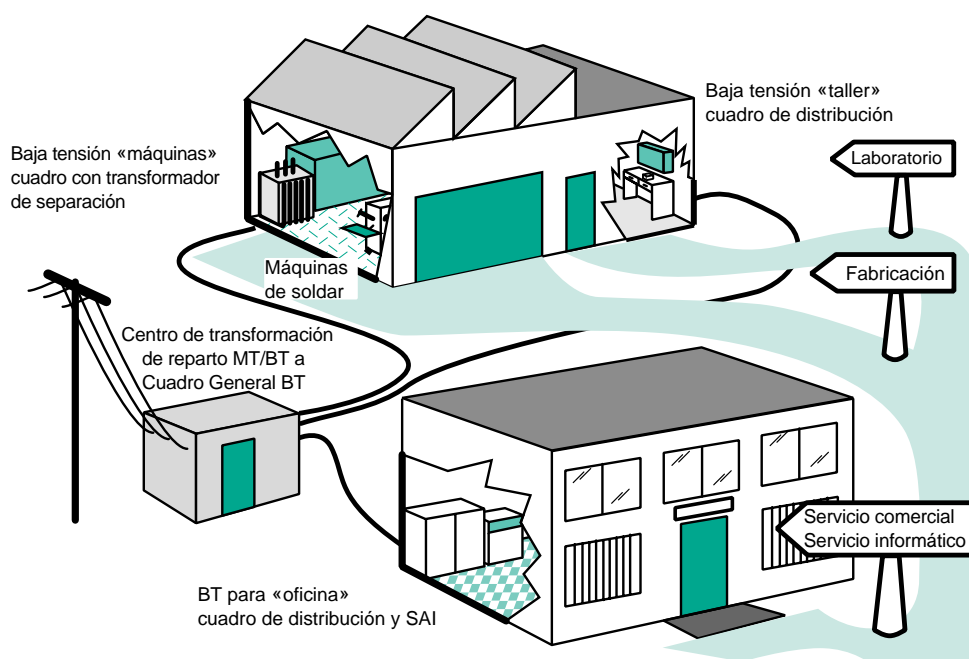


Fig. 20: Ejemplo de implantación de equipamiento eléctrico teniendo en cuenta la CEM.

5.3 El montaje de la instalación

El montaje de los diferentes elementos, tanto de una instalación eléctrica como de un equipo electrónico, obedece a los principios ya enunciados en los apartados precedentes. En la práctica, para satisfacer los objetivos de la CEM, habrá que estudiar y reducir todos estos tipos de acoplamiento que pueden coexistir simultáneamente.

Y para esto se tendrán que utilizar diferentes soluciones o técnicas:

- la disposición en forma de malla de los circuitos y de las redes de masas y de tierra,
- la separación eléctrica de circuitos,
- un cableado bien pensado.

5.4 Ejemplos prácticos

Disposición en forma de malla de los circuitos y redes de masas y de tierra

Hoy en día, los equipos son sensibles señales de muy poca energía, además contienen elementos electrónicos sensibles a las altas frecuencias y están conectados entre sí. Los acoplamientos por impedancia común pueden ser, por tanto, frecuentes. Para evitarlo, es indispensable montar una red de tierra tan equipotencial como sea posible, más concretamente, en forma de malla.

Esta solución es una de las primeras protecciones que se ha de usar contra las perturbaciones. Así, en la red de una fábrica, todos los cables de protección (CP) se han de unir a las estructuras metálicas existentes, como lo que prescribe la NF C 15-100 (figura 21).

Del mismo modo, en un equipo, todas las masas y las carcasas de la aparatura se han de unir de la forma más corta posible con conexiones (hilos o trenzas) de baja impedancia en AF, anchos y cortos, a una red de masa en forma de malla.

El cableado de un armario eléctrico es un ejemplo típico: todas las masas se han de interconectar.

Respecto a este tema hay que señalar un cambio: el principio de masas unidas en estrella, a veces utilizada en los equipos electrónicos analógicos sensibles al «rizado de alterna de 50 Hz», ha sido actualmente abandonado a favor de las redes en forma de malla mucho más eficaces contra las perturbaciones que pueden afectar a los dispositivos digitales actuales, relés de protección y sistemas de control y mando.

La separación eléctrica de circuitos

Esta técnica consiste en separar las fuentes de energía (habitualmente de 50 ó 60 Hz). Su objeto es evitar que un equipo sensible sufra las perturbaciones conducidas generadas por otros equipos conectados a la misma fuente de alimentación. Su principio es que un equipo sensible y un equipo perturbador tengan dos alimentaciones separadas por impedancias importantes a las frecuencias perturbadoras.

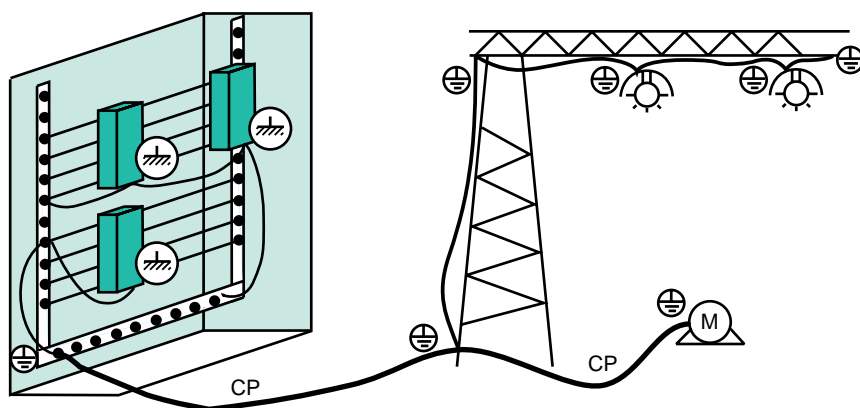


Fig. 21: Los trazados en forma de malla de circuitos y las redes de masas y de tierra se confunden muy a menudo en los armarios eléctricos.

Los transformadores (y no los autotransformadores) son separadores eficaces, particularmente para las bajas frecuencias: transformadores MT/BT, transformadores de aislamiento y todos los transformadores de entrada a los aparatos electrónicos actúan como limitadores de la propagación de perturbaciones por conducción.

A veces, es necesario implantar un filtro separador para eliminar las perturbaciones AF. Además, si el equipo sensible necesita una alimentación de emergencia en caso de falta de red, puede alimentarse con un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), si este SAI tiene el o los transformadores de aislamiento necesarios.

Un cableado bien pensado

Además, los tres mecanismos de acoplamiento descritos anteriormente estarán dentro de límites tolerables si el trazado del cableado se realiza según las siguientes reglas:

- No todos los circuitos se pueden separar los unos de los otros por razones económicas evidentes: los cables se deben reagrupar por categorías. El trazado de las diferentes categorías estará físicamente separado: en particular se agruparán los cables de potencia por un lado y los cables de bajo nivel (telefonía, control y mando...) por el otro.

Si el número de canaletas, bandejas de cables o regatas lo permiten, los cables de potencia, de intensidad que sobrepasa algunos amperios a 230 V, y los cableados de bajo nivel estarán en bandejas separadas. Si no, se ha de respetar una distancia mínima entre las dos categorías, del orden de una veintena de centímetros (**figura 22**). Entre estos dos grupos de cables se evitará cuidadosamente cualquier elemento común.

Los circuitos de señal o de información (de baja intensidad) tendrán, siempre que se pueda, su propio cable de retorno (0 voltios) para evitar los acoplamientos por impedancia

común. Concretamente, la mayor parte de sistemas de comunicación por bus necesitan un par de hilos estricta y exclusivamente reservado al intercambio de informaciones.

- En todos los casos, la superficie global de cualquier bucle, es decir, la distancia entre un conductor y su retorno, debe ser mínima. Para la transmisión de datos, el retorcido de líneas permite disminuir la susceptibilidad de los acoplamientos de tipo diferencial. El empleo de pares retorcidos es preferible al de un par paralelo simple.

- Los cables de medida y de transmisión de informaciones a bajo nivel, deben de tener, a ser posible, pantalla y, salvo deseo expreso del proveedor, esta pantalla estará unida a masa en el máximo número posible de puntos.

- Las canaletas que hacen de soporte de la conducción de cables deben ser, en la medida de lo posible, metálicas. Estas canaletas han de estar interconectadas entre ellas con un buen contacto eléctrico, con tornillos, por ejemplo, e interconectadas con la red de malla de masa.

- Los cables más sensibles, los de medida, por ejemplo, se ponen en un ángulo lateral, de manera que se beneficien de una mayor protección contra las radiaciones electromagnéticas. Su pantalla, si existe, estará conectada frecuentemente a la canaleta metálica.

Es muy aconsejable el uso de canalizaciones prefabricadas en las que los cables están ya colocados y conectados; tal es el sistema Canalis, de la marca Télémécanique, con cable de control remoto incorporado.

Todas estas precauciones de cableado, muy eficaces en la prevención de problemas de la CEM, representan un pequeño coste adicional en la fase de diseño de la instalación, pero las modificaciones en una instalación que ya existe con acoplamientos electromagnéticos muy fuertes, tienen un coste mucho mayor.

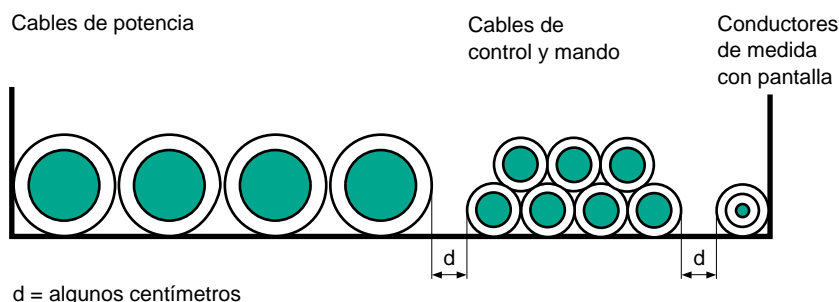


Fig. 22: Un ejemplo de conducción de cables.

6 Normas, medios de ensayo y ensayos

6.1 Las normas

Desde hace mucho tiempo, los textos de las normas recogen la compatibilidad electromagnética de los materiales.

El Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas (CISPR) editó los primeros reglamentos. Estos reglamentos limitaron sobre todo el poder emisor de diversos aparatos, principalmente para proteger la transmisión y la recepción de las ondas de radio.

Los comités nacionales, la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) dictaron los textos normativos que cubrían el conjunto de la CEM, emisión e inmunidad, en el ámbito civil.

Los textos normativos militares sobre la CEM están recogidos en la GAM EG 13 por lo que se refiere a Francia, y en las normas MIL-STD para los Estados Unidos.

El gran desarrollo de la compatibilidad electromagnética y la llegada de Europa han modificado el paisaje normativo civil.

Sobre este tema el Consejo de las Comunidades Europeas publicó en mayo de 1989 una Directiva Europea con la referencia 89/336/CEE. En ella se trata el acercamiento de las legislaciones de los Estados miembros, que se refieren a la compatibilidad electromagnética.

En Francia, su aplicación se hizo obligatoria por el Decreto núm. 92.587.

La Directiva Europea se preocupa no solamente de limitar las perturbaciones en la emisión, sino también la inmunidad o resistencia mínima a las perturbaciones electromagnéticas. Así, esta Directiva hace referencia a normas que definen los niveles perturbadores máximos.

El Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) ha creado comités técnicos. Éstos han reunido las normas existentes relacionadas con la aplicación de la directiva y han reeditado las que hacía falta.

Los trabajos del TC 210 se basan en las prácticas en el terreno industrial.

Durante un tiempo, para realizar las mediciones de emisión han servido de referencia las normas alemanas VDE 871 y VDE 875.

Actualmente se imponen los textos normativos europeos recientes EN 55011, EN 55022. La norma CEI 61000 (antiguamente CEI 1000) es la referencia que se refiere a la CEM y está formada por diversas partes:

- 61000-1: Aplicación - definiciones.
- 61000-2: Entorno - niveles de compatibilidad.
- 61000-3: Límite de las perturbaciones.
- 61000-4: Técnicas de ensayo y de medida.
- 61000-5: Guías de instalación y de atenuación.
- 61000-6: Normas genéricas.

La parte 4 tiene numerosas secciones relacionadas con los ensayos de inmunidad, en particular:

- 1 - generalidades,
- 2 - descargas electrostáticas,
- 3 - campos de radiofrecuencia,
- 4 - transitorios eléctricos rápidos, en ráfaga,
- 5 - ondas de choque de rayos,
- 6 - perturbaciones por conducción > 9 kHz,
- 7 - armónicos,
- 8 - campos magnéticos 50 kHz,
- 9 - campos magnéticos impulsionales,
- 10 - campos magnéticos oscilatorios amortiguados,
- 11 - caídas de tensión, cortes breves y variaciones de tensión,
- 12 - ondas oscilatorias,
- 13 - armónicos e interarmónicos,
- etc.

Todas estas normas corresponden a las perturbaciones típicas del mundo de la electrotecnia moderna. Ampliamente aceptadas por la comunidad internacional, son éstas precisamente las que Schneider aplica a sus productos. En el apartado siguiente se presentan con más detalle los ensayos que corresponden a estos textos normativos.

6.2 Los medios de ensayos

Como ya hemos dicho, respetar los reglamentos implica realizar las medidas y los ensayos que definen las normas.

Desde hace mucho tiempo, Schneider Electric, por su propio objetivo, tiene una gran preocupación por la compatibilidad electromagnética. Ya en 1970 se utilizaban medios importantes, como una caja de Faraday. El centro de ensayos Schneider dispone de dos laboratorios CEM desde hace muchos años. Estos laboratorios son el medio indispensable para la capitalización y difusión de competencia. En ellos se prestan servicios a los clientes exteriores a la empresa.

En los laboratorios se hacen ensayos en todos los ámbitos de la CEM:

- descargas electrostáticas,
- inmunidad por conducción y por radiación,
- emisión por conducción y por radiación.

Como toda medida, las medidas de compatibilidad electromagnética se han de poder reproducir a la vez en el tiempo y en el espacio, es decir, que dos medidas

efectuadas en dos laboratorios diferentes han de dar un mismo resultado.

En esta disciplina, esto implica medios muy importantes, así como inversiones substanciales y un control de la calidad riguroso. El programa de calidad de los laboratorios CEM de Schneider se basa en los manuales Calidad y en un conjunto de procedimientos. Estos procedimientos afectan tanto al orden de las pruebas, y al conexionado de los patrones como a cada tipo de medida en sí misma. La lista de ensayos normativos que los laboratorios pueden realizar está en el **anexo 3**.

Concretando este programa de Calidad:

- el laboratorio de Grenoble está acreditado por el Comité Francés de Acreditación (COFRAC),
- el laboratorio de Nanterre está acreditado por la Asociación de Estaciones de Ensayos Franceses de Aparatos Eléctricos (ASEFA).

6.3 Los ensayos

Descargas electrostáticas

Estos ensayos están destinados a probar la inmunidad a las descargas electrostáticas de tarjetas, equipos y sistemas.

Las descargas electrostáticas son el resultado de cargas acumuladas por una persona, por ejemplo al andar por un suelo aislante. Cuando esta persona toca un material conductor unido por impedancia a la masa, se descarga bruscamente a través de él. Muchos estudios han demostrado que la forma de la onda depende de las características de la fuente y de los circuitos de descarga, pero también de otros parámetros, humedad relativa del aire (**figura 23**), velocidad de aproximación de un cuerpo cargado, en este caso la mano del hombre, etc.

Estos estudios han dado lugar a ensayos de descargas tipo. Se realizan con la ayuda de un generador («pistolet») que simula a un hombre, en unas condiciones determinadas (**figura 24**). Las descargas se aplican a todas las partes accesibles del aparato que se está probando, en su entorno inmediato, y se repiten tantas veces como sea necesario para poder garantizar una fiabilidad estadística.

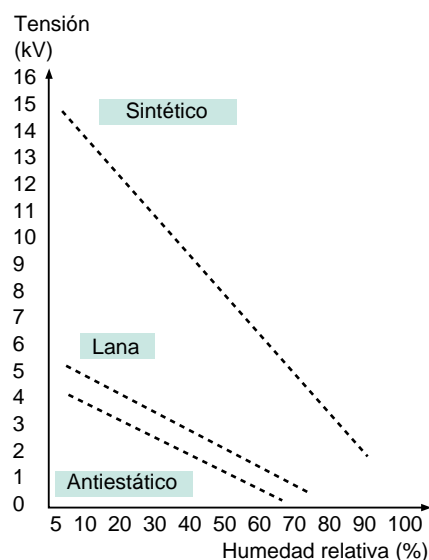


Fig. 23: Influencia de la humedad relativa del aire en la tensión de descarga electrostática en función del revestimiento del suelo.

Estas mediciones necesitan, pues, un banco de pruebas apropiado.

Todos estos ensayos están perfectamente definidos por la norma CEI 1000-4-2 con los niveles de severidad de la tabla de la **figura 25**.

Inmunidad por conducción

Estos ensayos permiten calificar la resistencia de un aparato a las perturbaciones conducidas por el cableado exterior al aparato (entradas, salidas y alimentación). Como ya hemos explicado anteriormente, estas perturbaciones son diferentes según la naturaleza y la instalación de los cables.

Las señales electromagnéticas o transitorias que se aplican en estos ensayos tienen valores típicos característicos (amplitud, forma de onda, frecuencia...).

Las medidas de perturbaciones hechas sobre numerosos lugares han permitido obtener principalmente tres ensayos tipo:

■ El primer ensayo, CEI 61000-4-4 es característico de perturbaciones inducidas por las maniobras de la aparamenta de mando.

Se refiere a transitorios eléctricos rápidos en ráfaga. Estas ráfagas se repiten a una frecuencia de 3 Hz. Cada ráfaga está formada por un centenar de transitorios espaciados de alrededor de 100 μ s. Cada transitorio tiene un frente de subida muy abrupto, 5 ns, con una amplitud de varios kV, variable siguiendo el grado de severidad exigido (**figuras 26 y 27**).

Todos los cables pueden ser sometidos a transitorios rápidos. Este tipo de perturbaciones se acoplan, en efecto, muy

Niveles de severidad según la norma	Tensión de ensayo en kV $\pm 10\%$	
	Descarga en el aire	Descarga con contacto
1	2	2
2	4	4
3	8	6
4	15	8

Fig. 25: Tensiones de descarga electrostática que deben de ser soportados por los componentes según la CEI 61000-4-2.

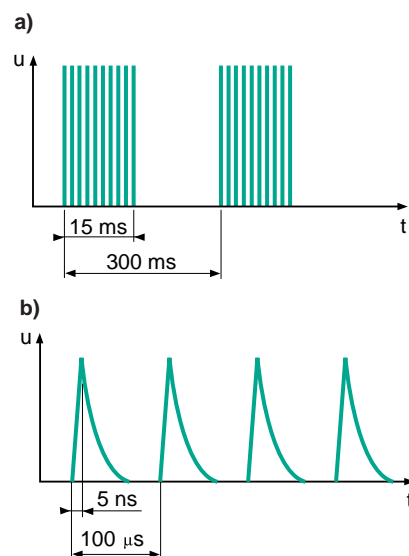


Fig. 26: (a) Apariencia de salvas de impulsos y (b) transitorios rápidos que las componen.

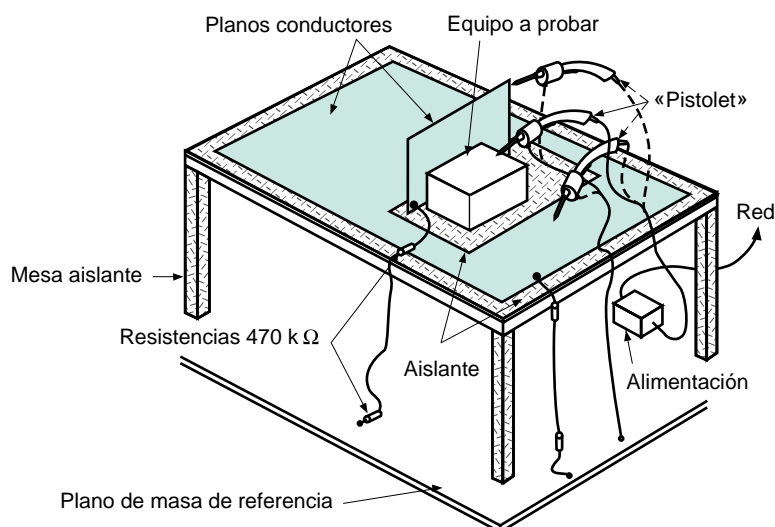


Fig. 24: Lugar de ensayo de descargas electrostáticas definido por la norma CEI 61000-4-2.

fácilmente, por ejemplo por diafonía (**apartado 3**, «El acoplamiento»), y basta con que un cable genere esta perturbación para que todos los de la misma canaleta o recorrido queden afectados.

El ensayo se hace, pues, en todos los cables: ensayo de perturbaciones en modo común sobre aquéllos en los que la perturbación es, a priori, inducida (en el conjunto los cables que no son de alimentación) y ensayos de perturbaciones en modo común y en modo diferencial en los cables conectados a la red. Las perturbaciones se inyectan en los cables a probar o por acoplamiento capacitivo directo en el caso de alimentaciones, o con la ayuda de una pinza de acoplamiento consistente en dos placas metálicas que rodean los cables secundarios (**figura 28**). El elemento probado no debe de presentar disfunciones durante un tiempo determinado (1 min).

Este ensayo es el más significativo de la inmunidad de un equipo, puesto que los transitorios rápidos son los más frecuentes.

■ El segundo ensayo que se hace es característico de los efectos secundarios del rayo. Es representativo de las perturbaciones por conducción que circulan por la red BT después de la caída de un rayo sobre una línea (norma CEI 61000-4-5).

Estas perturbaciones se caracterizan por una energía, traduciéndose también en:

□ ondas de tensión $1,2 \mu\text{s} - 50 \mu\text{s}$, si la impedancia que presenta el aparato testado es elevada; la amplitud puede llegar a algunos kV, véase la **figura 29**, para las tensiones de ensayo propuestas por la norma.

□ ondas de corriente $8 \mu\text{s} - 20 \mu\text{s}$, si la impedancia es baja; la amplitud puede llegar a varios kA.

El frente de subida de estas perturbaciones es mil veces más largo, alrededor de un microsegundos, que es el de los transitorios rápidos en ráfagas (**figura 26**). El acoplamiento de ensayo se realiza de forma capacitiva, en modo común y diferencial con los niveles apropiados. Su procedimiento es parecido al

Niveles de severidad según la norma	Tensión de ensayo aplicado ($\pm 10\%$) en kV sin alteración del funcionamiento (salida en circuito abierto)	
	Sobre el circuito de alimentación	Sobre la línea de entrada y de salida (de señal, datos y mando)
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
x	especial	especial

El nivel x es un nivel definido contractualmente entre un fabricante y su cliente.

Fig. 27: Tabla de los niveles de severidad definidos por la CEI 61000-4-4.



Fig. 28: Medida de inmunidad a los transitorios rápidos de una central Isis (test 61000-4-4) en una caja de Faraday. En esta foto se ven: el generador de perturbación manipulado por el operador, la maleta de madera que contiene la pinza de acoplamiento y la central Isis (a la derecha) enchufada a la red BatiBUS.

del ensayo con transitorios rápidos: el aparato no debe presentar ninguna disfunción.

■ El tercer ensayo que se hace siguiendo la norma CEI 61000-4-6 se basa en las prescripciones relativas a la inmunidad de los materiales a las perturbaciones AF en los cables, en el margen de 150 kHz a 80 MHz (y hasta 230 MHz).

Las fuentes de perturbación son campos electromagnéticos que pueden afectar a toda la extensión de los cables conectados a estos materiales e inducir en ellos tensiones y corrientes.

En el transcurso del ensayo, las perturbaciones se acoplan a los cables mediante Redes de Acoplamiento-Desacoplamiento (RAD), cuya impedancia en modo común, igual a 150Ω , representa la impedancia característica de la mayoría de los cables. Sin embargo, hay que resaltar que en el transcurso del ensayo, las perturbaciones se aplican a un solo cable, mientras que en realidad el campo electromagnético actúa sobre todos los cables conectados. Esto constituye una diferencia notable que no debe pasarse por alto. En efecto, esto haría el ensayo más complejo y excesivamente laborioso el acoplar la señales AF a todos los cables simultáneamente.

Cuando las RAD no están adaptadas, por ejemplo cuando la intensidad de la corriente es demasiado elevada, se utilizan pinzas de acoplamiento.

Las perturbaciones AF, propuestas por la norma CEI 61000-4-6 tienen valores de 1, 3 ó 10 V. Se modulan en amplitud al 80% por una onda sinusoidal de 1 kHz.

Antes del ensayo, la señal que se ha de inyectar para obtener un buen nivel de perturbación se calibra y se memoriza y después se aplica a los cables normalmente conectados al equipo que se está probando.

Inmunidad a la radiación

Los ensayos de inmunidad por radiación permiten garantizar el buen funcionamiento de los aparatos cuando estos están sometidos a campos electromagnéticos.

Puesto que estos ensayos son especialmente sensibles al entorno, son muy importantes los medios y las precauciones que se deben de tomar para hacer medidas fiables y reproducibles de inmunidad por radiación.

El medio ambiente ha de estar lo suficientemente limpio para no ser interferido por las ondas de cualquier tipo existentes, ya que (como ya hemos visto en el apartado «La fuente») los campos electromagnéticos de

varios V/m son frecuentes, como los generados por los walkie-talkie, y los campos impulsionales de amplitud más elevada todavía existen en el medio industrial. Estos ensayos, pues, se hacen en cajas de Faraday cuyas paredes están recubiertas de absorbentes de muy alta frecuencia. Estas cajas se califican de anecoicas cuando todas las paredes, suelo incluido, están recubiertas, y se llaman semianecoicas cuando el suelo no está recubierto.

En estas cajas, varias antenas generan señales según los tipos de campo, gamas de frecuencia y polarizaciones (figura 30). A estas antenas las alimenta un vobulador cuya señal pasa por un amplificador de potencia de banda ancha.

Niveles de severidad según la norma	Tensión de ensayo de salida con circuito abierto (kV)
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	especial

El nivel x es un nivel definido contractualmente entre un fabricante y su cliente.

Fig. 29: Niveles en función de las severidades definidas por la norma CEI 61000-4-5.



Fig. 30: La caja de Faraday semianecoica y algunas antenas de un laboratorio CEM de Schneider Electric.

Los campos generados se calibran con la ayuda de captadores isotrópicos de banda ancha: el esquema de la **figura 31** presenta una disposición típica para las pruebas.

Las normas precisan los límites de perturbaciones aceptables, de esta manera, la norma CEI 61000-4-3 establece ensayos en la banda de frecuencias 80 MHz - 1 000 MHz en tres niveles de severidad (1, 3 y 10 V/m).

A título indicativo, las condiciones de las pruebas que se pueden hacer en los laboratorios Schneider son mucho más rigurosas: la gama de frecuencias cubierta se extiende de 10 kHz a 2 GHz; además, los aparatos se pueden probar con campos que alcanzan los 30 V/m modulados al 80%. Por lo que se refiere a la inmunidad en el seno de un

campo eléctrico impulsional, como los que se observan en las proximidades de instalaciones AT, no existen todavía medidas normalizadas.

En este terreno, los equipos Schneider se prueban con procedimientos internos.

Emisión por conducción

Las medidas de emisión por conducción miden el nivel de las perturbaciones reinyectadas por el aparato probado sobre todos los cables conectados a él. Puesto que en este test el aparato bajo prueba se considera generador, el nivel de las perturbaciones depende estrechamente de la carga de alta frecuencia que se conecte a los cables (**figura 32**).

Para efectuar medidas reproducibles y, en particular, para evitar los problemas

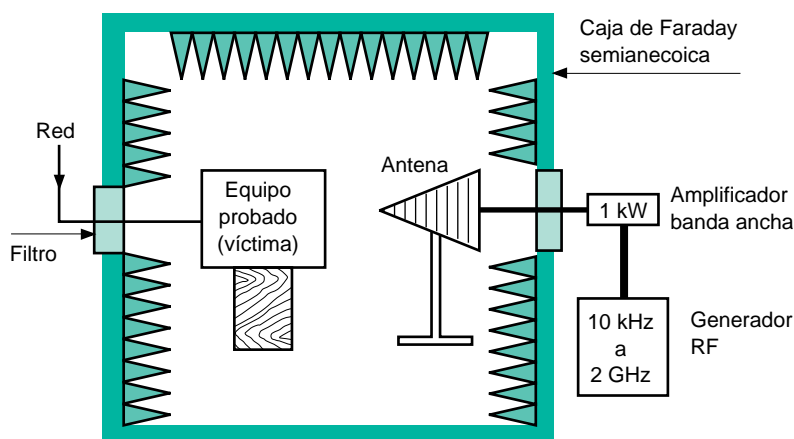


Fig. 31: Disposición típica de test en una caja de Faraday. Las medidas se hacen en dos etapas:
1.- calibrado del campo para una gama de frecuencias dadas, con la ausencia de equipo,
2.- verificación de la inmunidad del equipo.

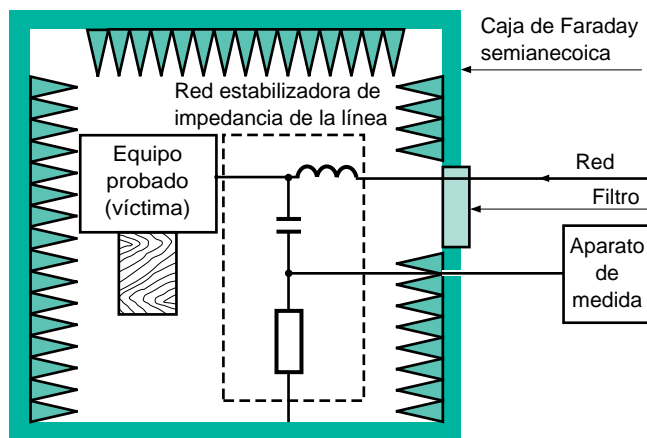


Fig. 32: Configuración de medida de emisión por conducción. El equipo testado es considerado como un generador, el REIL como una carga.

relacionados con la impedancia característica de la red, las medidas de emisión por conducción se hacen con la ayuda de una Red Estabilizadora de Impedancia de Línea (REIL). Un aparato de medida, de hecho un receptor de alta frecuencia, conectado a esta REIL permite cuantificar el nivel de cada frecuencia. El nivel de perturbaciones reinyectadas no debe exceder los límites fijados por las normas, límites que dependen del tipo de cables y del entorno. El gráfico de la **figura 33** presenta un resultado obtenido en un cuadro general de baja tensión y su comparación con la norma EN 55 022.

Emisión por radiación

Las medidas de emisión por radiación cuantifican el nivel de las perturbaciones emitidas por un aparato bajo la forma de ondas electromagnéticas.

Como para los ensayos de inmunidad a la radiación, las medidas de emisión por radiación no deben de ser alteradas por ondas que ya existen: CB, radio, etc. Tampoco deben de verse afectadas por las reflexiones de las ondas sobre obstáculos del entorno. Estas dos condiciones son antinómicas y de este hecho se derivan dos métodos de medida.

El primer método consiste en situarse al aire libre, sin ningún obstáculo dentro de un

perímetro determinado: el medio ambiente es entonces el que es.

El segundo método consiste en situarse en una caja de Faraday; las reflexiones sobre las paredes de la caja se hacen disminuir voluntariamente con la presencia de absorbentes de muy alta frecuencia (**figura 30**): el medio está perfectamente controlado.

Los laboratorios Schneider utilizan el segundo método. Su gran ventaja es el permitir la automatización de la medida y limitar el número de desplazamientos de un aparato, ya que las medidas de emisión y de inmunidad se pueden hacer en el mismo lugar variando algunos elementos. Igual que en la emisión por conducción, los niveles de emisión por radiación deben ser inferiores a los límites fijados por un cuaderno de cargas o una norma.

Medidas del campo impulsional

Los ensayos normativos permiten medir la emisión y probar la inmunidad de los aparatos o sistemas a las principales perturbaciones electromagnéticas que se pueden encontrar en los medios industriales. No obstante, las prestaciones de los equipos desarrollados por el Grupo Schneider consiguen alcanzar algunas características que todavía ni se han tenido en consideración en los textos normativos.

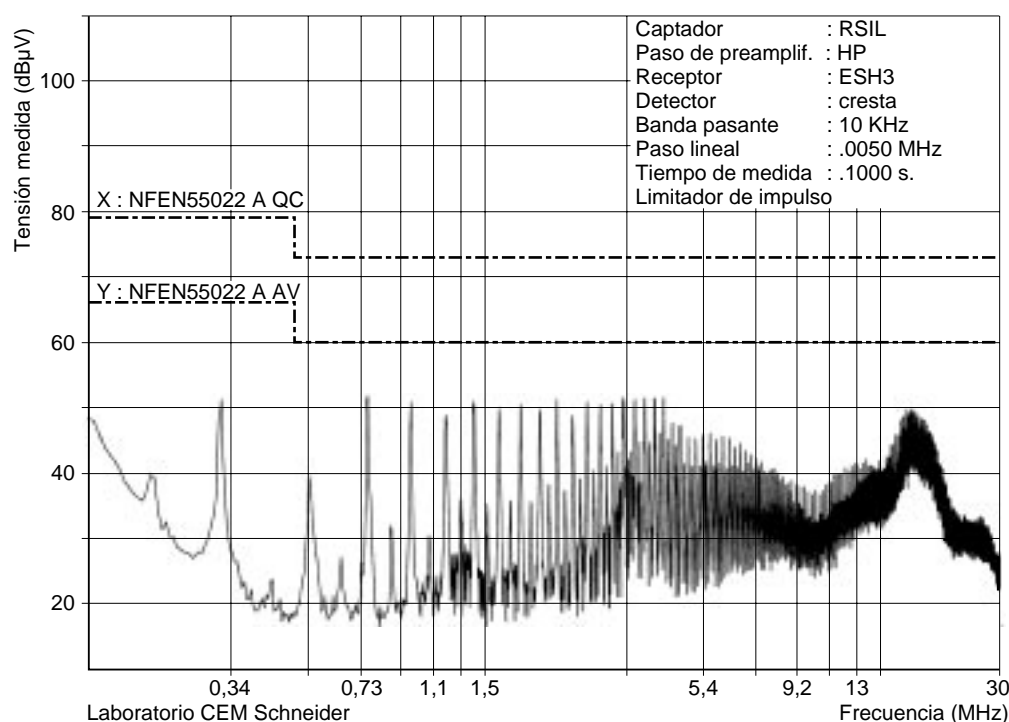


Fig. 33: Medidas de las emisiones radioeléctricas de un cuadro general BT de un centro de proceso de datos.

Todavía no existen, por ejemplo, protocolos de pruebas CEM específicos para los materiales situados en los centros de transmisión MT. Es por eso que Schneider ha llevado a cabo campañas de medida para conocer mejor las perturbaciones típicas en el entorno de sus equipos, principalmente la proximidad de la aparamenta de baja, media y muy alta tensión.

En una segunda fase, se llevan a cabo los ensayos internos con medios de ensayo específicos. Éstos permiten probar la compatibilidad electromagnética de los equipos sin tener que hacer ensayos con valores de magnitud muy grandes. De esta manera, los ensayos se pueden reproducir mejor y son menos costosos. Se llevan a cabo sobre todo en la fase de diseño, lo que permite optimizar las protecciones CEM con un menor coste.

7 Conclusión

La introducción de la electrónica en un gran número de aplicaciones, y sobre todo en la aparamenta electrotécnica, obliga a tener en cuenta un condicionante nuevo: la compatibilidad electromagnética (CEM). Los imperativos de calidad de estos productos son el asegurar un buen funcionamiento en un medio perturbado y no ser ellos a su vez elementos perturbadores.

Estos dos imperativos exigen entender perfectamente fenómenos complejos, relacionados con la fuente, los acoplamientos, y con la víctima. Obligan a respetar un cierto número de reglas en el diseño, la industrialización y en la utilización de los productos.

El lugar y la instalación juegan igualmente un papel importante en la CEM. De ahí la necesidad de pensar desde los primeros estudios en la disposición topográfica de estos elementos de potencia, la distribución de cables, los blindajes... Y con materiales que tengan una buena CEM, una instalación bien hecha aporta márgenes importantes de compatibilidad.

Sólo es posible cuantificar la CEM de diferentes elementos llevando a cabo medidas que necesitan una gran competencia y materiales sofisticados.

El respeto a las normas permite asegurar el buen funcionamiento de un aparato en su entorno electromagnético.

Anexo 1: Impedancia de un conductor en AF

El nivel de CEM en un equipo está en función de los acoplamientos entre los circuitos; estos acoplamientos están directamente relacionados con las impedancias entre estos circuitos, particularmente en AF. Para mejorar la CEM, es conveniente por tanto conocer estas impedancias para después reducirlas.

Existe un cierto número de fórmulas aproximadas que permiten determinar la impedancia en AF de los principales conductores utilizados. Estas fórmulas son complicadas y su precisión es baja si no se conoce con exactitud la posición de cada elemento. Pero, ¿quién conoce la posición exacta de un hilo respecto a otro en un trazado de cables? De hecho la respuesta nos la da la experiencia de estos fenómenos junto con el conocimiento de las reglas teóricas elementales de la electricidad.

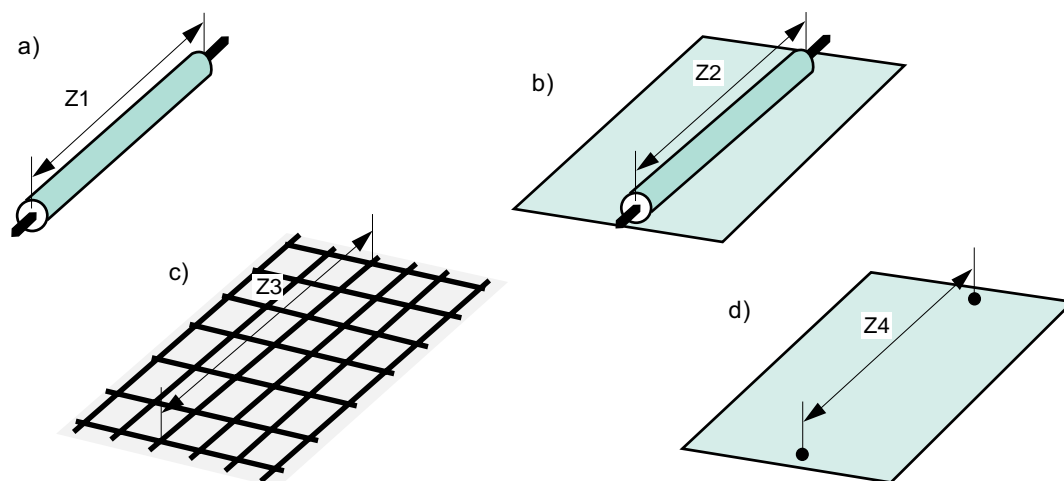
Para empezar, es importante saber que la impedancia de un conductor está en función, sobre todo, de su autoinducción, que pasa a ser importante a partir de 1 kHz para un cable estándar. Así, para un cable ficticio infinito, en el aire, su valor de autoinducción lineal varía de forma logarítmica con el diámetro, por tanto, muy poco: para los cables cuya longitud no pasa del cuarto de la longitud de onda de la perturbación considerada, se puede admitir un

valor del orden de 1 μH por metro cualquiera que sea el diámetro (figura 34).

Si el cable está correctamente colocado sobre un plano conductor, este valor disminuye considerablemente. Depende, pues, de la distancia entre el cable y el plano. Se pueden tener fácilmente valores de hasta 10 dB sobre el valor de la autoinducción. En más altas frecuencias, este cable se debe considerar como una línea de transmisión y la magnitud a considerar es entonces su impedancia característica (del orden de la centena de ohms). Con estas consideraciones, se tiene fácilmente una autoinducción común de varios microhenrios simplemente con algunos metros de cable verde-amarillo, por ejemplo. Por tanto, esto representa varios ohms a 1 MHz, y varias centenas de ohms a 100 MHz.

En resumen, el plano metálico conductor es el medio de unir eléctricamente dos puntos con la menor impedancia posible. Y esto, sin importar su grosor cuando éste es superior al grosor de paso (415 μm para el cobre a 10 kHz).

Así, una placa de cobre presenta una autoinducción de 0,6 nH a 10 kHz, o sea una impedancia por unidad cuadrada de 37 $\mu\Omega$, (la impedancia es la misma sea cual sea la superficie del cuadrado considerado).



- a: cable en el aire ($L \approx 1 \mu\text{H/m}$),
- b: cable situado sobre una superficie metálica,
- c: rejilla metálica con contacto en cada cruce (por ejemplo hierro soldado en hormigón),
- d: plano metálico

Fig. 34: Siguiendo los diferentes casos (a, b, c y d), y para una misma longitud, las impedancias lineales están en el orden: $Z1 > Z2 > Z3 > Z4$.

Anexo 2: Las partes de un cable

Los términos empleados para distinguir las diferentes partes de un cable cambian un poco de significado según el destino del cable (cable de conducción de energía, cable telefónico, o de control y mando) (**figura 35**).

Las definiciones marcadas en cursiva son las de la CEI.

Armadura

Tiene como función proteger mecánicamente un cable, por eso está formada generalmente por dos hojas de acero blando enrolladas en forma de hélice (NF C 32-050).

Para los cables destinados a la transmisión de datos, la armadura puede tener igualmente un uso eléctrico, servir de blindaje electrostático y, más a menudo, de blindaje electromagnético.

Blindaje

Sinónimo de pantalla, material elaborado y destinado a reducir la intensidad de la radiación que penetra en una zona.

La armadura o la pantalla de un cable, que está destinado al transporte de energía o de datos, puede constituir un blindaje.

Pantalla

Dispositivo utilizado para reducir la penetración de un campo en una región determinada.

Este elemento desempeña varias funciones:

- crear una superficie equipotencial alrededor del aislante,
- prevenir los efectos de los campos eléctricos externos e internos,
- asegurar la descarga de la corriente capacitiva así como de corriente de defecto tierra (cortocircuito homopolar),
- asegurar la protección de las personas y del material en caso de perforación. Por este motivo generalmente es metálica y continua (tubo de plomo, capa o trenza de cables, o cintas puestas en forma de hélice).

Para los cables de transmisión de datos, la pantalla, llamada más corrientemente blindaje, está constituida por cintas o capas de hilos, de cobre o de aluminio, enrollados para hacer un blindaje contra las influencias eléctricas y magnéticas.

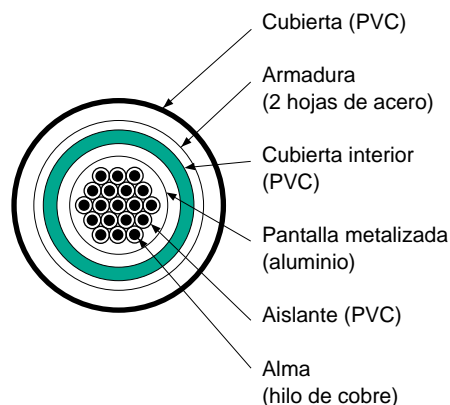
Puede ser colectivo, para el total de los conductores que componen el cable, cuando las influencias perturbadoras son exteriores.

Puede ser individual, para un cierto número de conductores del cable, para protegerlos de las influencias de otros conductores.

Cubierta

Envoltura que tiene la función de asegurar el aislamiento de un cable.

Ejemplo de cable telefónico



Ejemplo de cable de transporte de energía (MT)

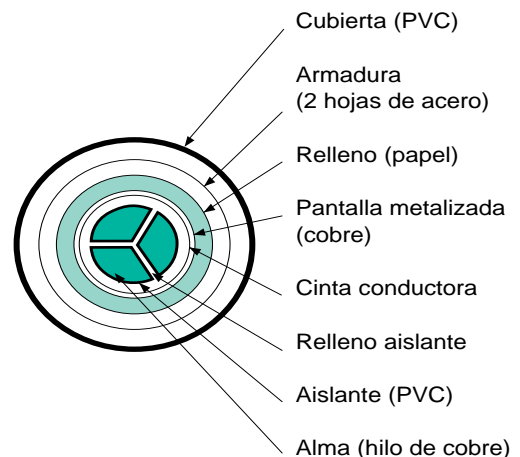


Fig. 35

Anexo 3: Ensayos hechos en los laboratorios CEM de Schneider Electric

Los laboratorios CEM de Schneider Electric son competentes y tienen las instalaciones necesarias para hacer ensayos de acuerdo con numerosas normas o especificaciones particulares.

El cliente, interno o ajeno a la empresa, es asistido si lo necesita por los especialistas de

los laboratorios en la investigación de las normas y exigencias aplicables a su equipo. También se encarga de definir cuáles son los criterios funcionales de aceptación, ya sea respecto a las normas que rigen su producto, ya sea, por defecto, según los imperativos de uso del producto (seguridad, continuidad de servicio, confort...).

Ensayos normativos

Sería un poco largo citarlos todos, más aún teniendo en cuenta que la evolución del paisaje normativo es muy rápida sobre todo por lo que se refiere a las normas de productos. A continuación indicamos los principales estudios de referencia para hacer los ensayos.

Inmunidad

■ CEI 61000-4-2 [= EN 61000-4-2 = NF EN 61000-4-2 (NF C 91-004-2)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 2: ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas.

■ CEI 61000-4-3 [= EN 61000-4-3 = NF EN 61000-4-3 (NF C 91-004-3)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 3: ensayo de inmunidad a los campos electromagnéticos por radiación a las frecuencias radioeléctricas.

■ CEI 61000-4-4 [= EN 61000-4-4 = NF EN 61000-4-4 (NF C 91-004-4)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 4: ensayo de inmunidad a los transitorios eléctricos rápidos en salvas.

■ CEI 61000-4-5 [= EN 61000-4-5 = NF EN 61000-4-5 (NF C 91-004-5)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 5: ensayo de inmunidad a las ondas de choque.

■ CEI 61000-4-6 [= EN 61000-4-6 = NF EN 61000-4-6 (NF C 91-004-6)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 6: inmunidad a las perturbaciones por conducción, inducidas por los campos radioeléctricos.

■ CEI 61000-4-8 [= EN 61000-4-8 = NF EN 61000-4-8 (NF C 91-004-8)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 8: ensayo de inmunidad a un campo magnético a la frecuencia de una red.

■ CEI 61000-4-11 [= EN 61000-4-11 = NF EN 61000-4-11 (NF C 91-004-11)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Parte 4: técnicas de ensayo y de medida.
Sección 11: ensayo de inmunidad a los cruces de tensión, cortes breves y variaciones de tensión.

■ EN 50082-1.

[= NF EN 50082-1 (NF C 91-082-1)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Norma genérica de inmunidad.
Parte 1: residencial, comercial e industria ligera.

■ EN 50082-2.

[= NF EN 50082-2 (NF C 91-082-2)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).
Norma genérica de inmunidad.
Parte 2: entorno industrial

Emisión

■ CISPR 11

[=EN 55011 = NF EN 55011 (NF C 91-011)].

Límites y métodos de medida de las características de perturbaciones radioeléctricas de los aparatos industriales, científicos y médicos (ISM) a frecuencia radioeléctrica.

■ CISPR 14

[=EN 55014 = NF EN 55014 (NF C 91-014)].

Límites y métodos de medida de perturbaciones radioeléctricas producidas por los aparatos electrodomésticos o análogos que comportan motores o dispositivos térmicos, por aparatos eléctricos y por los aparatos eléctricos análogos (parte emisión por conducción).

■ CISPR 22

[=EN 55022 = NF EN 55022 (NF C 91-022)].

Límites y métodos de medida de las características de perturbaciones radioeléctricas producidas por los aparatos de tratamientos de la información.

■ CEI 61000-6-3

Compatibilidad electromagnética (CEM).

Parte 6: normas genéricas.

Sección 3: sobre la emisión para los entornos residenciales, comerciales y de la industria ligera.

■ CEI 61000-6-4

Compatibilidad electromagnética (CEM).

Parte 6: normas genéricas.

Sección 3: sobre la emisión para los industriales.

■ EN 50081-1

[=NF EN 50081-1 (NF C 91-081-1)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).

Norma genérica emisión.

Parte 1: residencial, comercial e industria ligera.

■ EN 50081-2

[=NF EN 50081-2 (NF C 91-081-2)].

Compatibilidad electromagnética (CEM).

Norma genérica emisión.

Parte 2: entorno industrial.

Normas específicas

■ De centros de telecomunicaciones:

I 12-10, 1 993; éditée par le Comité des Spécifications des Equipements (CSE) France Télécom.

Environnement électromagnétique des équipements des centres. (partie immunité aux perturbations rayonnées et conduites).

■ Militares:

□ GAM - EG - 13:

Essais généraux en environnement des matériels.

Fascículos 62 y 63.

□ MIL STD 461/462: Electromagnetic emission and susceptibility requirements for the control of electromagnetic interference.

Ensayos fuera de las normas

En la medida de sus posibilidades, los laboratorios pueden efectuar ensayos de conformidad con otras normas o textos.

Anexo 4: Bibliografía

Normas

- CEI 61000-2-1
- CEI 61000-2-2
- CEI 61000-4
- CEI 61000-6
- EN 55 011, CISPR 11
- EN 55 022, CISPR 22
- NF C 15-100

Cuadernos técnicos Schneider Electric

- Las perturbaciones eléctricas en BT. Cuaderno Técnico nº 141. R.CALVAS.
- Interruptores de SF₆ Fluarc y protección de motores MT. Cuaderno Técnico nº 143. J.HENNEBERT y D. GIBBS.
- Coexistencia de corrientes fuertes y corrientes débiles. Cuaderno Técnico nº 187. R.CALVAS y J.DELABALLE.

Publicaciones diversas

- Compatibilité électromagnétique - bruits et perturbations radioélectriques-. P. DEGAUQUE y J. HAMELIN. Dunod editor.
- Compatibilité électromagnétique. M. IANOVICI y J. J. MORF. Presses Polytechniques Romandes.
- La compatibilité électromagnétique. A. KOUYOUMDJIAN, con R.CALVAS y J. DELABALLE. Institut Schneider Formation. Febrero 1996. Referencia MD1CEM1F.
- Les harmoniques et les installations électriques. A. KOUYOUMDJIAN. Institut Schneider Formation. Abril 1998. Referencia MD1HRM1F.
- RGE nº 10 dedicado a la compatibilidad electromagnética. Noviembre 1986.