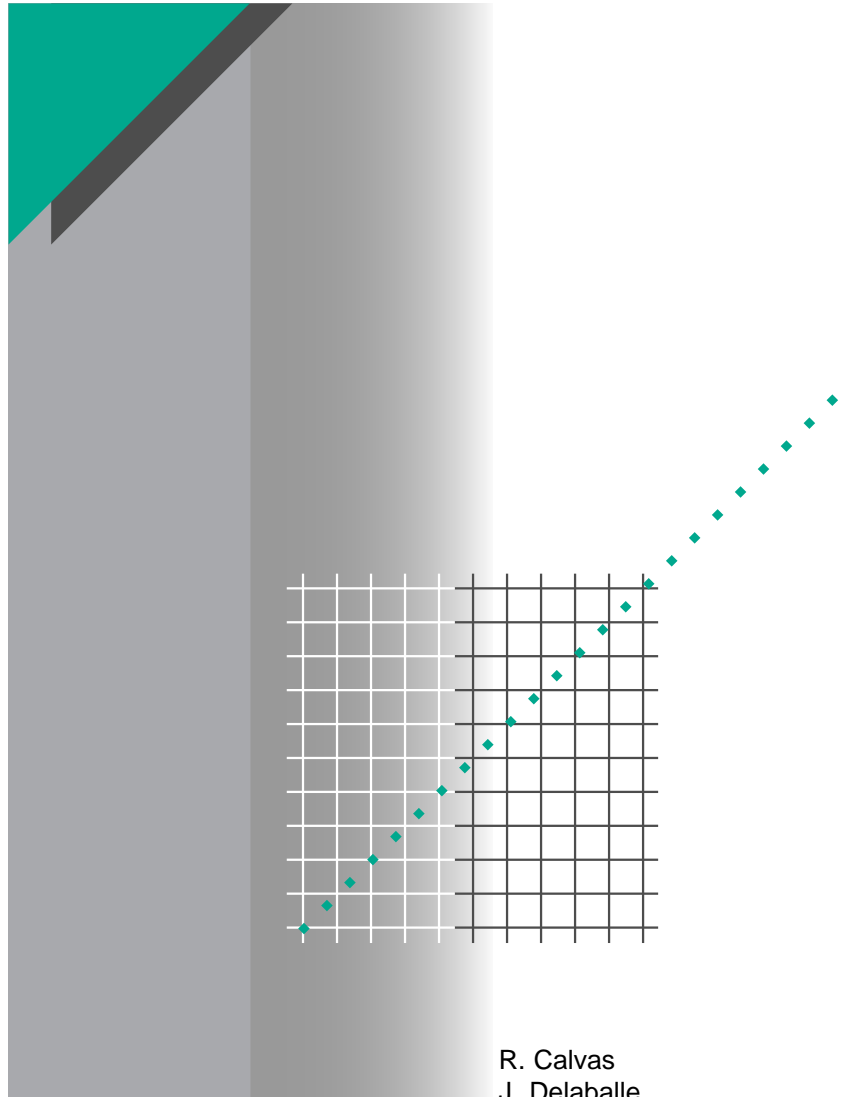


Cuaderno Técnico nº 187

Coexistencia de corrientes de alta y baja intensidad



R. Calvas
J. Delaballe

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

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» de **Schneider Electric España S.A.**

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 187 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 187

Coexistencia de corrientes de alta y baja intensidad



Roland CALVAS

Ingeniero ENSERG (Ecole Nationale Supérieure d'Électronique et de Radioélectricité de Grenoble) y diplomado por el Institut d'Administration des Entreprises, entró en Merlin Gerin en 1966. Después de un largo recorrido profesional, participó en la aplicación de la electrónica en la distribución eléctrica. Actualmente se encarga de la Comunicación Técnica en el Groupe Schneider.



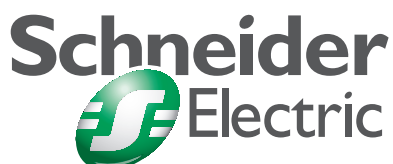
Jacques DELABALLE

Doctor por la Universidad de Limoges en 1980, entró en Merlin Gerin en 1986, después de siete años de actividad profesional en Thomson. Es responsable de los Laboratorios CEM del centro de ensayos de Schneider Electric. Es miembro de la Comisión 77 (Compatibilidad Electromagnética) de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

Trad.: J.M. Giró

Original francés: marzo 2000

Versión española: febrero 2001



Terminología

Blindaje (VEI 195-02-31A):

Barrera o envoltorio que proporciona una protección contra los peligros mecánicos (\neq pantalla). Este término se usa todavía con frecuencia en lugar de pantalla.

Bucle:

Superficie delimitada por dos conductores, sean las que sean sus funciones, susceptible de perturbar, por inducción electromagnética, a un receptor sensible y/o intercomunicado.

Bucle de masa:

Bucle constituido por dos conductores, siendo uno un conductor activo (fase y neutro) o una línea de conexión de baja intensidad, y siendo el otro uno de los conductores de un bucle entre masas.

Bucle entre masas:

Bucle constituido por dos conductores que pueden ser el CP, un conductor de acompañamiento, una pantalla, una línea de conexión equipotencial suplementaria o un elemento conductor (no eléctrico).

Bus:

Se refiere a una línea de conexión de baja intensidad que transporta señales digitales.

Cola de cerdo:

Conexión con hilo suelto enrollado en tirabuzón. Hay que evitarlo como referencia a un blindaje a masa: gran impedancia en AF.

Compatibilidad electromagnética CEM (abreviatura):

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

Conductor de acompañamiento:

Elemento conductor que acompaña a una línea de conexión de baja intensidad para reducir al mínimo la superficie del bucle formado por la línea de conexión de baja intensidad y el circuito de masa; este conductor de acompañamiento puede ser un conductor, una bandeja de cables o una pantalla. El conductor de acompañamiento es también una línea de conexión equipotencial funcional.

Conductor de protección (CP):

Conductor especificado en ciertas medidas de protección contra los choques eléctricos y destinado a conectar eléctricamente algunas de las siguientes partes: masas (eléctricas), borne principal de tierra, punto de la alimentación conectado a tierra o al punto de neutro artificial.

Corrientes de alta intensidad:

Corrientes y líneas que pueden transportar la potencia y, principalmente, las líneas de alimentación de energía eléctrica incluida toda la red de distribución y también el conductor de protección.

Corrientes de baja intensidad:

Se refiere a las redes o buses, a las señales de voz-datos-imagen y, en general, a todas las señales eléctricas que transmiten información y no transportan potencia.

Elementos conductores (ajenos a la instalación eléctrica):

Partes metálicas de los edificios, canalizaciones de agua, gas, calefacción, suelos y paredes no aislantes. Se trata de masas no eléctricas.

Intercomunicado y no interconectado:

Equipo conectado a una red de datos a través de líneas o conexiones específicas (redes o buses). No se incluye en este concepto la conexión a la red eléctrica (N. del T).

Pantalla (VEI 195-02-32):

Dispositivo destinado a reducir la penetración de un campo eléctrico, magnético o electromagnético en una zona determinada, o a envolver o separar circuitos eléctricos.

Masa:

Para el electricista (VEI 195-06-07): Parte conductora de un material eléctrico, susceptible de ser tocada y que normalmente no está bajo tensión, pero que puede estarlo en caso de defecto de aislamiento.

Masa/tierra funcional:

Punto de una red o de un aparato que tiene que ponerse a masa/tierra por motivos que no son la seguridad de las personas.

Perturbador:

Fuente de perturbaciones electromagnéticas. Ver «víctima».

PWM (Pulse Width Modulation) o modulación de ancho de impulso:

Modulación especialmente adecuada para controlar el valor medio de una señal de salida, transformando la entrada en una señal de salida de impulsos de amplitud variable.

Víctima:

Receptor sensible a las perturbaciones electromagnéticas. Ver «perturbador».

Coexistencia de corrientes de alta y baja intensidad

El desarrollo de los sistemas digitales que utilizan líneas de conexión de baja intensidad (buses - redes) plantea actualmente de manera aguda el problema de la coexistencia de corrientes de gran intensidad (líneas de distribución de energía) y corrientes de baja intensidad (líneas de distribución de señal).

Generalizando, se trata de conciliar la seguridad eléctrica y la compatibilidad electromagnética. Esto lleva a responder, entre otros aspectos, a las siguientes cuestiones:

- cómo tratar el problema de las masas,
- cuál es la elección correcta del esquema de conexión a tierra o régimen de neutro,
- qué blindajes, planos reductores, cajas de Faraday y por qué hacerlos,
- cómo deben colocarse las líneas de corrientes de alta y baja intensidad a lo largo de las instalaciones,
- etc.

Este Cuaderno, pensado para que lo lean los técnicos electricistas, debe de ser útil, además, a los especialistas en líneas de baja intensidad (señal) porque se refiere sustancialmente a las perturbaciones de $BF \leq 1$ MHz.

1	Introducción	1.1 La CEM, una disciplina relacionada con varias profesiones	p. 6
		1.2 Repaso sobre las perturbaciones y mecanismos de acoplamiento	p. 7
		1.3 Distinción entre corrientes de baja y de alta intensidad	p. 10
2	Tierra y masas	2.1 Toma de tierra	p. 11
		2.2 Las masas	p. 13
		2.3 Malla entre circuitos de masas eléctricas y otras masas	p. 16
3	La CEM de los aparatos no intercomunicados	3.1 Perturbaciones autoinducidas	p. 17
		3.2 La exposición a los campos radiados	p. 18
		3.3 Las perturbaciones conducidas	p. 20
4	La CEM de los aparatos electrónicos interconectados	4.1 Ejemplo de perturbaciones por impedancia común	p. 22
		4.2 Ejemplo de perturbación por radiación	p. 23
5	Conclusión		p. 25
	Bibliografía		p. 27

1 Introducción

1.1 La CEM, una disciplina relacionada con varias profesiones

La compatibilidad electromagnética –CEM– es una disciplina, en gran expansión, que se estrenó con el desarrollo de la radiodifusión; así, durante medio siglo, se han tenido que blindar los «parásitos» de los motores de explosión para evitar que interfirieran en los radiorreceptores.

Actualmente la CEM ha sido objeto de numerosos trabajos de expertos, sobre todo electrónicos y especialistas en telecomunicaciones. Para asegurar la posibilidad de coexistencia de perturbadores y víctimas, se han publicado abundantes normas e incluso una directiva europea; todo ello fijando los límites de emisión de perturbaciones electromagnéticas así como los niveles de inmunidad.

A pesar de esto, aún queda una parte compleja en la que no se ha conseguido el consenso entre expertos: **la coexistencia entre las redes de transmisión de corrientes de baja intensidad (señal) y las redes transporte de grandes intensidades (distribución de energía).**

Están afectados los aparatos electrónicos no intercomunicados, porque están alimentados por la red eléctrica y son sensibles a los campos radiados BF y AF, así como a las perturbaciones conducidas, pero aún más, los aparatos que constituyen sistemas de comunicaciones de inteligencia distribuida (intercomunicados).

Por tanto, se trata de la seguridad de funcionamiento de los sistemas informáticos, la gestión técnica de edificios, la distribución eléctrica, los automatismos de control, etc.

Todos estos sistemas, cada vez más numerosos, usan principalmente líneas digitales, llamadas en general, líneas de baja intensidad.

A los técnicos en informática, en electricidad, en automatismos, en electrónica les es molesto tenerse que poner de acuerdo y coordinar sus trabajos respectivos. Hay que conseguir llegar a una cultura común para evitar el diseño y la instalación de sistemas que o funcionan mal o incluso llegan a destruirse. Los fabricantes deben de contribuir a esta cultura común. Es muy importante que los técnicos se den cuenta de que:

- las redes eléctricas son cada vez más potentes, que transportan cada vez más corrientes armónicas y que pueden tener un ECT o régimen de neutro no adecuado,
- las redes digitales de datos se multiplican, tienen valores de cada vez menores, (apenas algunos voltios) y velocidades cada vez mayores (del orden de megabits por segundo).

Los técnicos en electricidad y electrónica deben de cooperar para optimizar la CEM en las instalaciones de los edificios y para mejorar la coexistencia de las corrientes de gran intensidad y de baja intensidad.

Este documento se refiere más a los fenómenos de la BF que a los de la AF, estando el límite entre ellos en 1 MHz.

1.2 Repaso sobre las perturbaciones y mecanismos de acoplamiento

Las perturbaciones

Las perturbaciones electromagnéticas son de naturaleza muy diversa, y en su definición intervienen numerosos criterios.

Pueden ser permanentes o temporales, alternas o de impulso, de baja o alta frecuencia (hasta más allá de 1 MHz); pueden ser también conducidas o radiadas, de modo común o de modo diferencial, con su origen en el interior de los edificios o fuera de ellos.

El conjunto de fenómenos perturbadores considerados en la CEM son numerosos; aquí nos interesaremos especialmente por:

- corrientes armónicas y grandes corrientes de defecto,
- sobretensiones de maniobra,
- tensiones y corrientes de descarga de rayo.

Las tensiones y grandes corrientes producen campos electromagnéticos.

Recordemos que todo campo electromagnético está compuesto por un campo magnético H y un campo eléctrico E.

En las proximidades de una corriente de baja frecuencia, el campo preponderante es magnético y alcanza hasta una distancia del orden de $\lambda/2\pi$, o sea, unos 1 000 km para un campo de 50 Hz.

En las proximidades de una fuente de alta impedancia y alta frecuencia, el campo preponderante es el eléctrico. Éste es

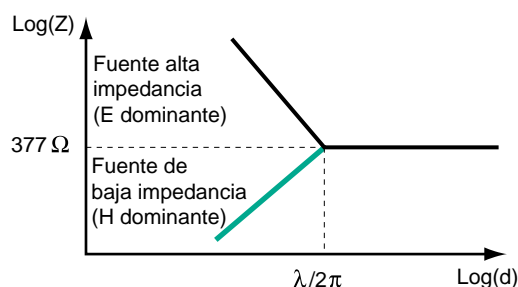


Fig. 1: Impedancia de la onda $Z = f(d)$.

normalmente el caso de las sobretensiones de maniobra de las redes eléctricas.

Más allá de $\lambda/2\pi$ (para fuentes de dimensiones pequeñas respecto a la longitud de onda λ) la razón entre E y H es constante. Esta impedancia es, en el aire, del orden de:

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \text{ (figura 1).}$$

La tabla de la figura 2 da algunos ejemplos de generadores de perturbaciones con su frecuencia (valor medio) y los campos que pueden radiar, teniendo en cuenta sus potencias respectivas.

Emisor	Frecuencia (f)	Longitud de onda (λ)	Campo
Red (1 kA, 1 fase)	50 Hz	6 000 km	20 A/m a 10 m
Rayo	30 kHz a 3 MHz	10 km	10 A/m a 500 m
Horno de secado	27 MHz	11 m	1,5 V/m a 10 m
Maniobras a 20 kV	75 MHz	4 m	5 kV/m a 1 m
FM	100 MHz	3 m	1 V/m a 500 m
Radio Onda Larga	200 kHz	1 500 m	30 V/m a 500 m
Walkie-Talkie	450 MHz	66 cm	10 V/m a 1 m
Televisión UHF	600 MHz	50 cm	0,5 V/m a 500 m
Teléfono móvil	900 MHz	33 cm	20 V/m a 1 m
Radar	1 GHz	30 cm	40 V/m a 500 m
Horno microondas	2,45 GHz	12 cm	1,5 V/m a 1 m

Fig. 2: Algunos emisores de perturbaciones electromagnéticas.

Los mecanismos de acoplamiento

Recordemos que, según la naturaleza de la perturbación, los mecanismos de acoplamiento entre el fenómeno perturbador y su víctima pueden ser de tipo:

- impedancia común (perturbación conducida),
- eléctrica (capacidad parásita y radiante),
- magnética (inducción mutua y radiación).

■ Acoplamiento por impedancia común

Es el resultado de la presencia de un circuito común a varios aparatos; este acoplamiento puede producirse a través de la red de alimentación, la red de masas, la red equipotencial de protección...

La **figura 3** muestra este tipo de mecanismo de acoplamiento.

■ Acoplamiento eléctrico

Se produce cuando existe o un campo eléctrico exterior o una capacidad parásita entre dos circuitos o elementos conductores (**figura 4**).

■ Acoplamiento magnético

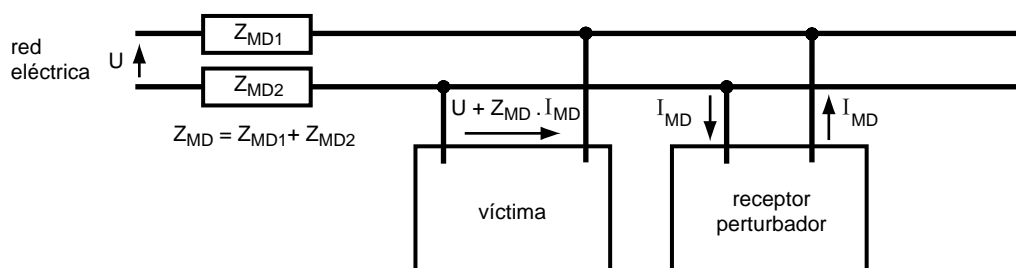
Se produce al existir o un campo magnético exterior o una inductancia mutua entre un conductor y un bucle, como muestra la **figura 5**.

En muchos casos, pueden tenerse simultáneamente varios mecanismos diferentes de acoplamiento.

Afectan muy especialmente a la distribución eléctrica:

- las corrientes de cortocircuito (o de defecto de aislamiento en régimen TN) que pueden producir campos magnéticos muy importantes.

a - Acoplamiento en modo diferencial (MD)



b - Acoplamiento en modo común (MC)

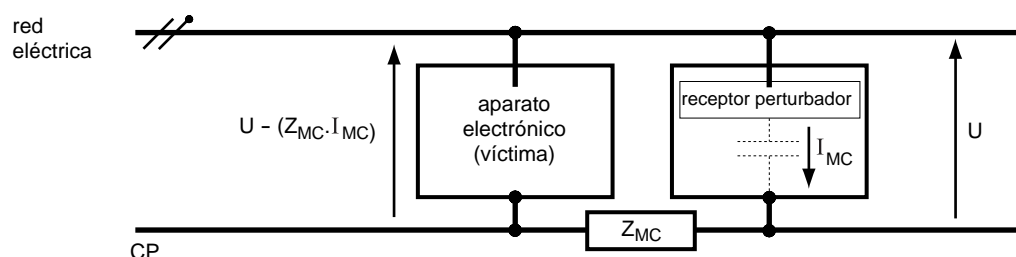


Fig. 3: Acoplamiento por impedancia común. Las perturbaciones producidas por un campo perturbador atacan a un receptor sensible debido a la no existencia de un acoplamiento en las alimentaciones (a) o a los circuitos de masa (CP) (b).

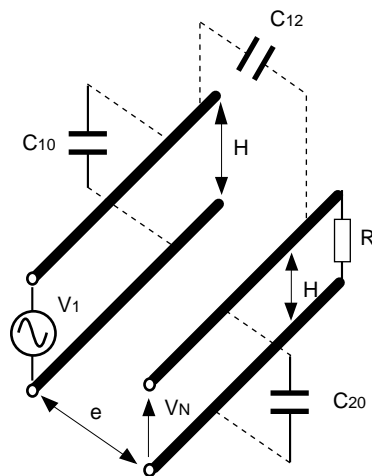


Fig. 4: Una variación brusca de la tensión V_1 , entre dos conductores, produce un campo que, a pequeña distancia, puede considerarse exclusivamente eléctrico, e induce una tensión V_N en otra estructura filar que sea paralela. Este modo de acoplamiento se llama diafonía capacitativa.

Según el teorema de Ampère:

$$H = \frac{I}{2\pi d},$$

siendo d la distancia entre el conductor y la víctima.

□ La «maniobra» de la aparamenta eléctrica: interruptores, contactores, interruptores automáticos, fusibles, producen perturbaciones radiadas y conducidas variadas e importantes que deben ser tenidas en cuenta y controladas por los fabricantes de los equipos electrónicos que constituyen los diversos cuadros eléctricos. Estas «ondas» han sido definidas por los editores de las normas (figura 6).

□ El rayo, cuando cae en un edificio o cerca de él o en una línea eléctrica, es un fenómeno de tipo impulsional altamente perturbador. Puede producir un campo magnético, un campo eléctrico, una onda conducida o una diferencia de potencial entre dos puntos eléctricos de la instalación.

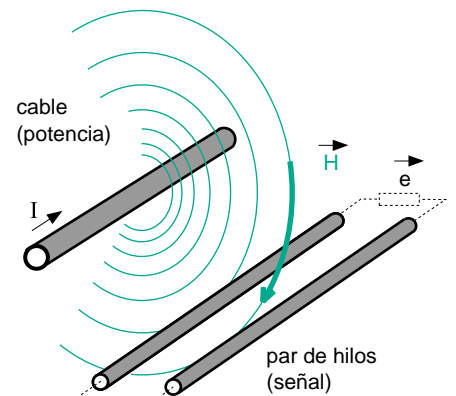


Fig. 5: Una variación de corriente en un cable produce un campo que a pequeña distancia puede considerarse exclusivamente magnético e induce entonces una tensión perturbadora en los cables que forman un bucle. Este modo de acoplamiento se llama diafonía inductiva.

CEI 61000-4-2	Descargas electrostáticas
CEI 61000-4-3	Campos radiados
CEI 61000-4-4	Transitorios rápidos en ráfaga
CEI 61000-4-5	Ondas de choque (tipo rayo)
CEI 61000-4-6	Perturbaciones conducidas $f > 9$ kHz
CEI 61000-4-8	Campos magnéticos a la frecuencia de red
CEI 61000-4-9	Campos magnéticos de tipo impulso
CEI 61000-4-10	Campos magnéticos oscilatorios amortiguados
CEI 61000-4-12	Ondas oscilatorias amortiguadas
CEI 61000-4-13	Armónicos
CEI 61000-4-16	Perturbaciones conducidas en modo común de 0 Hz a 150 kHz

Fig. 6: Algunas normas de ensayo de perturbaciones.

1.3 Distinción entre corrientes de baja y de alta intensidad

El calificativo «gran intensidad» se aplica a los fenómenos normales, como son la circulación de corriente eléctrica de 50 Hz, o a fenómenos anormales como las corrientes de rayo. La **figura 7** propone una clasificación de las diferentes líneas de conexión eléctrica en cuatro grupos.

■ El grupo 1 corresponde a las grandes intensidades.

■ El grupo 2 es poco sensible, poco perturbador, y corresponde generalmente a líneas cortas de conexión.

■ El grupo 3 corresponde a las conexiones digitales (buses o redes) y está en continua y rápida expansión tanto en el sector terciario como en la industria; los múltiples caminos que conectan los aparatos intercomunicados están destinados a cohabitar con las conexiones de «gran intensidad».

■ El grupo 4 corresponde a las líneas de conexión analógicas de alta impedancia que conviven poco con las otras del grupo, debido a su gran sensibilidad: hay pocas conexiones de este tipo y suelen ser cortas.

Una conexión que pertenezca a los grupos 2 ó 3 de «baja intensidad» puede perturbar a una conexión más sensible.

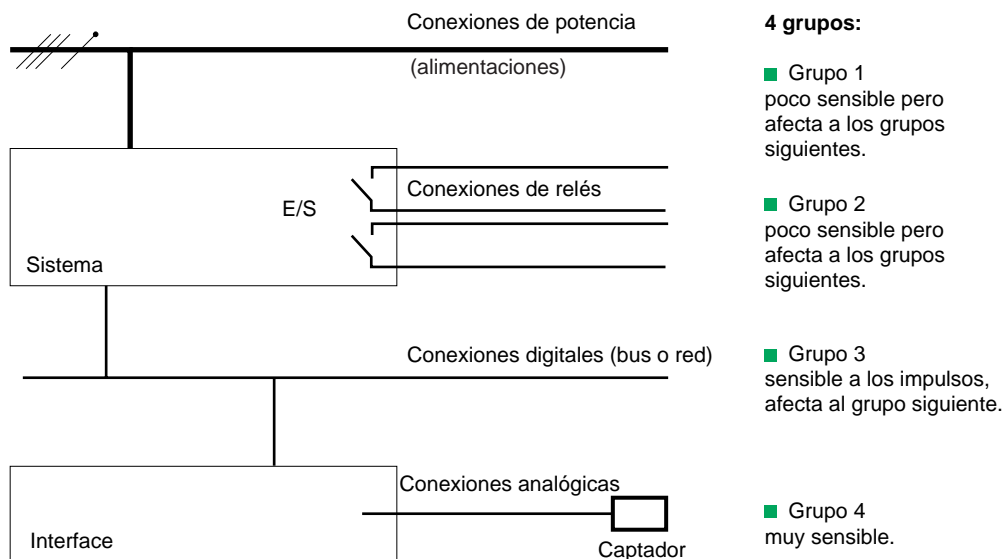


Fig. 7: Clasificación de los tipos de conexiones eléctricas por orden ascendente y de sensibilidad.

2 Tierra y masas

2.1 Toma de tierra

El primer objetivo de la puesta a tierra es la protección de personas

¡Evidentemente nosotros vivimos en la Tierra! Es esencial que las partes metálicas accesibles de los equipos eléctricos estén conectadas a tierra para evitar una electrocución por contacto indirecto en caso de fallo de aislamiento. Esta disposición es normativa desde 1923 (CEI 60364).

Según el esquema de conexión a tierra (ECT), la corriente de defecto puede ser más o menos importante y se toman diversas precauciones para que la tensión de contacto no alcance la tensión convencional de seguridad durante un tiempo determinado U_L (50 V en ca) (Cuadernos Técnicos n^{os} 172 y 173).

Las partes metálicas accesibles de los materiales eléctricos están conectadas al conductor de protección (CP) y éste a la toma de tierra; el conjunto constituye la instalación de la puesta a tierra.

El segundo objetivo de la puesta a tierra es el minimizar las perturbaciones en modo común con origen externo a la instalación BT

Se trata por ejemplo de la sobretensión a 50 Hz en caso de perforación o cebado en los transformadores MT/BT (figura 8) o las sobretensiones de rayo (figura 9). En este sentido las normas obligan a conseguir unos valores límite en las tomas de tierra.

El rayo, los defectos MT/BT y la seguridad de las personas obligan a conseguir una toma de tierra poco impedante (¡la I_{hMT} puede alcanzar 1000 A y la tensión de aislamiento de los materiales sensibles es de 1500 V!). Este problema se ha de tener especialmente en cuenta en el régimen TT.

Evidentemente, habrá que evitar las tomas de tierra múltiples o al menos tendrán que estar interconectadas.

La toma de tierra se puede hacer con una o varias piquetas enterradas en el suelo, o con un bucle en el fondo de una zanja, o con las dos soluciones asociadas.

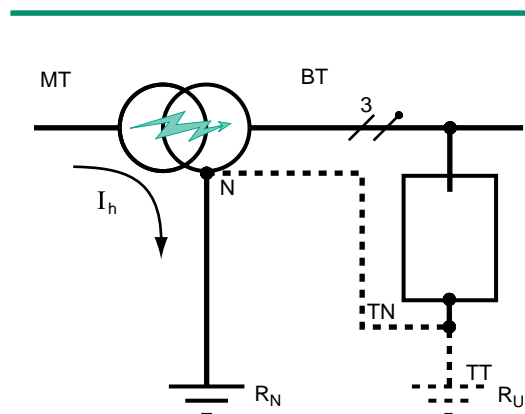


Fig. 8: Perforación o cebado MT/BT; la red toma un potencial respecto a tierra $U = R_N \cdot I_h$ y por esto aparece riesgo para el material en el esquema TT, o para las personas en esquema TN si el edificio no tiene una red equipotencial.

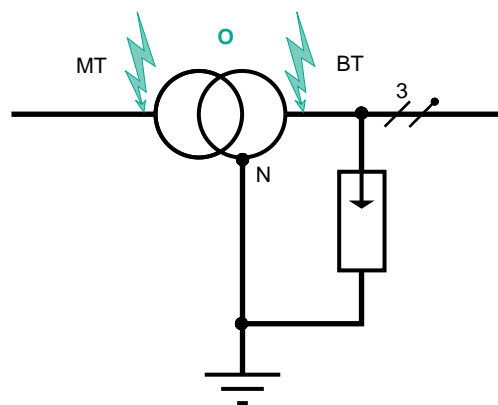


Fig. 9: Sobretensión de rayo; la red sufre una sobretensión de tipo impulso en todos los conductores activos; de ahí que sea importante el riesgo «CEM»: necesidad de utilizar pararrayos o limitador de sobretensiones sea el que sea el ECT.

Para una piqueta, $R_p = \frac{\rho}{L}$

Para un bucle en el fondo de una zanja,

$R_{FF} = 2 \frac{\rho}{L}$, siendo L la longitud de la piqueta o

el perímetro del bucle. Para limitar la oxidación, la toma de tierra debe hacerse con un conductor macizo de cobre o de acero inoxidable. La resistividad del suelo (ρ) es un parámetro importante; varía con la humedad del suelo y con la naturaleza del terreno en un margen muy amplio que puede variar desde 1 a 5000 Ωm . Es importante colocar tierra «buena» en el fondo de la zanja alrededor del conductor del bucle (figura 10).

La impedancia de la toma de tierra varía poco entre 50 Hz y 500 kHz.

Si un edificio tiene pararrayos de punta Franklin, las bajadas de este pararrayos han de estar conectadas a tomas de tierra en forma de pata de ganso. Todos los conductores que tienen el riesgo de tener que transportar las corrientes de rayo deberían de ser conductores planos (máximo perímetro) lo que reduce el coeficiente de autoinducción y el efecto pelicular y por tanto, reduce muchísimo la caída de tensión lineal. En la figura 11, de la página siguiente, se estudia la impedancia de estos conductores.

Es esencial que los conductores sean lo más cortos posible. Pongamos por ejemplo el caso de un pararrayos BT previsto para limitar la tensión en modo común a 1,5 kV. Está conectado entre la fase protegida y la varilla de toma de tierra mediante un conductor de sección circular de 1 m de longitud; con una corriente de 5 kA y un frente de subida de 8 μs , desarrollará una tensión de:

$$\hat{U} \approx L \frac{di}{dt} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{5 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^{-6}} = 625$$

de donde aparecerá una sobretensión total de 2,1 kV que es peligrosa para todos los equipos eléctricos que tienen una resistencia a la tensión de choque de 1,5 kV. La solución consiste en conectar la utilización directamente a los bornes del pararrayos o limitador de sobretensión (figura 12).

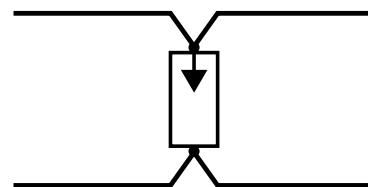


Fig. 12: Conexión óptima de un pararrayos.

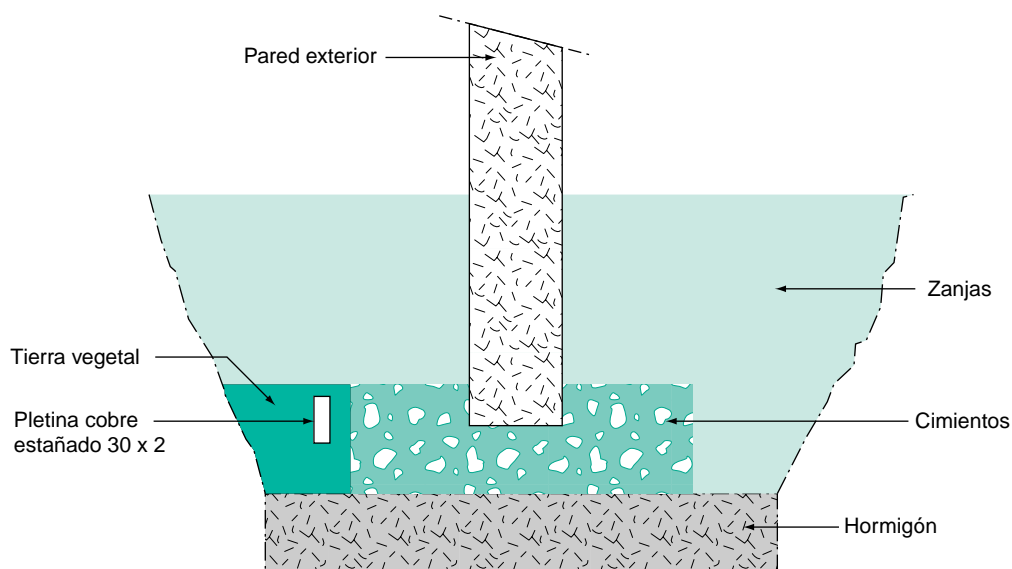


Fig. 10: Toma de tierra; realización de un bucle en el fondo de una zanja.

■ La resistencia en corriente continua de un conductor es $R_C = \rho \ell / S$, o sea, $R_C = 1,7 \text{ m}\Omega$ para un conductor cilíndrico de cobre de 100 mm^2 de sección y 10 m de longitud. Cuando la frecuencia aumenta, el efecto pelicular hace crecer esta resistencia. En efecto, las corrientes AF se concentran en la periferia del conductor a una profundidad $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$ que disminuye con la frecuencia. δ se llama profundidad de la película o pelicular.

Para el cobre, $\delta_{(50 \text{ Hz})} = 9,3 \text{ mm}$,
 $\delta_{(1 \text{ MHz})} = 65,8 \text{ }\mu\text{m}$,
 $\delta_{(10 \text{ MHz})} = 21 \text{ }\mu\text{m}$.

Por tanto, la sección efectiva del conductor disminuye. La razón entre R_{AF} y R_C se obtiene, en el caso de un conductor cilíndrico de radio r , mediante la fórmula:

$$\frac{R_{HF}}{R_C} = \frac{1}{4} + \left[\left(\frac{r}{2\delta} \right)^6 + 0,178 \right]^{1/6} \approx 0,25 + \frac{r}{2\delta}$$

Esta fórmula no es válida si el radio r del conductor es superior al grosor, δ , de la película.

Nuestro conductor de cobre es:

□ a 50 Hz : $R_{AF} = R_C = 1,7 \text{ m}\Omega$

□ a 1 MHz : $R_{AF} = 43,1 R_C = 73 \text{ m}\Omega$

□ a 10 MHz : $R_{AF} = 135 R_C = 230 \text{ m}\Omega$

■ La autoinducción L (μH) de un conductor de longitud ℓ es:

□ para un conductor cilíndrico:

$$0,2 \ell \left[2,303 \log_{10} \frac{4\ell}{d} - 1 + 100 \mu_r \cdot \delta \right]$$

□ para un conductor de sección rectangular:

$$0,2 \ell \left[2,303 \log_{10} \frac{2\ell}{w+e} + 0,5 + 0,2235 \frac{w+e}{\ell} \right]$$

estando ℓ , d (diámetro), δ , w (longitud), e (grosor) expresado en metros.

Dimensiones			Inductancia	Impedancia Z		
d (mm)	w (mm)	e (mm)	L (μH)	a 50 Hz (Ω)	a 1 MHz (Ω)	a 10 MHz (Ω)
11,28			16,2*	0,0068	90	900
	10	10	14,8	0,00635	93	930
	50	2	12,9	0,00575	81	810
	100	1	11,6	0,00535	73	730
	500	0,2	8,4	0,00435	53	530

Tabla: Autoinducción e impedancia de un conductor de cobre de 10 m de longitud y 100 mm^2 de sección en función de sus dimensiones.

(*) En esta tabla la autoinducción del conductor cilíndrico se da a 50 Hz .

En AF el término $100 \mu_r \cdot \delta$ debe despreciarse, y $L \approx 14,35 \text{ }\mu\text{H}$ debe considerarse, como en el caso

del conductor de sección rectangular, independiente de la frecuencia. Por último, nótese que en AF la impedancia $Z = 2\pi \cdot f \cdot L$ pasa a ser preponderante respecto a R_{AF} .

Fig. 11: Impedancia de los conductores en función de sus dimensiones y de la frecuencia.

2.2 Las masas

Tipos de masas

En los edificios existen diferentes tipos de masas metálicas. Citemos:

- las carcasas metálicas de los receptores eléctricos y equipos electrónicos,
- las estructuras metálicas de los edificios,
- las canalizaciones y equipos de agua y gas,

■ las masas funcionales de los equipos electrónicos que participan en la transmisión de señal (0 voltios),

■ las masas de tipo pantalla o caja de Faraday que tienen por objeto bloquear los campos electromagnéticos.

Como la toma de tierra, los circuitos de masa tienen varias finalidades.

Primera finalidad: la protección de personas

Pueden aparecer potenciales peligrosos entre las carcasas metálicas, las canalizaciones de gas, las de agua y las estructuras metálicas de los edificios. Por tanto, para la protección de las personas, todas las masas simultáneamente accesibles deben de estar interconectadas. El edificio debe por tanto ser equipotencial. Esta es la razón por la que las normas de instalación indican que todas las masas antes citadas deben de estar interconectadas a la línea equipotencial principal, sea el que sea el esquema de conexión a tierra (**figura 13**).

La puesta a tierra de las masas de los receptores forma una red equipotencial de protección en estrella, con distribución arborescente de los conductores de protección (CP) puesto que están en el mismo conjunto de cables que los conductores activos.

Segunda finalidad: la seguridad de funcionamiento de los sistemas electrónicos

Son más sensibles que los seres humanos a las diferencias de potencial y a las radiaciones electromagnéticas. Necesitan dispositivos de bloqueo de las perturbaciones conducidas, planos de masa, pantallas y cajas de Faraday para bloquear los campos electromagnéticos; necesitan, también, «circuitos» de masa equipotencial, especialmente cuando se trata de aparatos intercomunicados a través de buses o redes de transmisión de datos. En este caso la equipotencialidad de las masas debe ser la mejor posible dentro del edificio porque estos aparatos intercomunicados, tanto si están dedicados al control y mando como a la informática, pueden estar geográficamente separados dentro de una planta o incluso en plantas diferentes.

La solución

La solución es una red de masa mallada; y esto por varias razones:

- La lucha contra los campos electromagnéticos de rayo

El rayo puede caer directamente en el edificio. En este caso, si se utiliza un solo conductor para la bajada del pararrayos (de varilla), la corriente de rayo va a provocar:

- la aparición de un campo magnético muy importante en el edificio,
- un campo eléctrico pulsante debido a la elevada tensión desarrollada en el conductor de

bajada
$$v = \ell L \frac{di}{dt}$$

La solución es el mallado vertical: un conductor de bajada cada 10 metros, por ejemplo.

La ventaja es la distribución de las corrientes y por tanto de los campos magnéticos y la autoatenuación de éstos en el interior del edificio puesto que se oponen entre sí.

El rayo también puede caer en las proximidades del edificio. En este caso para proteger las instalaciones interiores de los edificios hay que formar una caja de Faraday y por tanto unir el mallado vertical con un mallado horizontal (**figura 14**).

Si se considera que el espectro de frecuencias del rayo (**figura 15**) es, especialmente desde el punto de vista energético inferior a 1 MHz, y que la caja de Faraday es eficaz para un paso de $\lambda/30$, la malla debe tener un lado de

$$\frac{c}{30f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^7} = 10 \text{ m.}$$

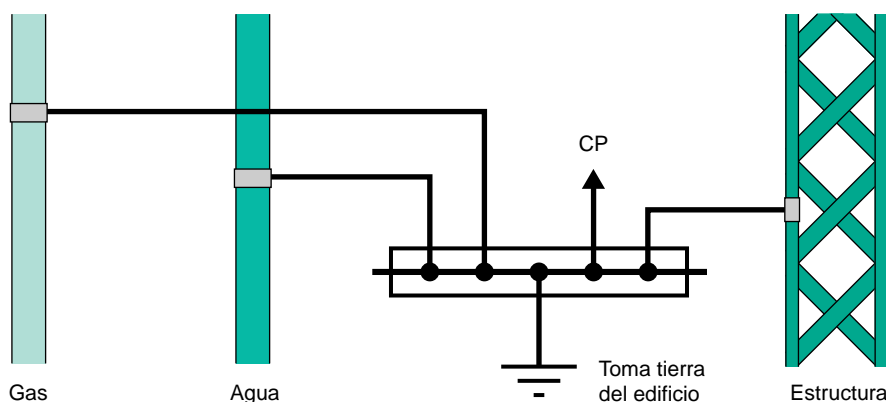


Fig. 13: Conexión de todas las masas a la red equipotencial principal.

■ A nivel local el plano de masa reduce los campos electromagnéticos

Si un equipo sensible o una red o bus de comunicaciones está colocada sobre una superficie conductora, está menos expuesta a los campos electromagnéticos porque desarrolla un campo magnético que se opone al campo perturbador.

Por este motivo las salas de informática están situadas sobre una plancha mallada y los cables de baja intensidad (de señal) se instalan en bandejas metálicas para cables.

■ La minimización de las impedancias de los circuitos de masa entre dos puntos cualesquiera
La impedancia de un conductor de cobre aumenta con la frecuencia de la corriente que transporta (inductancia y efecto pelicular). Así a 1 MHz, Z es del orden de 10 Ω por metro. Si la corriente perturbadora puede tomar diversos caminos, la equipotencialidad se mejora mucho.

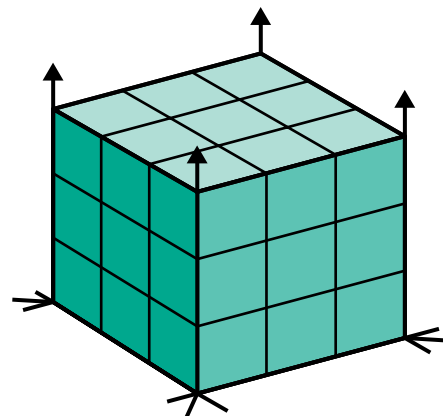
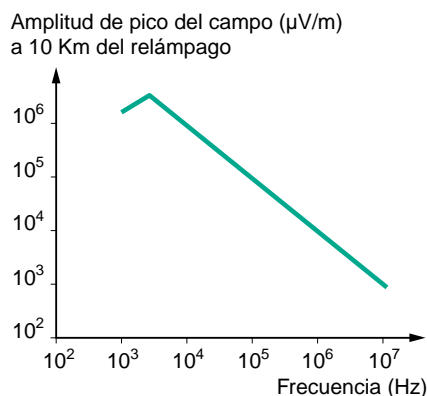


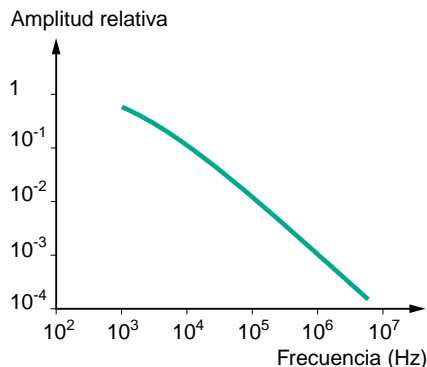
Fig. 14: Mallado horizontal y vertical de un edificio. Constituye una caja de Faraday.

a - Densidad media del espectro de amplitud de los campos electromagnéticos de los relámpagos

(Curva de PIERCE)



b - Espectro de frecuencia de la onda de rayo normalizada (1,2/50 μs)



El arco de retorno es comparable a una antena vertical, de varios kilómetros de alto, recorrido por una corriente de pico de varias decenas de kiloamperios. Esta antena radia un campo eléctrico y un campo magnético que decrecen en 1/D más allá de una distancia

$$d = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f}$$

en la que d = 50 m a 1 MHz.

El arco de retorno es una corriente impulsional cuyo contenido en frecuencias es muy rico (amplio espectro de frecuencias) y muy diferente de un rayo a otro. La **figura 15a** representa la gráfica del espectro medio característico de los relámpagos obtenido a partir de numerosas medidas de campo en varios puntos del mundo.

Los editores de las normas CEI han escogido para las tensiones inducidas sobre las redes eléctricas una onda, llamada 1,2/50 μs, cuyo espectro de frecuencia es el indicado en la **figura 15d**. Se asemeja mucho a la curva de Pierce.

Fig. 15: Espectro en frecuencia del fenómeno electromagnético «rayo».

2.3 Malla entre los circuitos de masas eléctricas y otras masas

Acabamos de ver que los circuitos de puesta a tierra dedicados a la protección de personas están conectados en estrella (arborescente para los conductores de protección) y que para la seguridad de funcionamiento de los sistemas electrónicos era necesario tener un único circuito de masa mallado. Teóricamente estos circuitos pueden estar separados en el edificio incluso si están conectados a la misma toma de tierra.

Aunque las normas definen varios tipos de símbolos para las referencias de potencial (figura 16), en la práctica, pocos aparatos, sistemas eléctricos o electrónicos hacen esta distinción. Por ejemplo, la noción de tierra sin ruido es muy discutida y en vías de desaparición visto el desarrollo de los sistemas de redes y la gran cantidad de interconexiones existentes.

En alta frecuencia, las capacidades parásitas hacen estas distinciones todavía más ilusorias. Por tanto, hay que conectar en los nuevos edificios la red equipotencial de protección (masas eléctricas) y la red equipotencial funcional (otras masas) realizando así una única red de conexión equipotencial. Esta red debe de

asegurar la continuidad de las líneas de protección (CP) para asegurar la protección de las personas. No hay motivo para oponer la red en estrella de las grandes intensidades (potencia) y la red mallada necesaria para los sistemas de baja intensidad (señal). En la práctica, en los edificios ya existentes conviene interconectar las masas entre materiales sensibles (si hay sistemas de comunicación: redes), mejorar la continuidad eléctrica de las bandejas de cables y crear, si es necesario, un plano de masa o planos de masa mallados.

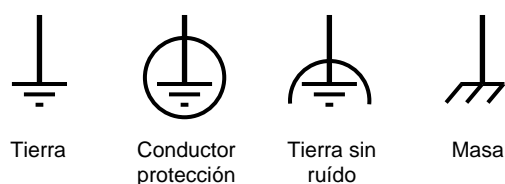


Fig. 16: Ejemplos de símbolos de tierras y masas según NF C 03-202.

3 La CEM de los aparatos no intercomunicados

El término «no intercomunicado» significa que no hay ninguna línea de conexión de baja intensidad (señal) que entre o salga del aparato. El calificativo «aislado» no se puede utilizar porque este aparato está alimentado por la red eléctrica conectado a su entorno eléctrico a través de las capacidades parásitas e influido por los campos electromagnéticos. Éste es el caso, por ejemplo, de un ordenador (sin su impresora).

Este caso es aparentemente simple porque los constructores deben de respetar las normas que fijan los límites de emisión y los niveles de inmunidad.

Sin embargo puede ser necesario tomar precauciones especiales cuando el entorno electromagnético es muy agresivo o cuando hay receptores muy sensibles en su proximidad.

Estas precauciones son indispensables frente a los riesgos de autoinducción, por la presencia de campos radiados y por las perturbaciones conducidas debidas a grandes intensidades de corriente.

3.1 Perturbaciones autoinducidas

La electrónica de potencia se aplica en muchos equipos modernos; citemos, por ejemplo, las alimentaciones conmutadas que se utilizan muchísimo, tanto en el sector doméstico como en el terciario y el industrial.

En la **figura 17** se esquematiza una alimentación conmutada y se indican las perturbaciones que puede producir.

Estos equipos utilizan transistores de potencia que conmutan a varias decenas de kHz, incluso para pequeñas potencias, con valores muy elevados de di/dt y dV/dt (algunas centenas de amperio por microsegundos, por ejemplo).

La CEM intrínseca es imprescindible para un funcionamiento correcto; generalmente el propio fabricante la prevé, diseña y prueba mediante

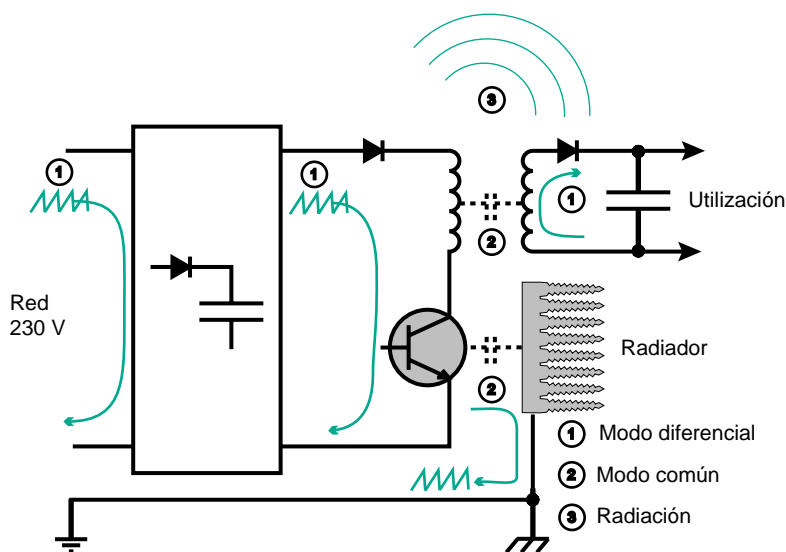


Fig. 17: Diversas perturbaciones producidas por una alimentación conmutada.

tests adecuados, entre otros, el trazado de las pistas de circuito impreso en las tarjetas (**figura 18**), la limitación de capacidades parásitas, los blindajes, los filtros AF junto a la entrada de red, la distancia de los cables perturbadores, etc.

Sin embargo hay riesgo de perturbaciones debidas especialmente a la instalación de

aparatos que, con excesiva frecuencia, no cumplen con los ensayos normativos; por ejemplo, conexiones de puesta a masa insuficientes, demasiado largas y propicias a producir acoplamientos por impedancia común, etc.

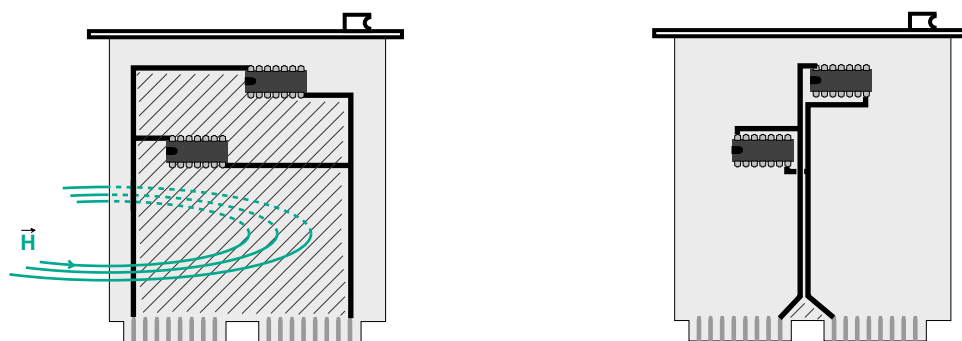


Fig. 18: Acoplamientos inductivos debidos a la presencia de bucles. La figura de la izquierda muestra dos grandes bucles para alimentación de dos circuitos; es preferible la figura de la derecha.

3.2 La exposición a los campos radiados

Campos eléctricos

Por efecto antena, los campos eléctricos del ambiente afectan a los aparatos víctima y a los circuitos (50 Hz) que los alimentan.

Entre las medidas para evitarlo se pueden citar:

- minimizar el efecto antena (por ejemplo no ha de haber conductores sueltos, con los extremos libres o conductores próximos a las masas),
- utilizar filtros de AF en el cable de alimentación para bloquear las perturbaciones inducidas entrantes,
- minimizar las capacidades parásitas haciendo, por ejemplo, aberturas de dimensiones reducidas en las tarjetas.

Campos magnéticos

La atenuación producida por los blindajes depende fundamentalmente de la absorción. Ésta es inversamente proporcional al grosor de la capa (δ); para el acero es de 0,07 mm a 30 kHz y de 1,7 mm a 50 Hz. Pero ¡es de 10 mm para el cobre a 50 Hz! (la atenuación es de 8,7 dB para un grosor de metal $e = \delta$).

Esto demuestra que los blindajes eficaces en baja frecuencia son difíciles y costosos de hacer,

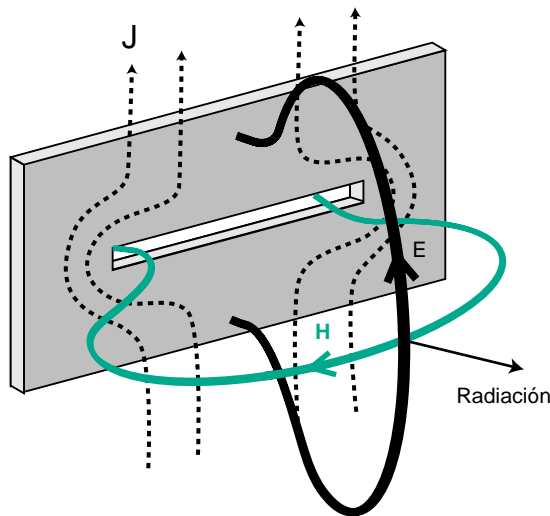
además ciertas aberturas u orificios dejan pasar la inducción por efecto de dipolo magnético (**figura 19**).

Los campos magnéticos que entran en una envolvente y/o los producidos dentro de un armario por las grandes intensidades (potencia) inducen en los bucles tensiones en modo común y en modo diferencial.

¡Nótese que las perturbaciones conducidas de origen magnético BF que llegan a través del cable de alimentación son difícilmente atenuadas mediante los filtros clásicos calificados «AF»!

En los edificios, los campos magnéticos radiados tienen diversos orígenes; puede citarse el rayo, el flujo de dispersión de los transformadores, los circuitos de alimentación y de utilización de los convertidores estáticos, así como los conductores de protección en régimen de neutro TN-C. Este es el caso que se representa en la **figura 20**.

Pongamos el caso de un grupo de cables de potencia dentro de un bajante en el interior de un edificio. El régimen de neutro utilizado es la puesta a neutro (TN-C), por tanto, el conductor de protección (CP), que es también el conductor neutro (N), está recorrido permanentemente por



Una abertura de longitud ℓ en una pantalla se comporta como un dipolo de la misma longitud (principio de Babinet) y vuelve a radiar al otro lado de la pantalla una parte del campo incidente. Esta transparencia de la abertura se convierte en total cuando $\ell \geq \lambda/2$. Por debajo de su frecuencia de resonancia, es decir, cuando $\ell < \lambda/2$, lo que es la condición que se produce en el caso de fenómenos de baja frecuencia, la abertura puede asimilarse a una inductancia que vale alrededor de 1 nH/cm. Una corriente superficial, J, cortada por una abertura de este tipo, produce entre sus bordes una d.d.p. y deja pasar un campo magnético a través de ella. Entonces radia un campo eléctrico E perpendicular al campo magnético H (que es preponderante) paralelo a su longitud.

Fig. 19: Acoplamiento a través de una ranura.

la corriente de desequilibrio de las cargas (de neutro) incrementada por las corrientes armónicas de 3^{er} rango y sus múltiplos. Estas corrientes armónicas tienen cada vez más importancia debido a la utilización de cargas no lineales como los convertidores estáticos y especialmente la alimentación conmutada.

Debido a la corriente que se induce en las estructuras metálicas del edificio, la suma vectorial de las corrientes en el cable no es cero.

Esta corriente diferencial, que puede ser de varias decenas de amperios, producirá, a una distancia d un campo magnético perturbador $H = I/2\pi d$.

A título de ejemplo, una corriente de 63 A produce a 10 m un campo de 1 A/m, que es suficiente, por ejemplo, para afectar a los tubos de rayos catódicos, pero también puede afectar a ciertos componentes magnéticos supuesto que los «blindajes» AF no bloqueen los campos magnéticos BF. Recuérdese que el campo magnético desarrollado en caso de defecto de aislamiento, siempre en esquema TN, es muy importante ($I_d = I_{CC}$).

Las formas de hacer frente a los campos magnéticos de baja frecuencia son, entre otras:

- el distanciamiento,
- los cables de potencia integrados: fase, neutro y conductor de protección (los cables unifilares deben de evitarse por todos los medios),

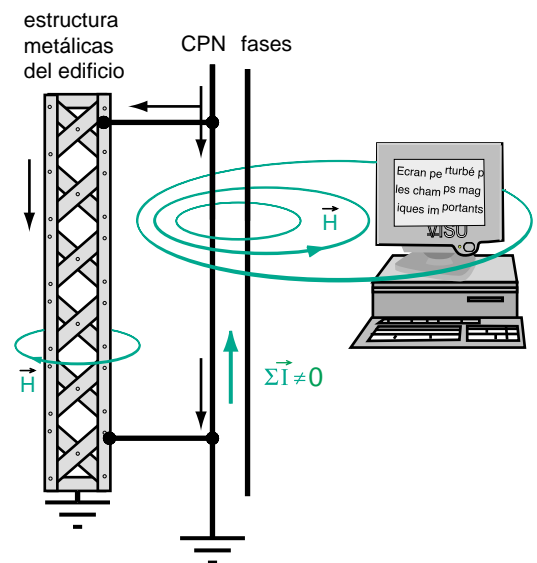


Fig. 20: Radiación magnética debida a la corriente de neutro o de defecto en esquema TN-C.

- una elección adecuada de régimen de neutro,
- bandeja metálica de cables (plano reductor),
- la utilización de envolventes mecánicas, preferentemente ferromagnéticas.

3.3 Las perturbaciones conducidas

La impedancia de los cables ($L = 1 \mu\text{H/m}$) limita mucho los valores de las perturbaciones de más de 1 MHz.

Por tanto, son perturbaciones perjudiciales sobre todo los armónicos, las sobretensiones de maniobra y las tensiones y corrientes de rayo.

■ Las tensiones armónicas son en general poco perjudiciales para los aparatos no intercomunicados; pueden afectar, por ejemplo, a los rectificadores controlados (por el defasaje de paso por cero sirve de referencia de fase),

■ las corrientes armónicas pueden producir perturbaciones conducidas por diafonía inductiva,

■ las sobretensiones de maniobra y de rayo pueden provocar en los diversos equipos alteraciones en su funcionamiento y hasta su destrucción. Entre las diversas formas para evitarlo están la instalación de limitadores de sobretensiones, los supresores de ondas con filtros incorporados, los pararrayos, los transformadores apantallados; estos últimos atenúan las perturbaciones AF, pero sobre todo bloquean las tensiones de BF en modo común.

4 La CEM de los aparatos electrónicos intercomunicados

Los sistemas de comunicaciones o conectados a redes de datos son más sensibles a las perturbaciones que los no interconectados, porque las líneas de conexiones digitales son señales muy débiles y por lo tanto más expuestas a las radiaciones generadas por impedancia común y radiantes. Las señales digitales son especialmente sensibles a los fenómenos transitorios.

Su susceptibilidad aumenta con la longitud de las conexiones y la multiplicación de fuentes perturbadoras.

Por lo que se refiere a las perturbaciones de frecuencia inferior a 1 MHz, los fenómenos especialmente significativos a tener en cuenta son también aquí los relacionados con la señal de 50 Hz y sus armónicos junto a las sobretensiones de maniobra y el fenómeno del rayo.

Las sobretensiones de maniobra son generalmente de modo diferencial y deben de estar bloqueadas a la emisión utilizando limitadores de sobretensión (circuitos RC, limitadores ZnO...).

En este Cuaderno Técnico no entraremos más en estos detalles (Cuaderno Técnico nº 179).

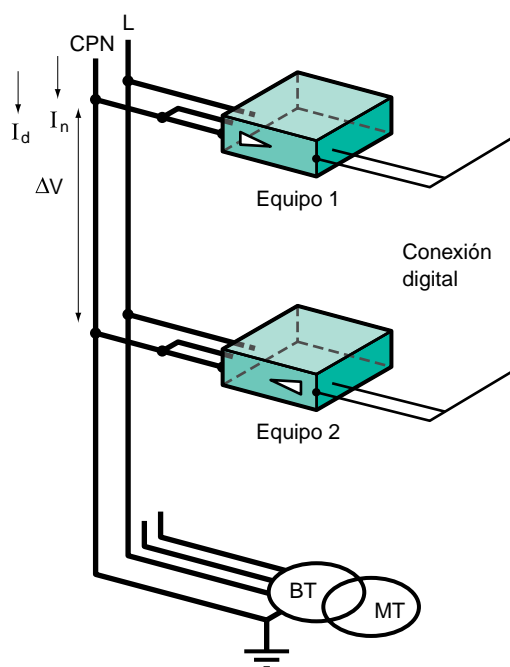


Fig. 21: Esquema TN-C; la corriente de neutro desarrolla diferentes potenciales que afectan a las diferencias de tensión de las conexiones digitales; la corriente de defecto de aislamiento (varios kA) desarrolla un ΔV destructor.

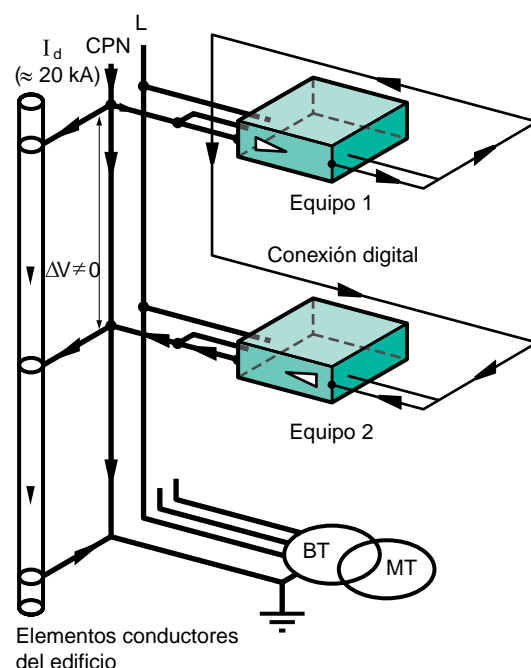


Fig. 22: Esquema TN-C con malla; el ΔV permanente (desequilibrios de neutro, armónicos múltiplos de 3) o temporal (corrientes de defecto) queda atenuado; pero hay «corrientes vagabundas»: riesgo de incendio y campos magnéticos perturbadores incluidos los cables de potencia (figura 20).

4.1 Ejemplo de perturbaciones por impedancia común

Tomemos por ejemplo dos aparatos intercomunicados que forman parte de un «sistema de inteligencia repartida» y que están alimentados por la misma red eléctrica.

Analicemos lo que sucede cuando se produce un defecto de aislamiento (figura 21):

En esquema TN-C, si no hay malla, el defecto de aislamiento provoca la circulación de una corriente de cortocircuito I_d .

La caída de tensión ΔV en el conductor de equipotencialidad eléctrica puede sobrepasar la mitad de la tensión simple (sección del conductor de protección < sección fase). Esta tensión está entre las masas de los dos aparatos, lo que distorsiona la comunicación e incluso la imposibilita, si no hay protecciones adecuadas en los emisores/receptores de la conexión digital. En efecto, si el cable de señal es coaxial, el ΔV se aplica en modo diferencial. Las figuras 22, 23 y 24 indican lo que sucede en caso de mallado de masas con diversos esquemas de conexión a tierra (en el 2º defecto en esquema IT los riesgos son idénticos a los que tiene el esquema TN-S).

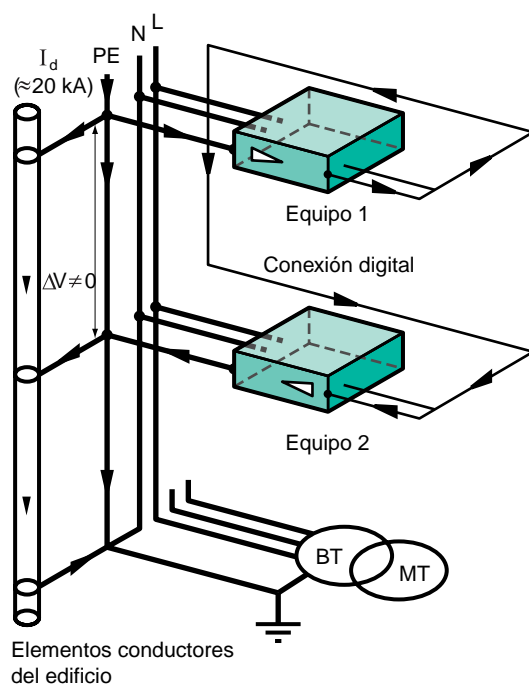


Fig. 23: Esquema TN-S: ΔV temporal; la corriente de defecto en el cable de protección afecta temporalmente a la equipotencialidad; puesto que el CP está conectado a las estructuras hay distribución de corriente y de campos magnéticos como en la figura 20.

Nótese que si el mallado de todas las masas es muy denso, el problema de la ΔV no se da en régimen TN, pero la corriente de defecto de aislamiento es entonces superior a la I_{cc} trifásica (impedancia del circuito de retorno de neutro muy baja).

En conclusión ¿qué hay que hacer en el caso de edificios ya existentes o nuevos que no disponen de un mallado de masas suficiente?

- evitar los regímenes de neutro que producen una corriente de cortocircuito en caso de defecto de aislamiento (figura 24),

- distribuir las corrientes de defecto conectando las masas a las estructuras metálicas de los edificios y en un número importante de puntos. Con esto la ΔV quedará minimizada, pero hay que controlar la radiación de los cables de potencia, incluido el CP (campos radiados en el capítulo anterior),

- para las conexiones del circuito de red digital utilizar preferentemente pares trenzados blindados; la corriente que circula por el blindaje tiene un efecto limitado dada la baja impedancia de transferencia.

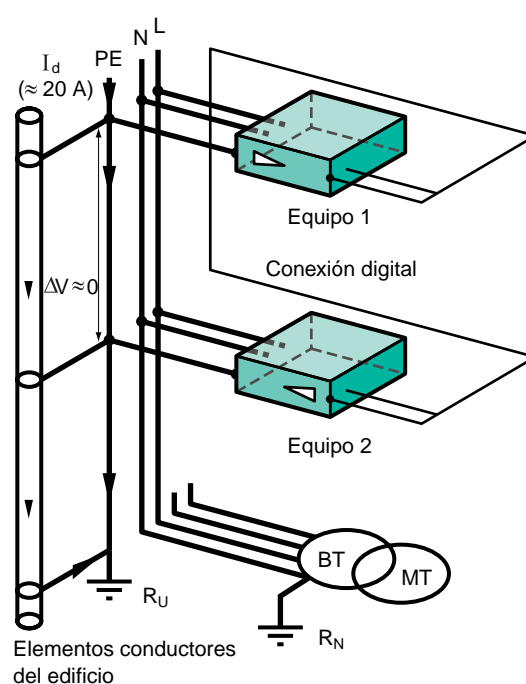


Fig. 24: Esquema TT. La pequeña corriente del conductor de protección CP no afecta a la equipotencialidad de las referencias de potencial electrónicas de los sistemas de redes, (R_{CP} pequeña respecto a R_U y R_N ; e I_d también baja) los campos magnéticos y los ΔV son 1000 veces más pequeños que en TN-C o TN-S.

4.2 Ejemplo de perturbación por radiación

Tomemos por ejemplo el caso de dos ordenadores conectados en red (**figura 25a**) y examinemos lo que sucede cuando cae un rayo.

Supongamos que el rayo cae a 200 m del edificio con un di/dt de $25 \cdot 10^9$ A/s

($\hat{I} = 25$ kA; $t_m = 1$ μ s).

Si el bucle formado por la red de 50 Hz y las conexiones digitales (**figura 25a**) tiene una superficie de 50 m² al campo impulsional, la fuerza electromotriz inducida es de:

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 S \frac{dH}{dt} = \frac{\mu_0 S}{2\pi d} \frac{di}{dt}$$
$$e = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{2\pi \cdot 200} \cdot 25 \cdot 10^9 = 1,25 \text{ kV}$$

Esta fuerza electromotriz es perjudicial para los circuitos emisores receptores digitales y si el bucle está cerrado es la corriente resultante la que de hecho va a provocar desperfectos.

¿Cuál es la solución?

Minimizar la superficie de los bucles, de cables de potencia y de cables de señal. En efecto, si el bucle está abierto, la tensión peligrosa para los sistemas electrónicos se desarrolla, y si está cerrado, la corriente inducida (inductancia de transferencia) perturbará a la señal y hasta podrá destruir los circuitos emisores-receptores de datos. La **figura 25a** indica que el bucle puede tener grandes dimensiones.

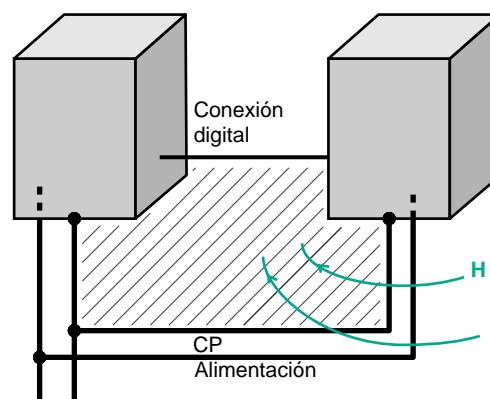
Instalar un conductor de acompañamiento o colocar los cables en una bandeja de cables o dentro de un tubo metálico (**figura 25b**) permite minimizar la superficie del bucle.

Pero hay que ir con cuidado, porque de esta manera se crea un bucle entre las masas. La conexión conductora entre dos equipos con sistema de comunicación debe hacerse de baja impedancia para no desarrollar tensiones inducidas entre las masas de los equipos intercomunicados (evitar las colas de cerdo)... Hay que indicar que si esta impedancia de conexión es baja, pasará por ella en caso de defecto de aislamiento, una parte importante de la corriente de defecto.

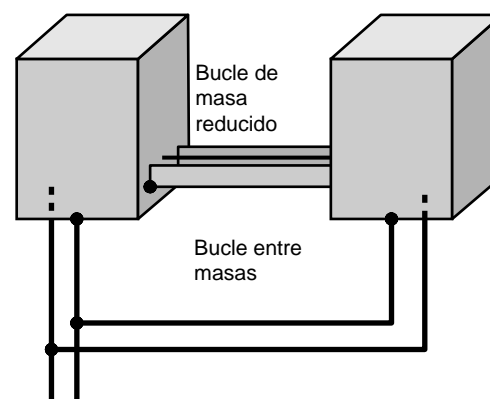
La solución es otra vez un buen mallado de las masas lo más denso posible para distribuir las corrientes y/o un régimen de neutro con baja corriente de defecto.

En todos los casos es posible aplicar la solución de la **figura 25c** en la que el bucle de corriente de alta/baja intensidad (potencia/señal) queda

a - Bucle formado por la red y la línea digital



b - La bandeja de cables, conectada a la masa de dos aparatos, minimiza el efecto de la corriente inducida con la conexión digital.



c - Utilización de bandejas de cables paralelas para la alimentación y para las conexiones digitales: bucles reducidos, planos reductores y efectos atenuados por la malla.

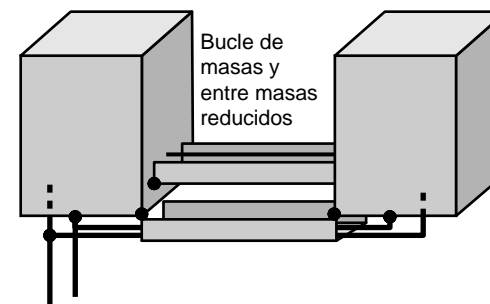


Fig. 25: Perturbaciones de una conexión digital debido a un bucle inductivo y su solución.

suprimido y por tanto también el bucle de masas. En esta solución hay tres conductores en paralelo, las dos canalizaciones de cables y el conductor de protección (CP). A ser posible, las canalizaciones deben de ser diferentes, seguir el mismo trayecto y estar cercanas. Es el caso por ejemplo de un montante en columna. En una misma planta (y por tanto, con corrientes de distribución de energía menores), los cables de potencia y los cables de señal podrían colocarse en la misma bandeja de cables. (**Figura 26**).

La distancia entre cables de potencia y de señal en una canalización metálica depende de muchos factores:

- inmunidad de los aparatos intercomunicados,
- capacidad de los protocolos de comunicaciones para tratar los mensajes distorsionados,
- longitud del recorrido común,
- intensidad que transportan los cables eléctricos,
- cable con el CP integrado o conductores unipolares,

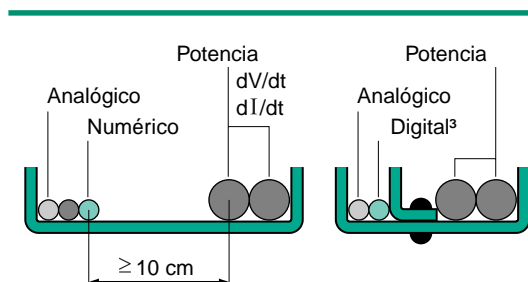


Fig. 26: Separación de los conductores de distinta naturaleza en una misma bandeja de cables.

- características eléctricas de las señales (valor eléctrico, frecuencia, impedancia...).

Los fabricantes de los equipos de comunicaciones defienden una distancia mínima de unos 30 cm, pero solamente un experto puede dar una recomendación en cada caso.

5 Conclusión

Este Cuaderno Técnico ha dejado claro que hay diversos grupos de profesionales afectados por la coexistencia de las corrientes de alta y baja intensidad. No hemos hablado aquí de los programas de los sistemas de comunicaciones (redes) cuyos fabricantes deben de hacer posible el detectar las perturbaciones y solucionarlas. Los técnicos electrónicos, los electricistas expertos en automatismos y los informáticos deben de colaborar para el diseño y realización de las instalaciones.

Los electricistas saben que son preferibles los cables retorcidos blindados, que nunca hay que dejar un conductor al aire, que hay que colocar los cables sobre superficies metálicas equipotenciales, que hay que evitar los blindajes en forma de cola de cerdo y que hay que prestar especial atención a la elección e instalación de los prensaestopas. Sin embargo no siempre saben que es aconsejable que los cables de señal sigan el mismo trayecto que los cables de potencia; que las conexiones de cobre entre dos edificios son arriesgadas incluso si sus tierras están conectadas mediante un conductor de 35 mm^2 ($L = 1 \text{ } \mu\text{H/m}$); que el mallado de masas, aunque necesario, puede tener ciertos problemas (por ejemplo, riesgo de incendio en régimen TN-C).

Los electricistas se extrañan de la diferencia entre circuitos de protección y circuitos de

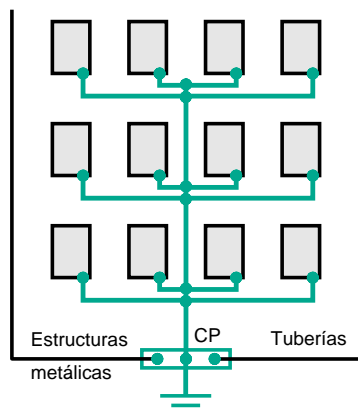
masa. No siempre entienden la importancia del mallado total y no siempre ven el porqué de las conexiones entre masas y que debe cuidarse con especial atención la continuidad eléctrica de las canalizaciones y bandejas metálicas de los cables.

También indica este Cuaderno que los aparatos no intercomunicados deben diseñarse siguiendo las leyes del arte y respetando, además, las normas de emisión y de inmunidad; en realidad no están menos afectados por las perturbaciones y los acoplamientos descritos, y, si se ignoran estos peligros, pueden estar mal diseñados.

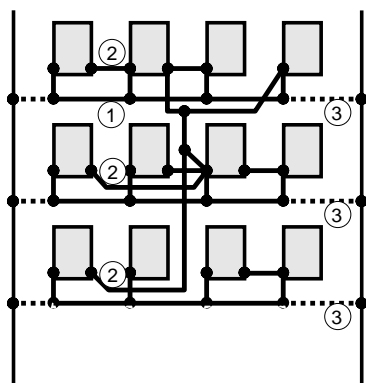
En los edificios, los sistemas de redes, cada vez más abundantes y extensos, tienen realmente el problema de la coexistencia de las corrientes de alta y baja intensidad. Los bucles inductivos deben de evitarse o puentearse mediante masas de acompañamiento. Tanto a nivel de plantas como entre los diversos pisos de un edificio hay que intentar conseguir la mejor equipotencialidad posible entre las masas tanto en BF como en AF: por esto es necesario el plano reductor y el mallado entre masas. En todos los casos es fundamental efectuar una buena instalación de las bandejas, canaletas y soportes metálicos de cables.

La **figura 27** da la visión del electricista y la del experto en CEM y propone una solución mínima y de poco coste para los edificios ya existentes.

Seguridad eléctrica

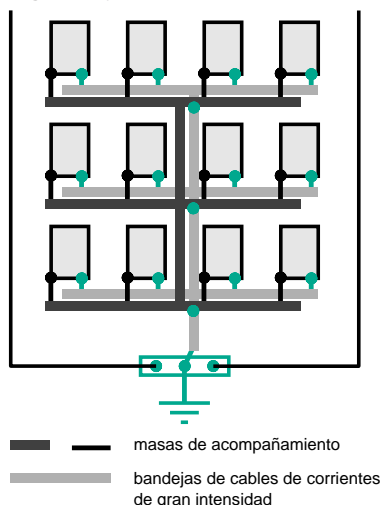


Equipotencialidad CEM



- (1) Conductor de equipotencialidad alrededor de la planta.
- (2) Blindaje o conductor de acompañamiento, bandeja de cables metálica.
- (3) Conductor de equipotencialidad suplementaria.

Seguridad y CEM



- masas de acompañamiento
- bandejas de cables de corrientes de gran intensidad

a - Red equipotencial de protección en forma de bus (entre plantas) y en forma de estrella (en cada planta). Igual que para la distribución eléctrica

- Objetivo: seguridad de las personas/contacto indirecto.
- Atributos:
 - no hay bucle de masas,
 - es posible el cálculo de las corrientes de defecto,
 - encaminamiento controlado de la corriente de defecto,
 - baja impedancia a 50 Hz pero alta en AF.

b - Red de masas mallada

- Objetivo:
 - equipotencialidad en AF,
 - baja impedancia en BF y en AF.
- Cualidades:
 - encaminamiento aleatorio y múltiple de las corrientes de defecto a 50 Hz y de neutro (TN-C) porque las masas están conectadas al CP,
 - bucles de masas pequeños (AF),
 - aumento de la corriente de defecto en TN.

Nota: especialmente en AF, el mallado, para ser eficaz, debe de ser muy denso.

Las conexiones de tipo 3, si están hechas, crean bucles entre las masas que van a afectar a los aparatos situados en plantas diferentes.

Así, si se han hecho este tipo de conexiones, hay que multiplicar el número de conexiones equipotenciales entre plantas para minimizar la superficie de los bucles entre masas.

c - Red equipotencial mínima de protección y de masas. Utilización óptima de las bandejas de cables

- Objetivos: los de las figuras 27a y 27b.
- Cualidades:
 - suprime los bucles formados entre los circuitos de corrientes de alta y baja intensidad (circuitos de potencia y circuitos de señal) y los bucles de masa,
 - equipotencialidad AF,
 - equipotencialidad BF (si I_d es baja),
 - no hay corrientes vagabundas,
 - efecto de plano reductor/campos EM.
- En los pisos superiores, hay que prever conexiones de tipo 3 si el material eléctrico se encuentra a menos de un metro de las estructuras metálicas exteriores del edificio.

Nota:

- puede completarse con planos de masas locales mallados,
- no se prohíben conexiones directas entre dos receptores próximos (con conductor de acompañamiento),
- dentro de una misma planta, puede ser suficiente una única bandeja de cables,
- la columna montante colocada en el centro limita las influencias exteriores.

Fig. 27: Búsqueda de la equipotencialidad en BF y AF.

Bibliografía

Normas

- CEI 61 000-4: Compatibilidad Electromagnética (CEM) - Técnicas de ensayo y medida, sección 2 a 16.
- Directiva Europea CEM 89/336/CEE.
- UTE C 90-490: Recomendaciones para el cableado de inmuebles inteligentes. Octubre 1995.
- UTE C 15-900: Instalación y cohabitación de redes de potencia y redes de comunicaciones en las instalaciones de locales de viviendas del sector terciario. Mayo 1999.

Cuadernos Técnicos Schneider

- Las perturbaciones eléctricas en BT. Cuaderno Técnico nº 141. R CALVAS.
- La CEM: la compatibilidad electromagnética. Cuaderno Técnico nº 149. F VAILLANT, J. DELABALLE.

- Perturbaciones de los sistemas eléctricos y los esquemas de conexión a tierra. Cuaderno Técnico nº 177. R. CALVAS

Publicaciones diversas

- La compatibilité électromagnétique. Editions Schneider 07/96. MD1CEM1F.
- Manuel didactique CEM. Editions Schneider 01/96. ART 62920.
- REE (Revue de l'électricité et de l'électronique). Abril 1996.
- REE. Noviembre 1995.