

Junio 2003

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 5: Guías de instalación y atenuación

Sección 2: Puesta a tierra y cableado

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 5: Installation and mitigation guidelines. Section 2: Earthing and cabling.

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation. Section 2: Mise à la terre et câblage

CORRESPONDENCIA

Este informe es equivalente al Informe Técnico CEI 61000-5-2:1997.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

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

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
Capítulos	
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	8
2 NORMAS PARA CONSULTA	8
3 DEFINICIONES	8
4 CONSIDERACIONES GENERALES DE CEM SOBRE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TIERRA Y DEL CABLEADO	10
4.1 Generalidades.....	10
4.2 CEM y requisitos de seguridad (aislamiento) de la instalación	11
4.3 Acceso de los equipos e instalaciones	11
5 PUESTA A TIERRA Y CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL.....	11
5.1 Requisitos relativos a la seguridad	11
5.2 Requisitos relativos a la CEM	12
5.3 Diseño del sistema de tierra	12
6 CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL.....	19
6.1 Generalidades.....	19
6.2 Conductores de conexión equipotencial.....	21
6.3 Conexiones.....	21
6.4 Conexión equipotencial de equipos específicos	22
6.5 Procedimientos destinados a los usuarios	23
7 CABLES Y CONDUCTORES	24
7.1 Generalidades.....	24
7.2 Circuito en modo diferencial y en modo común, impedancia de transferencia Z_t	25
7.3 Reglas de CEM para la instalación de los cables y conductores.....	27
7.4 Tipos de cables y su utilización en el contexto de la CEM	29
7.5 Tipos de conductores de tierra paralelos (PEC)	29
7.6 Empalme y conexión a tierra de cables y conductores de tierra paralelos	32
7.7 Topología general del cableado	34
7.8 Haces de cables.....	36
7.9 Cables que alimentan accesos de potencia.....	36
7.10 Cables que alimentan accesos de señal o control	37

8	OTROS MÉTODOS DE ATENUACIÓN DE LAS PERTURBACIONES	40
8.1	Ferrita en modo común	40
8.2	Separación eléctrica.....	42
9	MÉTODOS DE MEDIDA Y ENSAYO	43
9.1	Puesta a tierra y conexión equipotencial.....	43
9.2	Cables e instalación.....	44

Figuras

1	Demostración del error del concepto de “equipotencialidad” considerado como regla general.....	13
2	Esquema de un electrodo de tierra típico	14
3	Mal diseño de tomas de tierra “especializadas”, “independientes” o “aisladas”	15
4	Concepto de electrodo de tierra único	15
5	Configuración recomendada para los electrodos de tierra y la red de tierra.....	16
6	Bucles que implican a cables de señales y red de tierra.....	17
7	Esquema tridimensional del procedimiento recomendado para la red de tierra.....	17
8	Criterios generales de conexión de las partes conductoras de diferentes equipos o sistemas a la red de tierra.....	18
9	Representación simplificada de un conductor de conexión equipotencial.....	20
10	Representación más realista de un conductor de conexión equipotencial instalado.....	20
11	Conductores típicos de conexión equipotencial.....	21
12	Inductancia relativa de conductores planos y redondos.....	21
13	Inductancia relativa de conexiones equipotenciales redondas, planas y dobles	21
14	Ejemplo de conexión equipotencial constituyendo una conexión protegida amovible	22
15	Ejemplo de conexión equipotencial óptima de un cable blindado	23
16	Esquema de recintos interconectados	23
17	Circuitos en modo común y en modo diferencial con conexiones equipotenciales y cables de señal	25
18	Efectos de la configuración de un conductor de tierra paralelo sobre la impedancia de transferencia.....	30
19	Ranuras en conductos y bandejas de cables	31
20	Configuración recomendada para ramificaciones en un tendido de cables.....	31
21	Posición recomendada para los cables, paralelamente a una viga en H, desde el punto de vista de la CEM.....	32
22	Penetración de un cable blindado por una pared	33
23	Bandeja de cables tabicada	35
24	Ejemplo de superposición de bandejas o tendidos de cables.....	35
25	Topología de circuitos con interruptores	38
26	Conexión a evitar para la unión de un cable coaxial	40
27	Utilizaciones típicas de ferritas en modo común	41
28	Limitaciones en la eficacia de un transformador de aislamiento.....	42
29	Acoplamiento parásito en alta frecuencia.....	43

Anexos

A – EJEMPLOS DE SISTEMAS DE TIERRA E IMPLANTACIÓN DE LOS CABLES	45
B – APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LOS CABLES CON VISTA A MEJORAR LA CEM.....	51
C – VENTAJAS PRODUCIDAS POR CONDUCTORES SUPLEMENTARIOS SITUADOS PARALELAMENTE A UN CABLE.....	59
D – BIBLIOGRAFÍA	64

Figuras en los anexos

A.1 – Ejemplo de configuración de una red de tierra híbrida	46
A.2 – Recinto CEM que sirve para proteger dispositivos electrónicos sensibles.....	47
A.3 – Sistema de tierra para un controlador con convertidor y equipo electrónico asociado ..	48
A.4 – Sistema de tierra de una red eléctrica incluyendo dispositivos electrónicos de control de vigilancia.....	48
A.5 – Disposición inicial de los cables de alimentación y control	49
A.6 – Diseño mejorado en la conexión de los blindajes	50
B.1 – Transmisión asimétrica de señales	51
B.2 – Comportamiento de Z'_t en función de la frecuencia, para varias configuraciones de cables coaxiales.....	52
B.3 – Sistema de transmisión asimétrico, conectado a tierra en uno de sus extremos.....	53
B.4 – Sistema de transmisión simétrico	53
B.5 – Caminos de corriente en un cable coaxial.....	54
B.6 – Tensión en modo diferencial inducida por un campo magnético en un cable coaxial con pantalla trenzada	55
B.7 – Corrientes en el conductor externo de un cable coaxial	56
B.8 – Cable bifilar perturbado por una toma cercana, a la tensión U_{ext}.....	57
C.1 – Cables coaxiales con conductores de tierra paralelos	59
C.2 – Cable coaxial con dos conductores externos.....	60
C.3 – Impedancias de transferencia en un par blindado equilibrado	61
C.4 – Ejemplo de la variación de la impedancia de transferencia en función de la frecuencia para un conducto de aluminio.....	62
C.5 – Inductancia mutua y campo magnético para un conducto o tendido de cables	62
C.6 – Tapas aisladas situadas en un conducto.....	63

INTRODUCCIÓN

El Informe Técnico CEI 61000-5-2 es parte de la serie 61000 de CEI, estructurada como sigue:

Parte 1: Generalidades

Consideraciones generales (introducción, principios fundamentales)
Definiciones, terminología

Parte 2: Entorno

Descripción del entorno
Clasificación del entorno
Niveles de compatibilidad

Parte 3: Límites

Límites de emisión
Límites de inmunidad (en la medida en que no están bajo la responsabilidad de los comités de producto)

Parte 4: Técnicas de ensayo y medida

Técnicas de medida
Técnicas de ensayo

Parte 5: Guías de instalación y atenuación

Guías de instalación
Métodos y dispositivos de atenuación

Parte 6: Normas genéricas

Parte 9: Varios

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

Estas secciones de la Norma CEI 61000-5 serán publicadas cronológicamente y numeradas en consecuencia.

Las recomendaciones presentadas en este informe técnico se refieren a los aspectos de la instalación asociados a la CEM, y no a la seguridad de esta instalación o a la eficacia del transporte de electricidad en el seno de esta instalación. Estos dos objetivos esenciales son sin embargo tomados en consideración en las recomendaciones relativas a la CEM. Pueden ser implementados paralelamente a los objetivos de mejora de la CEM de equipos o de sistemas sensibles, sin originar conflicto, aplicando las prácticas recomendadas en este informe técnico y los requisitos de seguridad apropiados como los que figuran en la Norma CEI 60364. Al ser cada instalación única, corresponde al responsable del diseño elegir las recomendaciones más apropiadas a una instalación particular, y asegurarse de la puesta en práctica de estas recomendaciones por el instalador.

Es importante observar que las recomendaciones indicadas en este informe técnico no pretenden impedir las prácticas de instalación existentes, cuando se ha demostrado que funcionan satisfactoriamente. Puede no ser necesario adoptar métodos de atenuación especiales cuando los equipos considerados satisfacen las normas de emisión y de inmunidad apropiadas. En particular, algunas prácticas de instalación, tales como las de la “red en estrella” o “red de masa aislada para puesta a tierra”, abordan la CEM de forma diferente, pero se comprueban satisfactorias con relación a instalaciones específicas cuando son objeto de una aplicación correcta y del **mantenimiento de la topología** por especialistas competentes. El procedimiento recomendado en este documento es sin embargo aplicable generalmente a todos los tipos de instalaciones, en particular cuando son intercambiadas señales entre diferentes equipos.

Los capítulos 1 a 3 presentan informaciones generales comunes a los documentos de la serie CEI 61000 sobre la CEM.

El capítulo 4 constituye un resumen general y una introducción al procedimiento global para la aplicación de los conceptos CEM en el diseño de las instalaciones.

El capítulo 5 expone recomendaciones relativas al diseño y a la puesta en práctica de los sistemas de tierra, incluidos el electrodo de tierra y la red de tierra.

El capítulo 6 presenta informaciones básicas sobre el diseño y realización de la conexión equipotencial de equipos o de sistemas a tierra o a la red de tierra.

El capítulo 7 contiene recomendaciones sobre la elección y las prácticas de implantación y de conexión de los cables utilizados para la alimentación eléctrica de baja tensión en corriente alterna o continua, para las señales de entrada y de salida de control y de mando, así como para las señales utilizadas en otras formas de comunicación en el interior de los edificios.

El capítulo 8 da informaciones sobre las técnicas de atenuación asociadas.

El capítulo 9 presenta informaciones sobre los métodos de verificación y de ensayo.

Los anexos informativos contienen informaciones sobre los conceptos básicos, incluyendo las fuentes bibliográficas de donde han sido extraídas las recomendaciones de este informe técnico.

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 5: Guías de instalación y atenuación
Sección 2: Puesta a tierra y cableado

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este informe técnico (tipo 3) presenta recomendaciones relativas a la puesta a tierra y el cableado de los sistemas e instalaciones eléctricos y electrónicos, destinadas a garantizar la compatibilidad electromagnética (CEM) entre los equipos o sistemas eléctricos y electrónicos. Contiene particularmente las prácticas de puesta a tierra y los cables utilizados en los entornos industriales, comerciales y residenciales. Este informe técnico está destinado a ser utilizado por los instaladores y los usuarios y, en cierta medida, por los fabricantes de instalaciones y de sistemas eléctricos o electrónicos sensibles, así como de equipos que presentan niveles altos de emisión susceptibles de degradar el entorno electromagnético (EM) general. Se aplica principalmente a las instalaciones nuevas. Sin embargo, cuando las condiciones económicas lo permiten, puede igualmente aplicarse en caso de trabajos de ampliación o de modificación de instalaciones existentes.

2 NORMAS PARA CONSULTA

CEI 60050(161):1990 – *Vocabulario electrotécnico internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética.*

CEI 60050(826):1982 – *Vocabulario electrotécnico internacional (VEI). Capítulo 826: Instalaciones eléctricas de edificios.*

Modificación 1: 1990

Modificación 2: 1995

CEI 61000-2-5:1995 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 5: Clasificación de los entornos electromagnéticos. Publicación básica CEM.*

CEI 61000-5-1:1996 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 5: Guías de instalación y de atenuación. Sección 1: Consideraciones generales. Publicación básica CEM.*

CEI 61024-1:1990 – *Protección de las estructuras contra el rayo. Parte 1: Principios generales.*

ISO/CEI 11801:1995 – *Tecnologías de la información. Cableado genérico de los locales de usuarios.*

Es conveniente observar que se enumeran otras normas en la bibliografía del anexo informativo D. Esta bibliografía incluye otras normas utilizadas en la elaboración de este informe, así como documentos citados en apoyo de una recomendación y documentos sugeridos como fuente complementaria de información.

3 DEFINICIONES

Para el propósito de este informe técnico, se aplican las definiciones de las Normas CEI 60050(161) y CEI 60050(826), así como las definiciones siguientes.

Se da una lista de las abreviaturas al final de este capítulo.

3.1 conexión equipotencial: Acción de conectar conjuntamente las partes conductoras accesibles y las partes conductoras externas de equipos, sistemas o instalaciones que están esencialmente a un mismo potencial [nuevo, GT2].

NOTA – Por razones de seguridad, un enlace equipotencial implica generalmente (pero no necesariamente) una conexión al sistema de puesta a tierra más próxima.

3.2 tensión en modo común: Media de los fasores que representan las tensiones entre cada conductor y una referencia especificada, generalmente la tierra o la masa [VEI 161-04-09].

3.3 conversión en modo común: Producción de una tensión en modo diferencial en respuesta a una tensión en modo común [VEI 161-04-10].

3.4 circuito en modo común: Conjunto del bucle de corriente o del circuito cerrado recorrido por la corriente en modo común, incluyendo el cable, el equipo, y las partes cercanas del sistema de puesta a tierra [nuevo, GT2].

3.5 tensión en modo diferencial: Tensión entre dos conductores dados de un conjunto de conductores especificado [VEI 161-04-08].

3.6 circuito en modo diferencial: Conjunto del bucle de corriente o del circuito cerrado destinado a conducir una señal o energía, incluyendo un cable y el equipo que está unido a él en los dos extremos [nuevo, GT2].

NOTA – Los términos “modo normal” y “modo en serie” se utilizan a veces en lugar del término “modo diferencial”.

3.7 nivel de perturbación (electromagnética): Nivel de una perturbación electromagnética existente en un sitio dado y que resulta de la contribución de todas las demás fuentes de perturbación [VEI 161-03-29].

3.8 unión equipotencial: Unión eléctrica que une a un potencial sustancialmente igual, partes conductoras accesibles y partes conductoras externas [VEI 826-04-09].

3.9 tierra: Masa conductora de la tierra, cuyo potencial eléctrico en cualquier punto se toma, por convenio, igual a cero [VEI 826-04-01].

3.10 electrodo de tierra: Parte conductora, o conjunto de partes conductoras en contacto íntimo con tierra y que asegura un enlace eléctrico con ésta [VEI 826-04-02].

3.11 red de tierra: Conjunto de los conductores del sistema de puesta a tierra, sin contacto con el suelo, que conecta los equipos, sistemas o instalaciones electrodo de tierra o a otros medios de puesta a tierra [nuevo, GT2].

3.12 puesta a tierra: Acción de unir partes metálicas accesibles de equipos, sistemas o instalaciones a electrodo de tierra o a otros elementos del sistema de puesta a tierra [nuevo, GT2].

3.13 sistema de tierra: Circuito eléctrico tridimensional que efectúa la puesta a tierra [nuevo, GT2].

NOTA – El sistema de tierra comprende dos partes: el electrodo de tierra y la red de tierra.

3.14 electrodos de tierra eléctricamente distintos: Electrodos de tierra suficientemente alejados unos de otros para que la corriente máxima susceptible de recorrer por uno de ellos no modifique sensiblemente el potencial de los otros [VEI 826-04-04].

3.15 nivel de compatibilidad (electromagnética): Nivel de perturbación electromagnética especificado utilizado como nivel de referencia para asegurar la coordinación del establecimiento de los límites de emisión y de inmunidad [VEI 161-03-10].

3.16 instalación: Cualquier cosa (como un hospital, una fábrica, una máquina...) que está construida, instalada o destinada a efectuar una función particular o a servir o alcanzar un fin particular [nuevo, GT2].

3.17 margen de inmunidad: Relación del límite de inmunidad con el nivel de compatibilidad electromagnética [VEI 161-03-16].

3.18 nivel de inmunidad: Nivel máximo de una perturbación electromagnética dada, que incide sobre un dispositivo, equipo o sistema particular de una manera especificada, de forma que no produzca ninguna degradación del funcionamiento [VEI 161-03-14].

3.19 conductor de tierra paralelo (PEC). Conductor generalmente situado a lo largo del cableado con el fin de constituir una conexión de baja impedancia entre los sistemas de tierra situados en los extremos del cableado [nuevo, GT2].

3.20 acceso: Interfaz específica del equipo especificado con el entorno electromagnético exterior.

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

3.22 impedancia de transferencia (Z_t): Relación de la tensión acoplada en un circuito a la corriente que aparece en otro circuito o en otra parte del mismo circuito [nuevo, GT2].

NOTA 1 – Para este informe técnico, los distintos circuitos pueden ser cables separados físicamente, pero próximos, o bien los mismos cables funcionando en modos diferentes.

NOTA 2 – El cable mismo y el equipo son fuente de diferentes contribuciones localizadas.

3.23 abreviaturas

AF	alta frecuencia	MC	modo común
BF	baja frecuencia	MD	modo diferencial
c.a.	corriente alterna	MI	modo intermedio
c.c.	corriente continua	PEC	conductor de tierra paralelo
CEM	compatibilidad electromagnética	TP	tierra de protección
EM	electromagnético		

4 CONSIDERACIONES GENERALES DE CEM SOBRE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TIERRA Y DEL CABLEADO

4.1 Generalidades

Existen diferentes tipos de normas que definen condiciones de conformidad con los requisitos de compatibilidad electromagnética aplicables a los productos eléctricos y electrónicos, que van desde las normas básicas a las normas de producto específicas. Sin embargo, estas normas no son forzosamente suficientes o apropiadas cuando se trata de la CEM aplicada a las instalaciones sensibles. Importa pues establecer recomendaciones de instalación adaptadas al mayor número posible de situaciones. Los métodos de atenuación pueden no ser necesarios cuando el equipo en cuestión posee un o unos niveles de inmunidad suficientes.

En lo que respecta a la CEM, pueden ser tomadas en consideración tres grandes áreas:

- los emisores: fuentes de perturbaciones, influenciados por el diseño del equipo;
- los caminos de acoplamiento: influenciados por las prácticas de instalación;
- los receptores: víctimas potenciales, influenciados por el diseño del equipo.

Según las necesidades, es conveniente poner en práctica tres tipos de medidas para garantizar la CEM:

- en el nivel de la fuente de las perturbaciones: reducción de las emisiones;
- en el nivel de acoplamiento: reducción del acoplamiento;
- en el nivel del receptor: mejora de la inmunidad.

Este informe técnico trata principalmente sobre la atenuación que puede obtenerse por la reducción del acoplamiento debida a prácticas correctas en la realización de la puesta a tierra y de la conexión equipotencial, así como por la elección e instalación de los diferentes cables utilizados en las instalaciones.

4.2 CEM y requisitos de seguridad (aislamiento) de la instalación

Es conveniente observar que la protección referida a la CEM y los requisitos de aislamiento y de seguridad pueden presentar aspectos comunes: la puesta a tierra y la protección contra sobretensiones y los rayos, por ejemplo. Es importante tener presente que los procedimientos de seguridad destinados a garantizar la protección del personal tienen prioridad sobre los procedimientos de protección que recoge la CEM. En algunos casos, se podría pensar que existe un conflicto entre los procedimientos de seguridad y los procedimientos de la CEM. *La seguridad debe prevalecer siempre. En estos casos, es preciso por tanto buscar otras soluciones para la CEM.*

4.3 Accesos de los equipos e instalaciones

Puede ser útil apoyarse en el concepto de acceso, presentado en la Norma CEI 61000-5-1, para establecer una transición entre, por un parte, el concepto general de acoplamiento entre el entorno y el equipo y, por otra, los aspectos específicos de la CEM. La identificación de estos accesos permite presentar medidas de protección específicamente asociadas a la naturaleza del fenómeno EM, su camino de acoplamiento y su incidencia sobre los elementos funcionales del equipo (inmunidad) o sobre el entorno (emisiones).

Las Normas CEI 61000-5 tratan con detalle las prácticas de instalación y de atenuación teniendo en cuenta los accesos y fenómenos CEM asociados. En este informe técnico, los capítulos 5 y 6 tratan del acceso de puesta a tierra, y el capítulo 7 de los accesos de potencia y de señal y control.

5 PUESTA A TIERRA Y CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL

5.1 Requisitos relativos a la seguridad

La función principal de un sistema consiste en asegurar la seguridad del personal y la protección de las instalaciones contra los siniestros. Deben ser tomados en consideración dos fenómenos importantes: los rayos y los fallos de la red eléctrica. Éstos pueden manifestarse por la circulación de corrientes fuertes, susceptibles de generar tensiones peligrosas en las estructuras de la instalación. Es importante observar que estos dos fenómenos son generalmente exteriores a estas instalaciones y que la tierra (el suelo) constituye la única vía de retorno de estas corrientes a su fuente. En algunos países, estas corrientes pueden igualmente transitar por el conductor de neutro.

La amplitud de las corrientes generadas por los fallos de la red eléctrica y los rayos comprende entre algunos amperios y algunas decenas de kiloamperios. En lo que respecta al espectro de la frecuencia, estos dos fenómenos producen señales cuyas frecuencias están comprendidas entre 50/60 Hz y varios megaherzios.

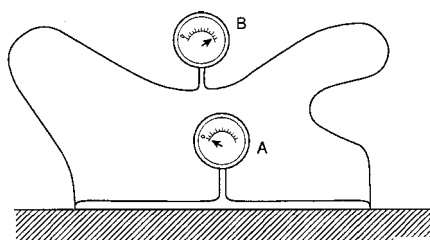
En estas condiciones, el sistema de tierra debe constituir un camino que permita a estas corrientes alcanzar el suelo, manteniendo a un nivel tan bajo como sea posible las diferencias de tensión entre dos puntos dados de una instalación (tensión de contacto y tensión de paso). Las reglamentaciones nacionales especifican generalmente tensiones máximas compatibles con la seguridad del personal y prevén disposiciones para las prácticas que conciernen a los conductores de tierra de protección (PE). Sin embargo, esos conductores no pueden en general satisfacer ellos solos los requisitos de CEM.

En el pasado, se definía generalmente el sistema de tierra en función de la corriente de defecto de la red (Kouteynikoff, 1980 [1]; Kuussaari, 1978 [2]; Lu, 1981 [3])¹⁾. Esta situación ha producido una consecuencia desafortunada: la resistencia de este circuito vino a ser el criterio usual. Este planteamiento es correcto para los fenómenos con frecuencia típica de 50 Hz o 60 Hz, pero no es conveniente para los fenómenos de alta frecuencia, cuando los fenómenos inductivos pueden ser predominantes en el circuito. Hoy, sería preferible caracterizar el sistema de tierra por su impedancia.

5.2 Requisitos relativos a la CEM

La segunda función de un sistema de tierra consiste, para una instalación que lleva sistemas electrónicos y eléctricos sensibles e interconectados, en servir de referencia común para la tensión y en contribuir a la atenuación de las perturbaciones.

Como muestra la figura 1 (caso A), el objetivo de un sistema de tierra que presenta, cualquiera que sea la situación, una referencia absoluta de tensión, sólo puede ser alcanzado en teoría. A veces se intenta describir el objetivo ideal de una diferencia de tensión de cero voltios entre dos puntos dados por medio del término “equipotencial”. De hecho, el concepto de potencial sólo puede ser aplicado en electricidad estática y en corriente continua. En la práctica, la tensión entre dos puntos dados es mayor que cero por la inducción. En el caso B de la figura 1, el camino recorrido por los hilos del voltímetro añade así una tensión inductiva a la tensión próxima a cero del caso A. Igualmente, las conexiones que unen equipos separados por una cierta distancia pero que exigen una referencia común, pueden ser trazadas como en el caso A o como en el caso B. La tensión parásita inducida en el bucle del caso B puede producir entonces una diferencia de potencial que depende del recorrido real de los cables. Incluso cuando la frecuencia es de 50 Hz o 60 Hz, esta situación se encuentra en los sistemas de tierra. En teoría, la tensión de referencia sólo podría concebirse como un plano grande, sólido y buen conductor. Esta condición sólo sería mensurable si los hilos del voltímetro estuviesen situados inmediatamente sobre el plano de referencia. Este concepto será revisado más adelante y aplicado en el capítulo 7.



NOTA – En el caso A, los hilos del voltímetro se mantienen cerca del plano de referencia y la diferencia de tensión indicada por el voltímetro es baja. En el caso B, el largo camino recorrido por los hilos del voltímetro permite la inducción de una tensión de origen exterior en el bucle.

Fig. 1 – Demostración del error del concepto de “equipotencialidad” considerado como regla general, en particular para las altas frecuencias

1) Las cifras entre corchetes remiten al anexo D – Bibliografía.

El sistema de tierra contribuye a la atenuación de las perturbaciones al constituir el camino de retorno de las corrientes entre una fuente de perturbaciones (véase la Norma CEI 61000-2-5 para una relación y descripción de las fuentes) y los equipos o sistemas electrónicos sensibles y también es una referencia de tensión para los dispositivos de protección (filtros, por ejemplo). En otros términos, las perturbaciones pueden ser descritas en términos de corrientes, incluso en caso de campos radiados en los que la energía electromagnética se transforma en corriente por los equipos o sistemas sensibles que funcionan como antenas.

En lo que respecta a la CEM, los equipos o sistemas electrónicos modernos son sensibles a corrientes y tensiones de varios órdenes de magnitud inferiores a los tomados en consideración para la seguridad del personal. Es conveniente tener en cuenta este punto de vista diferente, en particular en el marco de tecnologías que utilizan señales de bajo nivel.

5.3 Diseño del sistema de tierra

Los requisitos mencionados en 5.1 y 5.2, es decir la derivación de las corrientes no deseadas a la frecuencia industrial y de las corrientes a alta frecuencia, por una parte, y la reducción de la diferencia de tensión entre dos puntos de la instalación, por otra, valen también para:

- los rayos;
- la seguridad del personal;
- la protección de la instalación;
- la CEM.

Cada uno de estos cuatro campos a considerar produce restricciones en el diseño:

- los rayos y la seguridad del personal dictan el diseño del electrodo de tierra;
- la seguridad del personal y la protección de la instalación dictan las dimensiones de los conductores de puesta a tierra;
- los requisitos en materia de CEM determinan la topología de la red de tierra.

5.3.1 Electrodo de tierra. La primera etapa del diseño del electrodo de tierra consiste en conocer la resistencia del suelo. Eso depende especialmente de la naturaleza y de la homogeneidad del suelo, de las condiciones climáticas, etc. La resistencia del suelo varía muy fuertemente en función de la naturaleza del suelo: desde algunos Ohmios-metro hasta 10 000 Ω -m. Para más detalles, véase la bibliografía (anexo D).

Es conveniente adaptar la geometría del electrodo de tierra a la importancia de la instalación. Un electrodo de tierra limitado (un cable o una pica, por ejemplo) sólo puede ser utilizado en el caso de instalaciones de muy pequeño tamaño: un local, un equipo o un sistema separado, por ejemplo.

En general, la mejor solución en lo que respecta al electrodo de tierra de los edificios o de las fábricas está constituida por una red mallada enterrada en los cimientos y alrededor del edificio o de la fábrica en cuestión. En los edificios antiguos, para los que este objetivo es difícil de alcanzar, será necesario recurrir a otras medidas y prestar mayor atención a los imperativos de CEM. Es conveniente sin embargo observar que esta recomendación no tiene por objeto rechazar a las prácticas de instalación existentes, cuando han aportado prueba de su eficacia.

La red mallada del electrodo de tierra se completa a menudo por cables radiales y/o picas de tierra situados en los puntos de conexión de los cables que provienen de pararrayos, de equipos o de sistemas de alta tensión y de equipos o sistemas que presentan importantes corrientes de defecto que deben volver a su fuente a través del sistema de tierra.

Por regla general, es conveniente situar el electrodo de tierra en suelo natural, y si es posible en tierra húmeda y no en materiales de terraplenado. La figura 2 da un ejemplo del esquema de principio de un electrodo de tierra para un entorno industrial.

Algunos aspectos prácticos son importantes en la medida en que influyen en la calidad del electrodo de tierra en el transcurso del tiempo:

- Es preferible utilizar conductores sólidos porque éstos están menos sujetos a la corrosión que los conductores trenzados.
- Por la misma razón (corrosión), las conexiones entre los conductores son soldadas y no hechas mediante pinzas mecánicas. Algunos edificios poseen un electrodo de tierra sumergido en hormigón. Este electrodo está alojado en el interior – y en la parte inferior – de un elemento de los cimientos situado en contacto directo con el suelo. Esta solución, que conviene a los edificios residenciales y de oficinas, no cumple necesariamente con los requisitos aplicables a los edificios industriales.

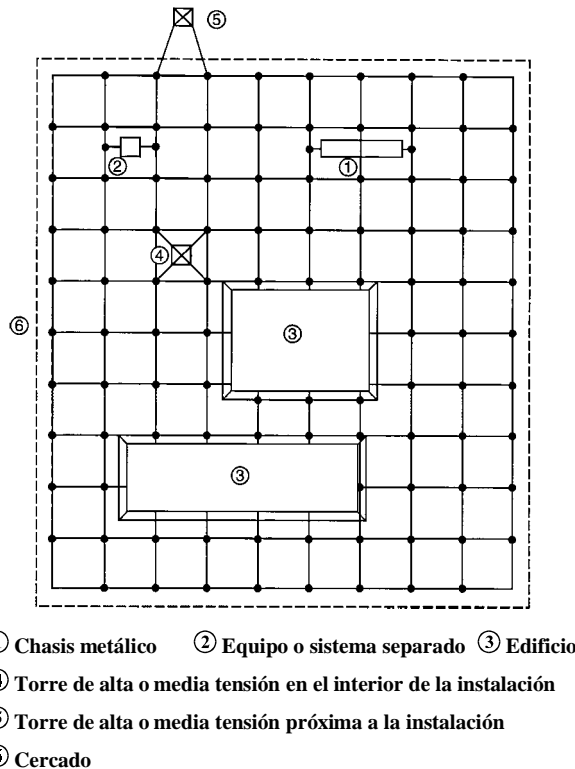
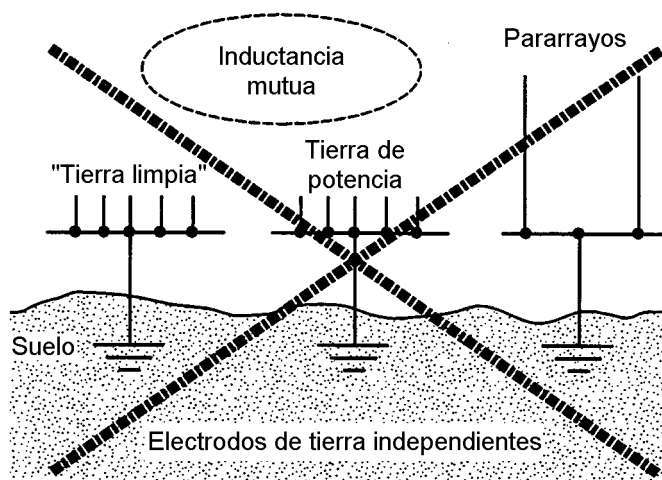


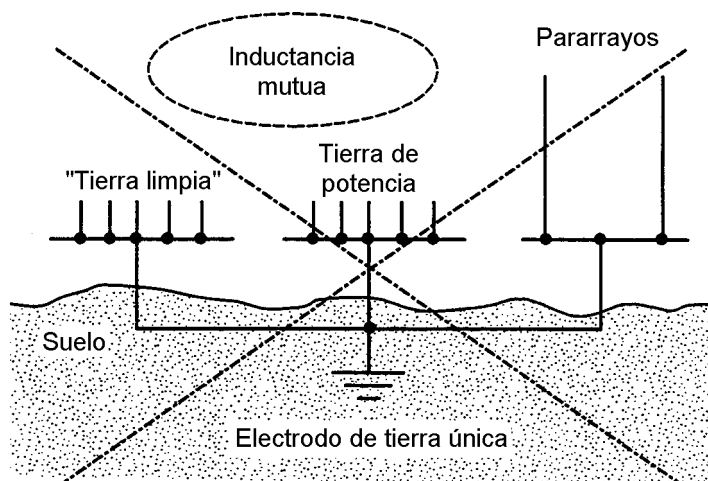
Fig. 2 – Esquema de un electrodo de tierra típico

La utilización de electrodos de tierra independientes y “aislados” (véase la definición de este término en el apartado 3.14) destinados a los sistemas informáticos o electrónicos (figura 3) no se recomienda (y puede estar prohibida en algunos países). Siempre existen en la instalación enlaces eléctricos, por el suelo o por elementos parásitos (capacidades e inductancias mutuas). En caso de rayo o de fallo en la red de energía, pueden manifestarse entonces tensiones transitorias peligrosas (para la seguridad de las personas y para la CEM) entre este sistema de tierra aislado y otras partes de la instalación.



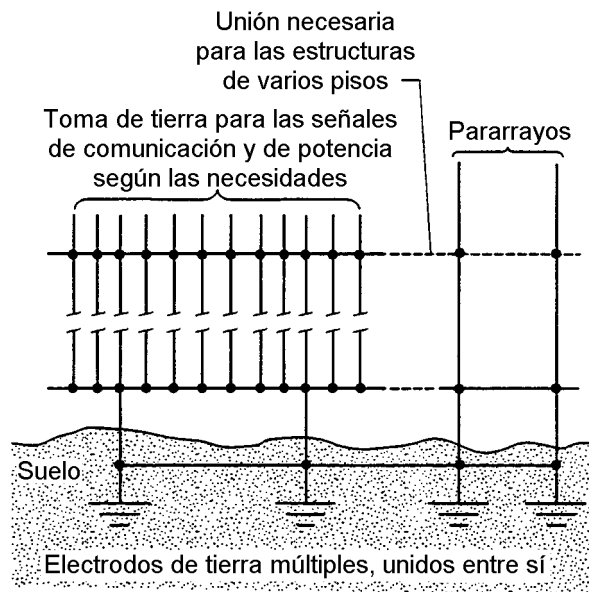
NOTA – En un intento de obtener una red de tierra “limpia” destinada a servir, por ejemplo, de referencia para señales, los electrodos de tierra no han sido unidos. Este procedimiento no cumple los requisitos de la CEM y constituye un riesgo para la seguridad. De hecho, los códigos reglamentarios de algunos países prohíben esta configuración.

Fig. 3 – Mal diseño de tomas de tierra “especializadas”, “independientes” o “aisladas”



NOTA – En un intento de obtener una red de tierra “limpia” o “electrónica” destinada a servir, por ejemplo, de referencia para las señales, la red de tierra está separada en red de tierra de señales y red de tierra de potencia. Este planteamiento puede comprobarse satisfactorio, bajo reserva de una puesta en práctica apropiada y del *mantenimiento de la topología*. Sin embargo, no se recomienda su generalización. Si es satisfactorio desde el punto de vista de la seguridad (a la frecuencia industrial), no lo es desde el punto de vista de la CEM a alta frecuencia.

Fig. 4 – Concepto del electrodo de tierra único



NOTA – Esta representación conceptual bidimensional, de formato similar al de las figuras 3 y 4, constituye en realidad una red tridimensional, como muestra la figura 7. Este procedimiento se recomienda en el caso general para afianzar tanto la seguridad como la CEM. No obstante, como se menciona en el caso de la figura 4, no excluye el recurso a otras configuraciones particulares probadas y bien mantenidas.

Fig. 5 – Configuración recomendada para los electrodos de tierra y la red de tierra

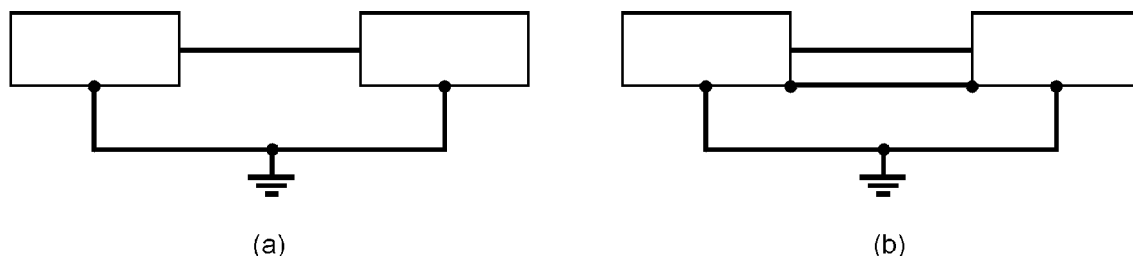
5.3.2 Red de tierra. Por regla general, la red de tierra concebida y realizada por el constructor del edificio debe tener una impedancia lo más baja posible, de manera que pueda desviar las corrientes de defecto así como las corrientes a alta frecuencia de los equipos o sistemas electrónicos. Distintas configuraciones de redes de tierra son susceptibles de dar satisfacción a sus usuarios. No obstante, para ser plenamente eficaces, algunas de estas configuraciones suponen que sean satisfechas ciertas condiciones específicas. Así, una gran administración o gran empresa que disponga de las estructuras adecuadas puede diseñar y mantener los aspectos de un sistema de tierra desde medidas de la resistividad del suelo hasta el control final. Especialmente, algunas prácticas de puesta a tierra, como la “red en estrella” o la “red de masa aislada”, abordan la CEM de manera diferente, pero se comprueban satisfactorias en instalaciones específicas *cuando son objeto de una aplicación correcta y del mantenimiento de la topología es asegurado por especialistas competentes.*

No obstante, estas condiciones especiales no son generalmente cumplidas por el usuario típico de una instalación. Los consejos dados en este informe técnico están por tanto destinados a este usuario típico, en vez de a los organismos con procedimientos establecidos y confirmados.

El criterio que consiste en utilizar electrodos de tierra independientes y especializados (por ejemplo según la definición del apartado 3.14, mostrada en la figura 3) cada uno dedicado a una red de tierra distinta, es un error que no solamente no garantiza la CEM, sino que constituye un grave riesgo para la seguridad. Los códigos de algunos países prohíben esta disposición. Por otra parte, la utilización separada de una red de tierra “limpia” para las señales electrónicas y de una red de tierra “sucía” para la energía eléctrica no es muy recomendada para asegurar la CEM, incluso recurriendo a un electrodo de tierra único (figura 4). Aunque no es aceptado universalmente, el apartado 3.1.2b) de la Norma CEI 61024-1 prescribe conexiones equipotenciales *“en espacios verticales no superiores a 20 m en las estructuras de más de 20 m de altura. Las barras de conexión deben unirse con el anillo horizontal conectando las bajadas entre ellas”*. La figura 5 representa una muestra esquemática de esta disposición.

De hecho, algunas recomendaciones de este informe técnico puede revelarse difíciles de realizar en un edificio antiguo. Algunas mejoras pueden sin embargo ser aportadas a la red de tierra. Se puede, por ejemplo, usar un falso suelo con una red de tierra mallada situada por debajo, o interconectar todos los chasis de los equipos que intercambian señales (figura 6). Estas soluciones pueden ser completadas por otros métodos de atenuación.

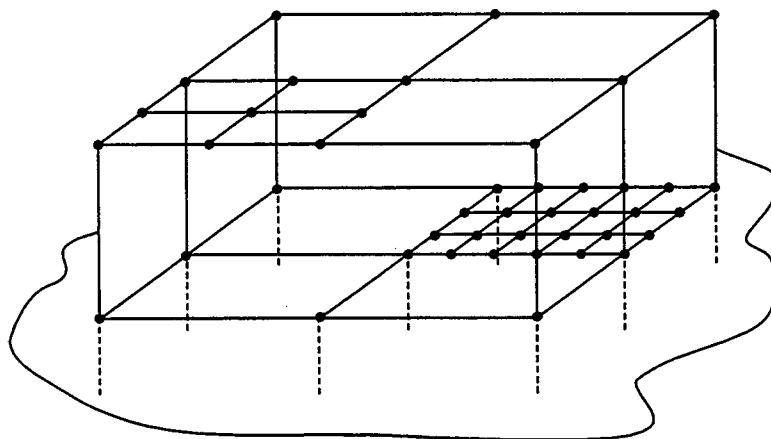
Una crítica a menudo dirigida a las redes de tierra malladas consiste en observar que esta configuración se traduce en la formación de bucles de tierra, situación considerada a menudo como indeseable por problemas de ruido eléctrico. De hecho, estos problemas de ruido pueden limitarse por los métodos descritos en el capítulo 7. En cualquier caso, la idea según la cual es necesario separar las redes de tierra para evitar los problemas de ruido no debe conducir nunca a adoptar prácticas peligrosas



NOTA – El bucle cerrado representado en la figura (a) está formado por medio del blindaje de la línea de señales, lo que no es deseable. El bucle cerrado representado en la figura (b) entre los chasis atenúa la aportación del blindaje de la línea de señales.

Fig. 6 – Bucles que implican a cables de señales y una red de tierra

Como una instalación típica puede tener muchos pisos, es conveniente que cada nivel disponga de su propia red de tierra (generalmente mallada, véase la figura 7). Es conveniente que estas redes estén unidas unas a otras y con el electrodo de tierra. El número mínimo de conexiones necesarias es de dos (redundancia intrínseca) con el fin de garantizar que ninguna parte de la red de tierra se encuentre aislada en caso de rotura de un conductor. En la práctica, el número de conexiones es superior a dos, lo que permite una mejor simetría de la circulación de la corriente, una reducción de las diferencias de tensión y un descenso de la impedancia global entre dos pisos.



NOTA – Cada piso dispone de una red mallada, estas redes están interconectadas en diferentes puntos situados entre los pisos. Algunas partes de las redes son reforzadas igualmente, para satisfacer las necesidades particulares de algunos locales.

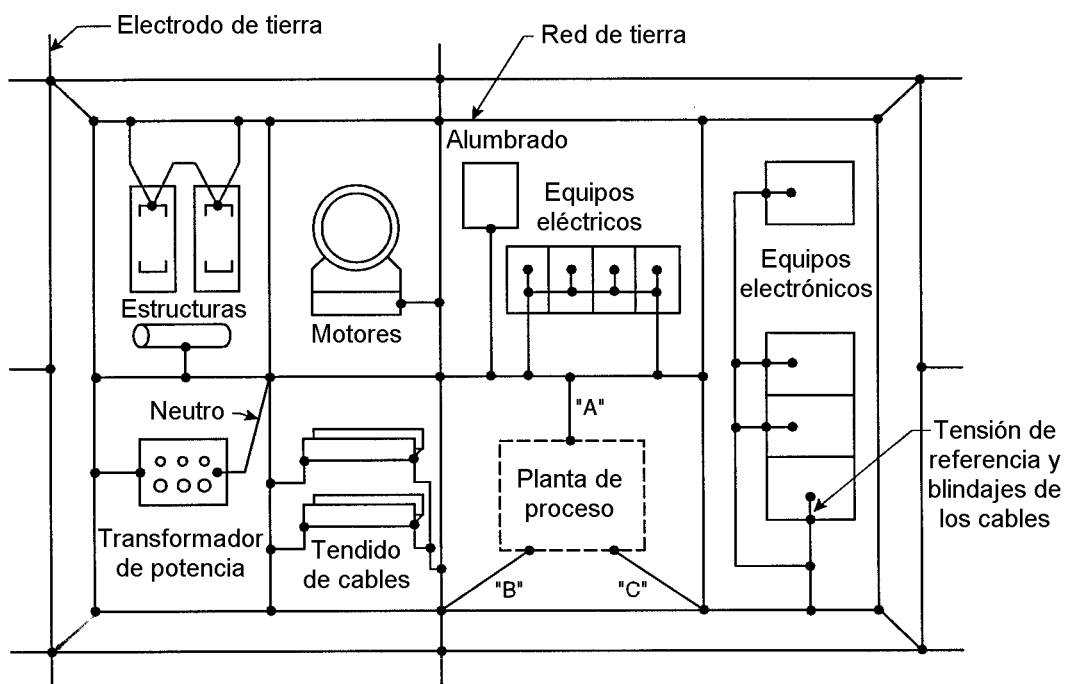
Fig. 7 – Esquema tridimensional del procedimiento recomendado para la red de tierra

Estas uniones múltiples en paralelo presentan diferentes frecuencias de resonancia. De hecho, si existe, para una frecuencia dada, un enlace de alta impedancia, tiene todas las probabilidades de ser puentado por otro enlace cuya frecuencia de resonancia es diferente. Globalmente, en un espectro de frecuencia extendido (de c.c. a varias decenas de megaherzios) la existencia de una multitud de enlaces permite llevar a un sistema de baja impedancia.

Es conveniente que cada habitación del edificio disponga de conductores de tierra que permitan unir los equipos o sistemas, los tendidos de cables y las estructuras (armadura de hormigón de los edificios, conductos del agua, desagües, soportes, armadura de edificios, etc.). En algunos caso particulares, como la sala de control o el local informático con piso elevado, por ejemplo, es posible utilizar un plano de tierra de referencia o interconexiones de tierra próximas a sistemas electrónicos para mejorar la puesta a tierra de los equipos sensibles y para proteger los cables interconectados.

La colocación en el edificio de equipos o de sistemas sensibles o de gran potencia puede requerir reforzar localmente la red de tierra. Es el caso por ejemplo de una sala de control, o un local informático próximo a un transformador de potencia. El acoplamiento entre las fuentes de interferencia electromagnética y un equipo puede, por ejemplo, reducirse por la distancia. Es conveniente aplicar este criterio a la red de tierra. Conviene crear zonas diferentes: zona electrónica, zona de máquinas, etc. Estas zonas son interconectadas por medio de la red de tierra, pero la topología de la instalación debe ser tal que la distancia sea la mayor posible entre las fuentes y los equipos o sistemas sensibles, según muestra la figura 8.

Se recomienda no unir un motor eléctrico susceptible de generar una fuerte corriente de defecto al mismo conductor de puesta a tierra que equipos o sistemas electrónicos sensibles (el acoplamiento por una impedancia común debe ser evitado cuidadosamente). Para mejorar los resultados en CEM de la instalación, es conveniente unir los diferentes equipos a los nudos de la red de tierra.



NOTA – La topología de las conexiones “B” y “C” es más eficaz desde el punto de vista de la CEM que la topología “A”. El detalle de las conexiones puede variar según los casos.

Fig. 8 – Criterios generales de conexión de las partes conductoras de diferentes equipos o sistemas a la red de tierra

Algunos organismos o empresas que disponen de una ingeniería centralizada, que permite controlar de cerca el diseño y la realización, aplican con éxito un procedimiento por el que cada piso posee su propia red de tierra mallada aislada, denominada “tierra híbrida” (Montandon, 1992 [4]) (véase figura A.1). Esta configuración se caracteriza por un concepto riguroso de la topología del cableado, que exige que todos los cables entren en el sistema considerado por una sola interfaz, como en el ejemplo de la figura A.2 (topológicamente equivalente). Este procedimiento presenta la ventaja de reducir los problemas de ruido a veces asociados a la presencia de una red mallada integral. Impone sin embargo mantener cuidadosamente el aislamiento entre las diferentes redes malladas aisladas y los elementos conductores ajenos a la instalación.

La principal diferencia física entre el electrodo de tierra y la red de tierra corresponde a su realización. Hay (generalmente) pocos riesgos de corrosión en el interior de los edificios, lo que permite la utilización de cables trenzados a modo de conductores y de fijaciones mecánicas para la conexión de los conductores.

5.3.3 Conductores de bajada de pararrayos. Estos conductores, que forman parte de la red de tierra, son específicos por muchas razones. La amplitud y las frecuencias equivalentes de las corrientes de rayo imponen colocar al menos dos conductores para cada pararrayos:

- para disminuir la impedancia del enlace;
- para limitar la corriente que pasa por un conductor;
- para evitar el riesgo de que el enlace entre un pararrayos y el conductor de bajada sea interrumpido.

Desde el punto de vista de la CEM, estos conductores múltiples tienen la ventaja de limitar los efectos inductivos en el interior del edificio, si la configuración de la instalación es tal que esos conductores no están demasiado próximos a los equipos o sistemas electrónicos sensibles (la atenuación de los campos eléctricos y magnéticos por los muros de los edificios es generalmente pobre).

Estos elementos se colocan generalmente en el exterior del edificio, y se utilizan conductores sólidos (macizos), que presentan una mejor resistencia a la corrosión. Normalmente, para los edificios que tienen un número pequeño de pisos, el electrodo de tierra es el único elemento de conexión entre los pararrayos y la red de tierra implantada en el interior del edificio (principio de la distancia). Esta disposición puede ser difícil de obtener en el caso de edificios industriales con estructura metálica o edificios que poseen un gran número de pisos. En estos casos particulares, es preferible, para la CEM, no aislar los conductores de bajada de pararrayos de las estructuras y unirlos a la red de tierra de cada piso, o al menos cada pocos pisos (véase figura 5).

En esta última configuración, teniendo en cuenta el hecho de que la corriente de rayo es una corriente transitoria, la mayor parte de la corriente del rayo permanecerá en los conductores externos de bajada por la interacción de los campos electromagnéticos. Sólo pequeñas corrientes, estrictamente necesarias para “la igualación de los potenciales”, fluirán en el interior del edificio, excluyendo así el riesgo de cebado lateral entre los conductores de bajada de pararrayos y los equipos unidos a tierra en el interior del edificio. Este último punto revela algunas ventajas, más desde el campo de la seguridad que desde el de la CEM, pero se puede crear una situación peligrosa al intentar proteger la CEM manteniendo las corrientes del rayo *totalmente* en el exterior del edificio.

Por otra parte, es conveniente tener en cuenta que en la mayor parte de los edificios de uso comercial o industrial, numerosos objetos unidos a tierra (alumbrado, climatización, ventilación, antenas de comunicación, etc.) están situados en el extremo del edificio y pueden así actuar de forma intempestiva como pararrayos, con el rayo utilizando sus conductores de comunicación, de energía o de tierra de protección como conductores de bajada, en lugar de los previstos a este efecto.

La interacción electromagnética entre los campos producidos por las corrientes de rayo que fluyen por varios conductores de bajada repartidos alrededor del edificio permite garantizar que la mayor parte de la componente de alta frecuencia de la corriente del rayo fluya a través de los conductores externos, es decir por los conductores de bajada *ad hoc*, por el acero de construcción o por las barras de armadura, antes que a través de los conductores internos, que sólo son recorridos por una parte muy pequeña del impulso de la corriente del rayo (Schnetzer y Fischer, 1992 [5]).

6 CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL

La unión de todas las partes metálicas conductoras de una instalación y su conexión a la red de tierra permite cumplir los requisitos de seguridad (tensiones de contacto y de paso). En el esquema de la figura 8, examinada más arriba, diferentes equipos o sistemas están unidos a la red de tierra en una instalación industrial. Esta conexión puede realizarse de forma que permita no solamente cumplir los requisitos de seguridad, sino también mejorar los resultados de la instalación en términos de CEM.

6.1 Generalidades

Las interconexiones entre los equipos o sistemas y la red de tierra pueden representarse por el circuito equivalente de la figura 9. R_S y L_S representan el conductor de conexión equipotencial. Sin embargo, elementos parásitos, como las capacidades C_P de los equipos o sistemas con relación a la red de tierra, o las impedancias de contacto de las interconexiones, Z_C , vienen a complicar esta situación (figura 10).

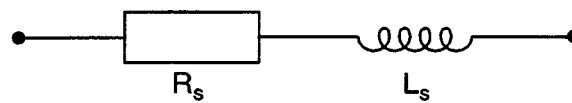


Fig. 9 – Representación simplificada de un conductor de conexión equipotencial

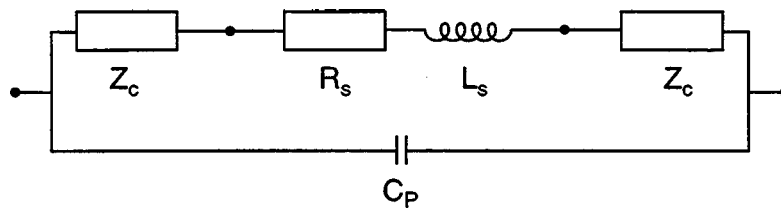


Fig. 10 – Representación más realista de un conductor instalado

Para obtener una impedancia de conexión baja, los valores de R_s y L_s que dependen directamente de la longitud y de la forma del conductor deben ser mínimos. En la práctica, eso significa que conviene siempre unir los equipos o los sistemas al conductor de la red de tierra más próximo que debe estar lo suficientemente cerca de los equipos o sistemas en cuestión (aspecto a tener en cuenta en el momento de definir la configuración de la instalación).

La impedancia de contacto Z_c debe ser lo más baja posible. Esta impedancia concierne no solamente a la red de tierra, sino también a los equipos o sistemas a interconectar y a la manera de realizar la conexión equipotencial.

La utilización de materiales diferentes para la red de tierra, los conductores de conexión equipotencial, y los equipos o sistemas a unir pueden constituir una fuente de problemas debido a fenómenos electroquímicos. Es conveniente efectuar controles periódicos si tal situación es inevitable.

Los equipos son afectados por este aspecto en la medida en que el punto de conexión a menudo forma parte de la estructura de los equipos o sistemas. Desgraciadamente, en la medida en que forma parte de esta estructura, este punto puede, inicialmente, estar recubierto de pintura o haber sufrido un tratamiento galvanoplástico, que le confiere una impedancia de contacto mediocre. Es conveniente prestar una atención especial a este aspecto.

La realización del enlace equipotencial tiene una influencia directa sobre el valor de Z_c y sobre la estabilidad de este valor en el transcurso del tiempo (corrosión). Son utilizados varios métodos:

- conexión soldada directamente;
- conexión soldada con fundente;
- conexión atornillada o empernada;
- conexión remachada;
- conexión embutida;
- conexión con pinza;
- etc.

6.2 Conductores de conexión equipotencial

Como conductores de unión a un mismo potencial, pueden ser apropiados bandas metálicas, trenzados planos o cables redondos. Para los sistemas de alta frecuencia considerados, son preferibles las bandas metálicas o los trenzados planos (efecto de película). La relación típica recomendada entre la longitud y la anchura de estas interconexiones es inferior a cinco. La figura 11 presenta ejemplos de realización.

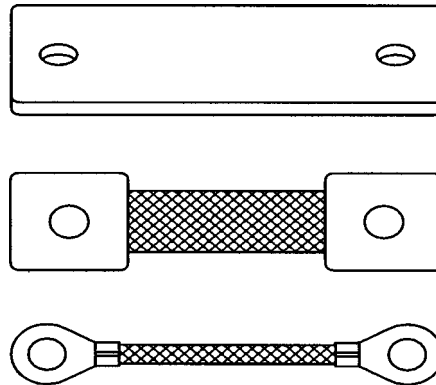


Fig. 11 – Conductores típicos de conexión equipotencial

Desde el punto de vista de la CEM, los cables redondos no constituyen conductores de conexión a equipotencial eficaces en los sistemas en los que frecuencias superiores a 10 MHz son producidas o procesadas, ni en los sistemas susceptibles de ser afectados por estas frecuencias. Para altas frecuencias, un conductor redondo posee una impedancia superior a la de un conductor plano de la misma sección transversal (figura 12). Es conveniente observar no obstante que se insiste a veces exageradamente en la diferencia de efecto producido por la utilización de una interconexión plana con preferencia a un cable redondo. La utilización de conexiones múltiples permite obtener una impedancia todavía más baja (figura 13).

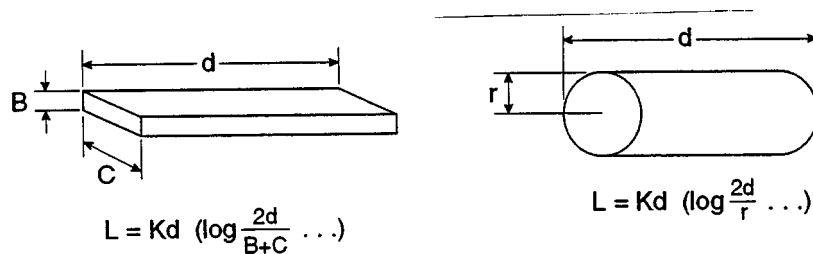


Fig. 12 – Inductancia relativa de conductores planos y redondos

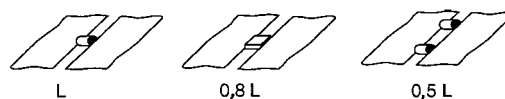


Fig. 13 – Inductancia relativa de conexiones equipotenciales redondas, planas y dobles

6.3 Conexiones

6.3.1 Conexiones permanentes. Las conexiones permanentes realizadas por soldadura directa o con fundente tienen la ventaja de presentar el valor más bajo en términos de impedancia de contacto, con buena estabilidad en el transcurso del tiempo. Las conexiones remachadas y embutidas pueden dar la presión de contacto necesaria para obtener un acoplamiento fiable y duradero. Sin embargo, estos métodos necesitan superficies metálicas limpias y precauciones apropiadas para evitar la corrosión.

6.3.2 Conexiones amovibles. Las superficies metálicas limpias aseguran una buena conducción y un acoplamiento duradero si se ponen en contacto una con otra bajo una presión alta (esta disposición necesita un mantenimiento periódico en los entornos industriales). El resultado es equivalente al de la soldadura, con la posibilidad de desconectar los dos elementos en caso de necesidad.

Si es imposible obtener superficies metálicas limpias para la conexión, es posible utilizar zapatas, que penetren en las capas no conductoras. Sin embargo, esta solución sólo es un paliativo. Si se utilizan conductores de aluminio, es preciso aplicar juntas combinadas apropiadas.

6.3.3 Tratamiento de superficie. Las conexiones de tierra requieren el contacto de superficies metálicas limpias. Es conveniente por tanto eliminar las capas de protección no conductoras – especialmente, pintura – de las superficies de contacto. Es conveniente que la zona limpia sea más extensa que la zona de contacto. Después del acoplamiento de las superficies de contacto, es preciso aplicar un revestimiento protector, por ejemplo pintura o grasa, para impedir la corrosión de las superficies limpias en la zona periférica del contacto, estando estas superficies expuestas a diversas condiciones del entorno a considerar (figura 14).

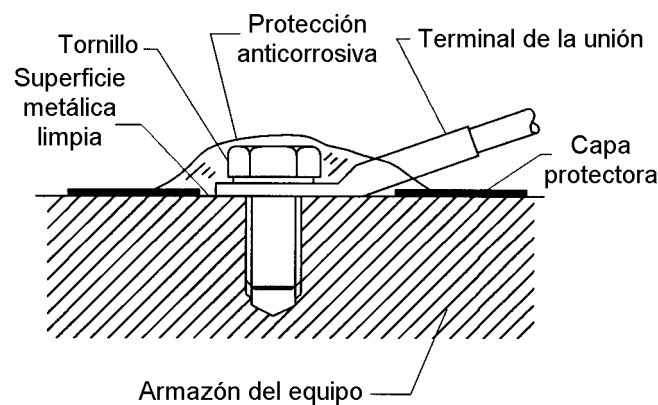


Fig. 14 –Ejemplo de conexión equipotencial constituyendo una conexión protegida amovible

6.4 Conexión a un mismo potencial de equipos específicos

6.4.1 Armarios electrónicos. Para los armarios electrónicos, es suficiente generalmente una sola conexión equipotencial. Sin embargo, si las fuentes de perturbación electromagnética son tales que las frecuencias más altas que producen tienen unas longitudes de onda más cortas que la dimensión más grande del armario, es conveniente utilizar varias conexiones a un mismo potencial. En este caso, la distancia típica entre dos conexiones a un mismo potencial cualquiera corresponde a un décimo de la longitud de onda más corta considerada, siendo la distancia mínima de 0,3 m. Una distancia más corta no aportaría mejoras significativas. Para un armario dado, se recomienda situar los puntos de entrada de los cables y la conexión equipotencial próximos unos de otros (sobre la misma cara del armario) para evitar la circulación de corriente en la periferia o en el interior del armario.

6.4.2 Cables blindados. Los blindajes de los cables se unen a la red de tierra en uno o en los dos extremos, según las señales transmitidas y las posibles fuentes de perturbación electromagnética. Sin embargo, en cualquier caso, la mejor solución en cuanto a la conexión consiste en tener una unión de 360 grados alrededor del blindaje. Esta solución puede tomar la forma de un prensa-estopas o de una soldadura situada en la interfaz que constituye las envolventes (figura 15). Para más detalle, remitirse al capítulo 7.6.

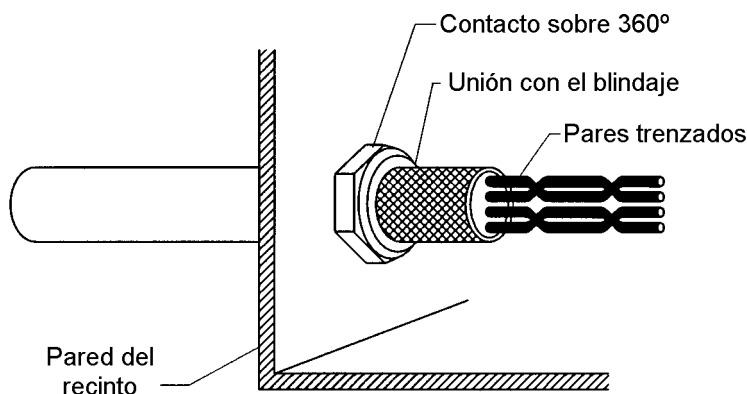


Fig. 15 – Ejemplo de conexión equipotencial óptima de un cable blindado

6.5 Procedimientos destinados a los usuarios

Sabiendo que el sistema de tierra se instala primero en un edificio o fábrica (antes que los equipos o sistemas necesarios para la utilización final de esta instalación) y que a menudo forma parte de la estructura del edificio, es muy difícil, para los usuarios, inspeccionarlo o modificarlo después de la entrada en servicio de la instalación. De hecho, es conveniente que los usuarios se aseguren del diseño y de la realización correcta del sistema de tierra en el diseño del edificio (prever por ejemplo el modo de mantenimiento de este sistema durante el tiempo de vida de la instalación) y del cableado inicial.

En lo que respecta a la CEM, un buen sistema de tierra no resulta caro si las recomendaciones generales definidas en este documento se toman en consideración desde la fase de diseño. En el caso de edificios antiguos, o de edificios nuevos que no han sido concebidos en función de los imperativos de la CEM, el coste puede ser más alto, pero estas operaciones son necesarias cuando se trata de equipos electrónicos sensibles.

Para una inspección, sólo pueden ser verificadas las conexiones atornilladas o empernadas (red de tierra y uniones) durante el tiempo de vida activa de una instalación. Esta inspección puede realizarse visualmente, por apriete sistemático de cada conexión, o por una medida en corriente continua a través de la unión.

En caso de problemas de CEM (consecutivos o no a una modificación de la instalación), puede ser necesario mejorar localmente la red de tierra. Esta operación es a menudo costosa y difícil, por la presencia de equipos, sistemas, máquinas, etc. Puede sin embargo ser facilitada por la utilización de pisos alzados bajo los cuales se colocan los conductores de la red de tierra. Otro procedimiento consiste en interconectar todas las armaduras por medio de conductores de conexión equipotencial, y de implantar líneas de señales cerca de estas uniones, como muestra el esquema de la figura 16 (véase el capítulo 7 para más detalle).

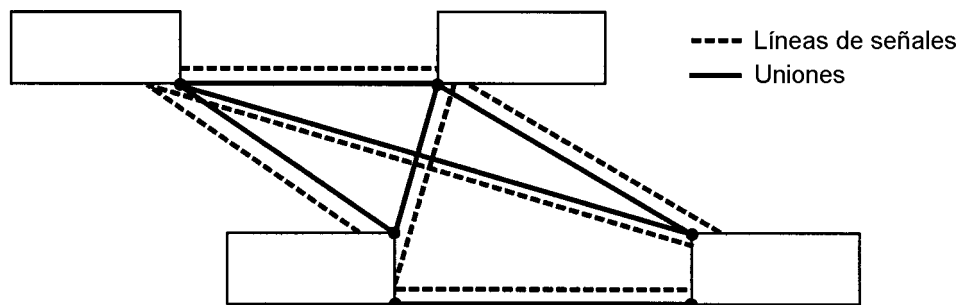


Fig. 16 – Esquema de recintos interconectados

7 CABLES Y CONDUCTORES

7.1 Generalidades

Para garantizar una compatibilidad electromagnética óptima, la elección de un cable, la determinación de su modo de acoplamiento a los accesos de los equipos, así como su recorrido de la envolvente de un equipo a otro, el reagrupamiento de diferentes cables en haces y el diseño general de la instalación, deben fundarse en un procedimiento coherente en términos de CEM. En un entorno electromagnético (EM) hostil, pueden adoptarse dos procedimientos para la configuración del cableado de la instalación:

- Las señales de grandes pueden ser transportadas por medio de un tipo de cable seleccionado arbitrariamente, cuyo recorrido se organiza sin precaución especial y que se conecta a los equipos sin tener en cuenta procedimientos recomendados. En este caso, es conveniente que los accesos de los equipos sean capaces de aceptar estas señales de grandes y distinguirlas de las perturbaciones inducidas por el cableado.
- Las señales de pequeñas pueden atravesar el mismo entorno EM hostil por medio de un cable seleccionado con cuidado, y cuyo recorrido y conexión a los equipos se realicen correctamente. Este procedimiento se utiliza para optimizar la CEM, pero supone respetar los criterios de CEM tales como los definidos en este informe técnico.

De hecho, la CEM puede obtenerse de varias maneras diferentes. No es posible presentar una solución única y universal. Por tanto, este informe técnico suministra una amplia relación de recomendaciones generales. El cumplimiento de estas recomendaciones generales permitirá mejorar la CEM de la instalación considerada.

En la selección del cable, su recorrido y su acoplamiento en ambos extremos, se impone tomar en consideración un determinado número de aspectos:

a) *Las señales a transportar*

- Pueden ser concentradas en algunas bandas de frecuencias o en forma de ondas (cuasi) continuas; la energía liberada en forma de corriente continua o corriente alterna a 50 Hz o 60 Hz se asimila a una señal. Por otra parte, algunas señales emitidas en la banda acústica pueden extenderse hasta algunos megaherzios. Es el caso de la telefonía a alta velocidad, de la red digital con integración de servicios, o de las señales de vídeo y señales de alta frecuencia (AF).
- Señales por impulsos: duración, frecuencia de las repeticiones, frecuencia de ráfagas, tiempo de subida y de bajada, límites superior e inferior de la gama de frecuencias a considerar.
- El nivel de la señal: medida y control de bajo nivel, como en el caso de señales de termopares (gama de microvoltios), señales informáticas (gama de 24 V), corriente alterna (1 000 V).

b) *La naturaleza de las perturbaciones esperables*

Onda continua, ráfaga, impulso, rayo y fallo inducido por un rayo; su tipo y su severidad dependen de la aplicación y de la instalación en el entorno.

c) *Naturaleza del equipo a conectar*

Características de los accesos: impedancia en modo diferencial (MD) y en modo común (MC); acometida de las señales AF sobre su impedancia característica; distinción entre las perturbaciones que sobrevienen en el interior de la banda de frecuencia de la señal útil y las que provienen del exterior de esta banda; comportamiento no lineal de los accesos, sus características en sobrecarga de MD y MC, ondas sostenidas o impulsos.

Es preciso definir los requisitos relativos al nivel de perturbación aceptable en los dos extremos del cable. Ni el cable ni los hilos deben degradar la calidad de funcionamiento deseada. Es conveniente insistir en el hecho de que el nivel de fiabilidad obtenido sólo puede ser estadístico. Es la instalación en su conjunto la que determina el volumen de perturbaciones aceptable. En las instalaciones críticas (plantas nucleares, fábrica de tratamiento químico), no se autoriza ninguna interrupción del funcionamiento. En las instalaciones menos críticas, puede aceptarse una breve interrupción cuando la vuelta a un funcionamiento normal o seguro está garantizada después de esta interrupción, bien automáticamente o por intervención humana.

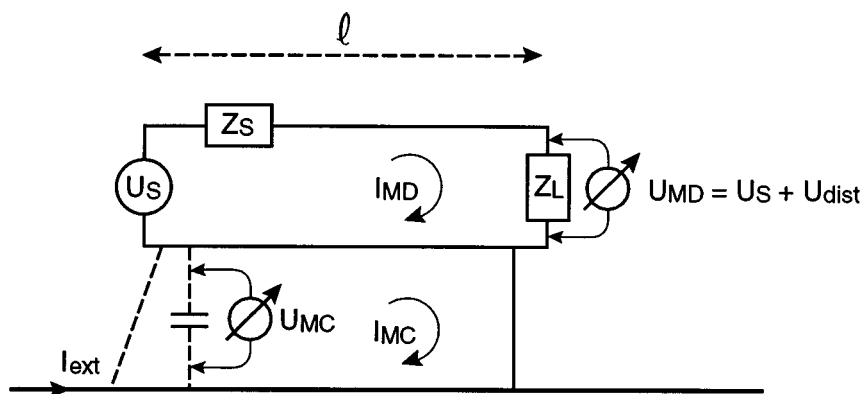
Una vez que un procedimiento CEM ha sido seleccionado, con un diseño, cableado, conexiones y recorrido apropiados, es conveniente respetarlo estrictamente. Los añadidos o modificaciones posteriores deben ser compatibles con el procedimiento elegido. Es preferible disponer en todo momento de un responsable de la CEM que posea la competencia técnica requerida y una autoridad suficiente, para asegurar el mantenimiento del procedimiento CEM elegido.

7.2 Circuito en modo diferencial y en modo común, impedancia de transferencia Z_t

Se utilizará un modelo simple a lo largo de este documento, relativo al acoplamiento de las perturbaciones a lo largo de un cable y a los equipos electrónicos. Se han dedicado varios libros a esta cuestión; reproduciremos los aspectos esenciales en este informe, en la medida en que numerosos ingenieros – experimentados o noveles – pueden no estar familiarizados con estas cuestiones. El anexo B y la bibliografía (anexo D) presentan informaciones sobre este asunto.

Estrictamente hablando, el modelo presentado sólo es válido en baja frecuencia. En este caso, la longitud de onda es netamente superior a la del cable. A frecuencias más altas se necesitan cálculos más precisos. Sin embargo, las medidas de atenuación indicadas permanecen válidas en estas condiciones; o, más exactamente, vienen a ser más necesarias.

7.2.1 Los dos circuitos. Una fuente de señal (de impedancia de salida Z_s) se une a una carga (de impedancia Z_L) por un cable de longitud l (figura 17). Cualquier conexión de señal hace intervenir al menos dos hilos – señal y retorno – entre dos equipos. Los cables coaxiales o bifilares son ejemplos comunes. La fuente, la carga y esos dos hilos forman el circuito en *modo diferencial* (MD). Este circuito puede ser definido como un bucle de corriente cerrado.



NOTA – Dos hilos interconectan una fuente de señal (tensión de señal U_S , de impedancia de salida Z_S) y una impedancia de carga Z_L . Estos hilos, esta fuente y esta carga constituyen el circuito en modo diferencial (MD). Para simplificar, se supone que Z_L es netamente superior a Z_S . La tensión en modo diferencial en los bornes de la carga U_{MD} es importante. U_{MD} se compone de una fracción de la tensión de la fuente U_S y de un término que corresponde a la perturbación añadida U_{dist} debida al acoplamiento con el circuito de MC a través de la impedancia de transferencia Z_t .

El circuito de MC puede ser cerrado por conducción. Sin bucle conductivo (representado del lado fuente), el bucle en MC se cierra a alta frecuencia a través de capacidades que o se sitúan en este lugar de forma deliberada, o son parásitas; una tensión U_{MC} puede manifestarse en los bornes de cualquiera de estas capacidades. La corriente de MC propiamente hablando puede provenir de una corriente externa I_{ext} que fluye a tierra (línea de trazo grueso en la figura) y/o provenir de un flujo magnético externo vía el bucle de corriente de MC.

Fig. 17 – Circuito en modo común y circuito en modo diferencial con conexiones equipotenciales y cables de señal

Además, los dos hilos forman siempre un segundo circuito que se cierra en algún lugar. Este circuito en *modo común* (MC) se constituye por uno o ambos hilos, el equipo y la tierra adyacente. El sistema de tierra tratado en el capítulo 5 forma parte de este circuito de MC. Incluso en ausencia de continuidad de conducción, el circuito de MC existe y se cierra a través de capacidades locales (situadas intencionalmente o parásitas) entre el cable, el equipo y la tierra (véase figura 22). La corriente I_{MC} puede provenir por ejemplo de las fuentes siguientes:

- caída de tensión producida en la parte considerada del sistema de tierra, debida a I_{ext} ;
- flujo magnético que atraviesa el bucle de tierra (MC) causado por una corriente en el sistema de tierra I_{ext} (rayo y fallos de la red eléctrica, por ejemplo) o de fuentes externas, tales como transformadores, emisores u otros equipos generadores de perturbaciones.

El reparto de I_{MC} sobre los dos hilos depende de:

- el tipo del cable: dos hilos paralelos o un cable coaxial, por ejemplo;
- la conexión eléctrica en los dos extremos: simétrica o asimétrica, así como las impedancias de MD y de MC.

En algunos equipos, ocurre que las partes eléctricas o electrónicas reales están aisladas con relación a la envolvente. En el caso representado en la figura 17, se supone que esta condición se cumple por la parte electrónica de la fuente de señal. En este caso, el circuito de MC puede, por ejemplo, cerrarse a través de la capacidad entre la parte electrónica y la envolvente, que se considera de momento como metálica. Si la envolvente se une a tierra, aún puede aplicarse el criterio de la figura 17. Se está siempre en presencia del circuito de corriente de MC. Se observa entonces que la tensión de MC correspondiente se sitúa entre la parte electrónica de baja tensión y la envolvente. Considerar sólo una corriente I_{ext} puede revelarse demasiado simple cuando el sistema de tierra es más complejo. Véase el capítulo B.2 para más información.

7.2.2 El acoplamiento entre los circuitos. El acoplamiento entre los circuitos de MC y MD produce perturbaciones en el circuito de MD. Este acoplamiento se describe por medio de dos parámetros: la impedancia de transferencia Z_t y la admitancia de transferencia Y_t . Contribuciones separadas de Z_t provienen:

- a) del cable o de los conductores, con reparto sobre toda la longitud;
- b) de los bornes de cada equipo.

En la aproximación de baja frecuencia, la contribución de las perturbaciones a la tensión total de MD U_{dist} en la carga, debida a la corriente en el circuito de MC, I_{MC} se calcula según la fórmula siguiente:

$$Z_t = U_{dist} / I_{MC} \quad (1)$$

Si Z_L es muy superior a Z_S ; cuando Z_L y Z_S son del mismo orden, la tensión U_{MD} , y por consiguiente U_{dist} , deben ser disminuidas por el factor $Z_L / (Z_L + Z_S)$. Véase el capítulo B.3 para un ejemplo detallado.

La impedancia de transferencia de un cable Z'_t se indica a menudo por unidad de longitud. A baja frecuencia, la impedancia total Z_t resulta $Z'_{t,l}$, siendo l la longitud del cable. A alta frecuencia, cuando la longitud de onda resulta comparable a la longitud l , el acoplamiento se calcula para cada parte infinitesimal del cable. El valor final de U_{dist} se obtiene seguidamente por integración sobre la longitud del cable, teniendo en cuenta los tiempos de propagación (véase por ejemplo Vance, 1976 [6]). Las impedancias de transferencia de la fuente y en la carga se determinan a menudo por los conectores y por su disposición en la estructura unida a tierra.

El circuito de MC puede ser grande. En los sistemas de tierra de baja impedancia, es preciso tener en cuenta fuertes corrientes de MC en una gran gama de frecuencia. El acoplamiento de I_{MC} a través de Z_t es a menudo más importante que la inducción directa por los campos magnéticos en el pequeño bucle de MD. Algunos accesos examinados en el capítulo 4 son accesos no intencionales y pueden formar una parte del bucle de MC. El acceso constituido por la envolvente es un ejemplo.

Otra forma de acoplamiento puede producirse a través de una admitancia de transferencia Y_t . En la mayor parte de los casos, Y_t es una capacidad parásita, $Y_t = \omega \cdot C_t$. El acoplamiento a través de Z_t es a menudo más importante. Así para un cable coaxial dotado de un conductor externo (CE) sólido, Y_t es igual a cero cualquiera que sea la frecuencia, mientras que Z_t está próximo a la resistencia del CE a baja frecuencia. En numerosos casos, un valor bajo de Z_t implica un valor bajo de Y_t . Tanto Z_t como Y_t varían considerablemente en función de la naturaleza de los cables. Z_t , en particular, se comporta diferentemente en función de la frecuencia. Para los cables blindados, Z_t está determinada principalmente por la constitución del blindaje. La admitancia de transferencia Y_t depende igualmente de los parámetros del circuito de MC y del circuito exterior.

Lo que importa a este respecto es que es necesario tomar en consideración **dos** circuitos. Los dos parámetros de transferencia generalizados se definen por el acoplamiento entre los circuitos de MC y MD. Este acoplamiento se produce localmente, en cualquier punto de los circuitos. La ventaja principal de esta descripción es que manifiesta el efecto de las medidas locales de atenuación de las perturbaciones. Para obtener el nivel final de perturbación en los dos extremos de un cable, es preciso calcular la suma o realizar la integración de las contribuciones locales.

Los dos parámetros de transferencia describen igualmente el acoplamiento perturbador en el otro sentido, es decir del modo diferencial hacia el modo común. En otros términos, funcionan en los dos sentidos. Parámetros similares representan el acoplamiento entre dos circuitos de MD adyacentes, por ejemplo entre señal y energía, entre diferentes líneas de datos o entre entrada y salida.

Existen dos maneras de obtener un acoplamiento de perturbación bajo: reducir I_{MC} o Z_t . La reducción del valor global de Z_t se trata a lo largo de este documento. La corriente I_{MC} que pasa a través del cable de señal puede ser reducida desviando esta corriente por un conductor paralelo (véase el apartado 7.5). Otra solución consiste en aumentar la impedancia del bucle en MC por medio de una impedancia local, o por una interrupción (separación eléctrica en c.c.). Es conveniente considerar con precaución el emplazamiento de esta alta impedancia local y su aptitud para resistir a una tensión elevada. Los dispositivos típicos utilizados para realizar esta separación son transformadores de aislamiento, optoacopladores o fibras ópticas. Estos dispositivos son examinados en el capítulo 8.

Existe igualmente una interacción entre los cables y los campos electromagnéticos. Los criterios de CEM presentados en este documento apuntan a obtener un valor bajo para Z_t con relación a las corrientes que circulan en los conductores adyacentes conectados a tierra. Un valor bajo para Z_t implica una interacción baja con los campos electromagnéticos.

7.3 Reglas de CEM para la instalación de los cables y conductores

Las recomendaciones presentada en este informe técnico se deducen de un conjunto de principios de CEM detallados más abajo. El respeto a estos principios permite reducir la susceptibilidad incrementando la inmunidad a las perturbaciones simultáneamente. Incluso si, como se indica en el capítulo 4, este informe técnico no puede fijar reglas obligatorias, es conveniente considerar los principios presentados aquí como objetivos deseables. Es la razón por la que se formulan como reglas objetivas.

- a) *Tomar en consideración bucles de corriente completos y cerrados, tanto para el circuito de MD como para el de MC, así como para los circuitos exteriores situados en proximidad y susceptibles de ejercer una influencia.*
 - Tal como se indica en el apartado 7.1.c), cualquier interconexión entre accesos de equipos diferentes se considera siempre como un acceso con dos bornes: una entrada de señal o de potencia únicamente en combinación con su retorno, que debe ser posicionada en la proximidad inmediata. La corriente y la tensión en modo diferencial de este acceso son parámetros importantes. Engloban primeramente la señal o potencia deseadas, pero transmiten igualmente perturbaciones debidas al acoplamiento entre el circuito de MD y el circuito de MC, vía Z_t e Y_t .
 - Los cables constituyen a menudo antenas grandes y eficaces, que transportan corrientes de MC hasta los equipos. Estas corrientes pueden causar perturbaciones no solamente en los circuitos de entrada y de salida directamente unidas a los conductores, sino también en los circuitos situados más al interior de los equipos.
 - Otros circuitos que deben ser tomados en consideración son los conductores formados por los conductos de agua, las tuberías de un sistema central de calefacción o de climatización. Como se indica en el apartado 4.7 de la Norma CEI 61000-5-1, incluso una guía de onda corta puede actuar como una antena AF y encaminar una corriente de MC hasta los equipos.

b) *Poner todos los circuitos de MD compactos para inmunizarlos contra los campos eléctricos y magnéticos locales.*

- Esta regla implica que cada circuito de MD incluye un cable de pares simétricos, preferentemente trenzados; el circuito de MD, puede ser simétrico o asimétrico. En un cable coaxial, la corriente de MD transportada por el conductor interno vuelve a su fuente a través del conductor externo; este cable es compacto por naturaleza, siempre que el conductor externo esté conectado en los dos extremos.
- Los conectores situados en los extremos de un cable forman parte integrante del circuito de MD; un conector mediocre (Z_t alta) hace perder todas las ventajas de un cable de buena calidad. La configuración de la conexión y la del equipo tienen una gran influencia sobre la Z_t global y sobre la calidad de la CEM. Es preferible unir los blindajes sobre toda su circunferencia a las superficies buenas conductoras como las paredes de los armarios, en el punto de penetración del cable. Las conexiones en espiral no se recomiendan en ese punto (véase igualmente el apartado 7.9)

c) *Mantener los circuitos de MD cerca de los elementos puestos a tierra.*

De hecho, los imperativos de CEM necesitan una baja impedancia de transferencia para la corriente que atraviesa el elemento puesto a tierra con relación al circuito MD. La impedancia de transferencia depende igualmente de la sección transversal del elemento puesto a tierra y de la posición del cable sobre este elemento. El punto e) y el resto de este informe técnico detallan esta cuestión.

d) *Los bucles de tierra están autorizados.*

En los sistemas de tierra mallados, los bucles de tierra constituyen una medida de atenuación eficaz de las perturbaciones causadas por las corrientes y los campos EM que provienen de fuentes externas. Una corriente de MC que pasa por un bucle de tierra constituido por un conductor de tierra paralelo es perfectamente aceptable, siempre que la impedancia de transferencia de este circuito sea baja con relación a los circuitos de MD adyacentes. Véase el capítulo 5 para más detalle sobre los sistemas de tierra.

e) *En los sistemas de tierra mallados, es conveniente implantar – paralelamente a los cables que unen equipos – un conductor puesto a tierra al menos en sus dos extremos.*

En los sistemas de tierra mallados, es conveniente que este conductor de tierra paralelo (PEC) transporte la componente principal de la perturbación de corriente I_{MC} y desvíe esta corriente de los cables de la instalación propiamente dichos. Puede por ejemplo tratarse de un conductor de tierra en un cable eléctrico, de un blindaje de cable o de un conducto en el que son colocados cables. La sección transversal total depende de la amplitud de la corriente cuasi continua considerada que atraviesa el conductor de tierra. El calentamiento por efecto Joule debe ser lo suficientemente bajo. La forma del conductor se dicta por los requisitos de CEM (véase 7.5 y anexo C).

f) *Separar electromagnéticamente los circuitos de alta potencia, de baja potencia y de señal en MD.*

Existen diferentes métodos de atenuación de la diafonía. Esta cuestión se examina con más detalle en los apartados 7.7 y 7.8. La separación electromagnética puede exigir una separación física.

g) *Debe tenerse en cuenta la totalidad de la gama de frecuencias en la que las perturbaciones pueden ser conducidas a lo largo de un cable (tanto en MD como en MC) en vez de en la a menudo más estrecha banda de frecuencia de las señales útiles.*

Una descarga (cebado de arco) consecutiva a la apertura o cierre de interruptores produce transitorios con una rapidez del orden del nanosegundo, incluso en las líneas eléctricas en c.c.

h) *Limitar la gama de frecuencias de las señales de MD al mínimo estricto; limitar la sensibilidad de los accesos a la gama de frecuencias absolutamente necesaria, por ejemplo por filtros u otros medios.*

- La utilización de un cable plano para la comunicación entre una impresora y un ordenador constituye un ejemplo típico (Goedbloed, 1990 [7]; Benda, 1994 [8]). La transferencia de los datos es relativamente lenta; es conveniente no utilizar impulsos más rápidos de los que exige la calidad de la comunicación. Otro ejemplo: una entrada de c.c. o BF puede también ser filtrada fuertemente en el lugar por el que penetra en el equipo.
- En estas condiciones, es conveniente optimizar las características en términos de CEM teniendo en cuenta cuestiones de economía y de fiabilidad. La implantación de filtros en los accesos de los equipos puede constituir una solución económica, en particular si las perturbaciones esperadas están únicamente fuera de la banda útil. La adopción sistemática de medidas de atenuación de los cables permite también reducir esta perturbación. Una solución óptima consiste en equilibrar los dos procedimientos.

7.4 Tipos de cables y su utilización en el contexto de la CEM

Los cables bifilares (dos hilos paralelos, trenzados o no) son utilizados a menudo para las señales y los controles de BF. Es conveniente, en este caso, utilizar los dos hilos para la señal y el retorno.

En los cables multifilares, es conveniente que cada conductor de señal disponga de su propio retorno cerca (véase el apartado 7.3 b)). Es preferible que estos dos conductores sean trenzados. En cualquier caso, es conveniente que el hilo de señal y el de retorno se encuentren en el mismo cable. En los cables bifilares blindados o multifilares, el blindaje debe ser considerado como un PEC. Este blindaje está en principio puesto a tierra en los dos extremos, y constituye así un camino para I_{MC} . Cuando existen varios blindajes, el PEC se constituye por el blindaje externo, que es conveniente poner a tierra en los dos extremos. Los blindajes internos o los hilos de tierra también pueden ser puestos a tierra en uno o los dos extremos (véase igualmente el apartado 7.6).

Las señales AF circulan normalmente por cables coaxiales. Es conveniente entonces unir el conductor externo a los equipos situados en los dos extremos del cable, para cerrar así el circuito de MD. Cuando el lado de baja tensión de un equipo está unido a la tierra local, esta regla implica que el conductor externo (blindaje) sea puesto a tierra en este lugar.

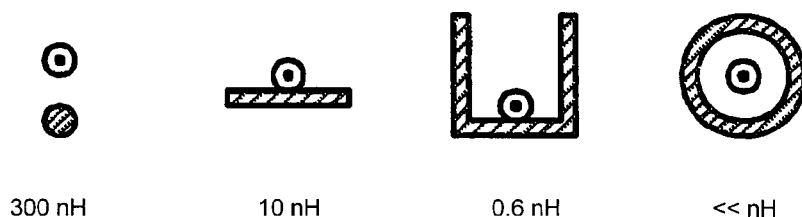
Los cables coaxiales con conductores externos (CE) múltiples son utilizados cuando el valor de Z_t debe ser bajo. Estos conductores externos pueden ser situados directamente unos sobre otros o aislados unos de otros. La presencia de mu-metal o de ferrita entre los conductores externos contribuye igualmente a la reducción de la Z_t (cables con blindaje reforzado). En general, los conductores externos están interconectados en los dos extremos del cable y puestos a tierra. En algunas aplicaciones, el conductor situado más al exterior sirve de PEC, mientras que los conductores externos situados en el interior del PEC sólo se conectan en el circuito de MD (que puede ser flotante).

Los cables planos son utilizados a menudo para el transporte de datos digitales lentos. En este caso, es conveniente que cada conductor de señal disponga de su propio retorno cerca. Es preferible que estos cables sean blindados y que su blindaje esté correctamente puesto a tierra en los equipos en los dos extremos.

7.5 Tipos de conductores de tierra paralelos (PEC)

En materia de CEM, se recomienda encaminar un cable a lo largo de un PEC unido por los dos lados a la tierra local de los equipos. Algunos ejemplos se mencionan en el apartado 7.3 e). Es conveniente que el PEC forme una estructura metálica continua y buena conductora sobre toda su longitud.

Un PEC correctamente seleccionado devuelve la corriente de MC del circuito de MD, que puede ser un cable o su blindaje, con efecto de reducir la impedancia de transferencia Z_t de la combinación PEC /blindaje. La forma del PEC ejerce una fuerte influencia sobre Z_t en AF. Se pueden clasificar los elementos siguientes en orden decreciente de Z_t en AF: hilo, placa, conducto en U, blindaje, o un tubo de pared compacta. La figura 18 presenta valores típicos de la componente AF de Z_t . En alta frecuencia, las dos últimas estructuras aseguran una separación electromagnética entre el interior y el exterior, por el efecto pelicular.



NOTA – los valores típicos de Z_t en AF se dan como una inductancia mutua M expresada en nH/m. Estos valores dependen más de la configuración que de la sección transversal total del conductor de tierra paralelo (PEC).

Fig. 18 – Efecto de la configuración de un conductor de tierra paralelo sobre la impedancia de transferencia por un cable coaxial

El capítulo C.2 da más amplia información sobre el valor de Z_t especialmente para los conductos. La tensión final de perturbación en MD se calcula de acuerdo con el capítulo C.1. Entre el PEC y el blindaje del cable, se forma un bucle de tierra como circuito intermedio. Se le puede conferir una impedancia alta, por ejemplo situando ferritas de MC alrededor del blindaje del cable (véase capítulo 9). La impedancia alta reduce la corriente intermedia I_{IM} en este circuito intermedio y su tensión final de perturbación en MD en el extremo del cable.

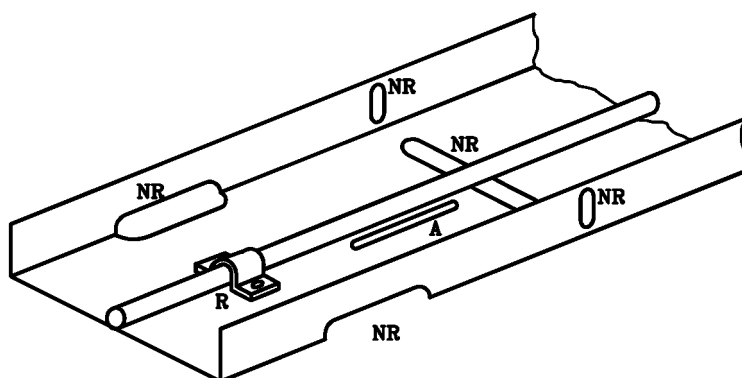
Después de haber elegido una configuración particular de PEC, de acuerdo a los requisitos mínimos, es conveniente conservar esta configuración de extremo a extremo, en toda su longitud. Por ejemplo, cuando es necesario un conducto en U, conviene conectarle al recinto en torno a toda la sección transversal, en ambos extremos. Una conexión unifilar corta produce una Z_t local alta (en especial en alta frecuencia) y degrada la CEM global para todos los cables situados en el conducto. Es preciso observar que el término “conducto” incluye los tendidos de cables, si ha lugar.

Los blindajes de cables (multifilares) constituyen buenos PEC. El cable coaxial representa un caso particular; el conductor externo constituye un camino para la señal en MD y la corriente de MC. El capítulo B.3 da detalles sobre el acoplamiento de las perturbaciones en los cables coaxiales.

7.5.1 Conductos y tendidos de cables utilizados como conductores de tierra paralelos. Es conveniente que un conducto o tendido de cables utilizado como PEC se presente en forma de estructura metálica continua. Cuando un conducto incluye varios elementos más cortos, es conveniente vigilar para asegurar esta continuidad por un enlace apropiado entre las diferentes partes. Las partes estarán preferentemente soldadas en todo su perímetro. Se admite utilizar juntas remachadas o atornilladas, a condición de que las superficies en contacto sean buenas conductoras (sin pintura) y estén protegidas contra la corrosión.

Es conveniente conectar al conducto de manera apropiada (en el punto de entrada) todos los blindajes, y otros conductores eventuales puestos a tierra que penetran en este conducto, de forma que permita un intercambio de corriente en modo común entre estos cables y el conducto. En la medida en que la corriente en modo común circula en un circuito que se cierra al exterior del conducto, esta corriente tiene igualmente tendencia a circular al exterior, y no a penetrar en el conducto.

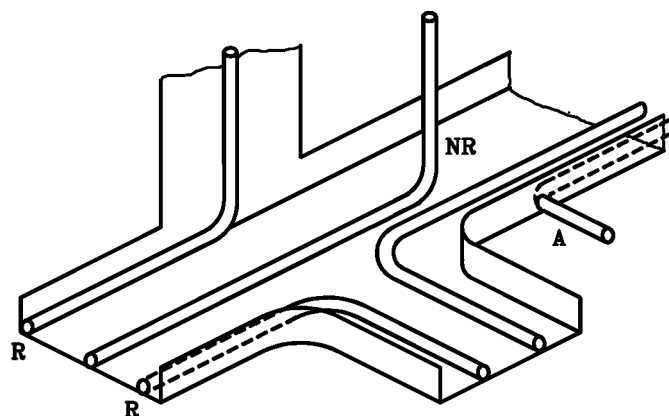
Los conductos llevan a menudo unas hendiduras que facilitan la colocación de los cables. Los menos dañosos son pequeños agujeros (figura 19) tapados por pernos. Una disposición menos favorable para las hendiduras es la disposición paralela al conducto, a una cierta distancia de los cables. Las hendiduras largas paralelas perturban ligeramente la forma de la corriente de MC y producen un cierto acoplamiento, no obstante limitado. Es conveniente no colocar las hendiduras en los ángulos de un conducto, porque la corriente de perturbación tiene tendencia a concentrarse allí. Las hendiduras perpendiculares al eje del conducto fuerzan a que esta corriente que atraviese el conducto para hacer un gran rodeo y por tanto produce un acoplamiento importante. Se recomienda no utilizar este tipo de hendiduras.



NOTA – Las hendiduras en un conducto o tendido de cables no se recomiendan en las posiciones y según la orientación indicadas por NR. Si debido a algunos requisitos que no corresponden a la CEM, las hendiduras son una necesidad absoluta, la posición menos mala es la paralela al eje (A) a cierta distancia de los ángulos y de los cables, si es posible. Se recomienda fijar sólidamente los cables con la ayuda de pinzas (R) sobre los cables y atornilladas al conducto. En lo que respecta a la CEM, la principal función de estas pinzas es conectar eléctricamente al conducto el blindaje del cable, u otro conductor de tierra paralelo del cable mismo.

Fig. 19 – Ranuras en conductos y bandejas de cables

Los conductos pueden tener empalmes (figura 20) u otros puntos intermedios por los que penetran los cables. Los empalmes son preferibles y es conveniente que mantengan intacta la separación entre el interior y el exterior. Los cables penetran a lo largo de una placa unida a una pared lateral del conducto. Una segunda solución, apropiada desde el punto de vista de CEM, consiste en conectar el blindaje de un cable, en el punto de entrada en el conducto. Es conveniente en cualquier caso que ningún cable penetre directamente en el conducto en ausencia de un camino apropiado para la perturbación de corriente que debe pasar a la superficie del conducto. Cualquier cubierta aislante protectora debe ser interrumpida en este lugar para el contacto deseado.



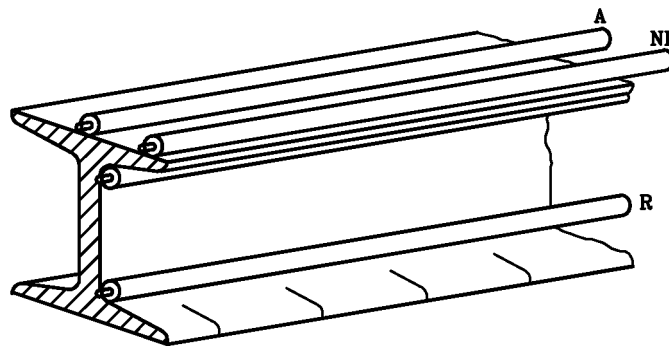
NOTA – Es conveniente que un cable que parte del tendido de cables o del conducto tenga su blindaje unido, en toda la circunferencia, al conducto en el punto de salida (A= caso aceptable). Es conveniente que ningún cable parta del conducto (NR) sin que se proporcione un camino buen conductor para sus corrientes de MC (véase la figura 22 a). Comparar con R en la figura 19. Por razones de claridad, esta figura presenta un tendido de cables poco profundo. Se admite que se trata de una disposición bastante deseable pero a veces difícil de realizar y no siempre necesaria, pero que puede ser útil en el caso de instalaciones implantadas en entornos difíciles.

Fig. 20 – Configuración recomendada para ramificaciones en un tendido de cables

Un cable blindado situado en un conducto puede ser asimilado a un cable blindado con dos conductores externos. El blindaje conectado en los dos extremos al conducto puede describirse como un cable coaxial con doble blindaje, estando interconectados ambos blindajes (véase el capítulo B.3).

El capítulo C.2 presenta cálculos detallados del valor de Z_t en función de la forma del conducto (material utilizado, anchura, profundidad y espesor de las paredes). El tipo de conducto preferible debe realizarse de acero de al menos 1 mm de espesor; es conveniente que la relación profundidad-anchura sea de alrededor de 1 o más. Una tapa cerrando el conducto reduce igualmente Z_t . Es preferible conectar eléctricamente esta tapa al conducto en toda su longitud. Sin embargo, una tapa aislada puede igualmente ser eficaz a alta frecuencia, como se examina en C.2.3.

7.5.2 Elementos de estructuras utilizadas como conductores de tierra paralelos. Los elementos metálicos de edificios pueden perfectamente cumplir los objetivos de la CEM. Las vigas de acero en L, U, T o H forman a menudo una estructura continua puesta a tierra que ofrece grandes secciones transversales y superficies extendidas, con numerosas conexiones intermedias a tierra. Dado que estos materiales tienen espesores de varios milímetros, estas vigas tienen una Z_t poco alta a la frecuencia industrial. Los cables son preferentemente situados contra estas vigas. Los ángulos internos son preferidos a las superficies exteriores (figura 21).



NOTA – La posición A, menos satisfactoria que R pero aceptable desde el punto de vista de la CEM, es susceptible de ser puesta en duda por razones de seguridad. La posición NR no se recomienda desde el punto de vista de la CEM y es objetable en términos de seguridad.

Fig. 21 – Posición recomendada para los cables, paralelamente a una viga en H, desde el punto de vista de la CEM

7.6 Empalme y conexión a tierra de cables y conductores de tierra paralelos

El circuito de MD debe ser compacto. El conductor de señal y de retorno deben ser conectados a los equipos situados en los dos extremos del cable. Si el lado de retorno o baja tensión de los accesos de los dos equipos es conectado a tierra, esta regla implica que el hilo de retorno sea puesto a tierra en los dos extremos del cable.

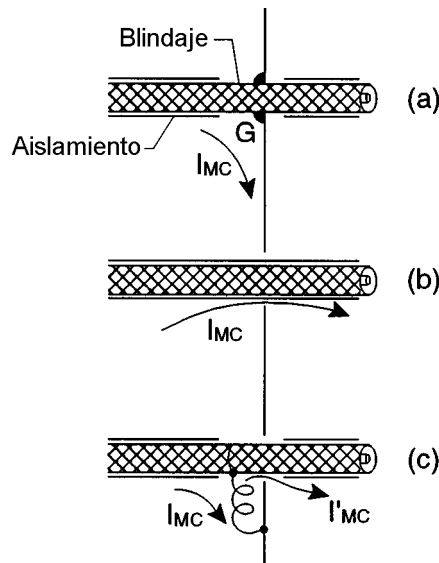
En algunos casos, el lado de baja tensión de uno de los accesos es flotante, o unido a la tierra local por una impedancia alta. Es conveniente esperar a una tensión en MC alta en esta interrupción del circuito de MC. Es preciso entonces que el equipo sea concebido para aceptar esta tensión, sobre el conjunto de la gama de frecuencias y de las amplitudes previsibles.

Si un PEC está presente, es conveniente conectarlo siempre a la tierra local (preferentemente, una gran pared metálica del recinto del equipo), en los dos extremos, de forma que el valor local de Z_t sea poco elevado:

- un conductor único, que constituye el PEC, es puesto a tierra por vía de una conexión corta;
- una placa o un conducto que constituye el PEC es conectado a tierra sobre una gran sección transversal, y preferentemente sobre el conjunto de esta sección;
- un blindaje o un tubo que constituye el PEC es puesto a tierra sobre todo el perímetro, por accesorios u otros medios apropiados;
- es conveniente no utilizar conexión en espiral (figuras 22 y 26) en uno u otro de los extremos del cable.

El PEC sirve principalmente para transportar la mayor parte de la corriente I_{MC} . Cuando un PEC, por ejemplo un conducto o un blindaje, se instala correctamente, los requisitos de CEM para los circuitos de MD que se encuentran en el interior resultan menos estrictos.

Ejemplo: una señal de termopar (prácticamente c.c.) se transporta por un cable bifilar blindado; el blindaje está unido a tierra en sus dos extremos. El termopar está igualmente puesto a tierra. El lado de baja tensión del amplificador de entrada del receptor puede ser flotante (para las bajas frecuencias); la tensión en MC entre el lado de baja tensión y la tierra local se limita entonces por el PEC.



NOTA – Cuando un cable blindado pasa por una de las paredes metálicas de la envolvente de un equipo o de un armazón, es conveniente que su blindaje sea conectado a la pared (a), en el conjunto de su perímetro, preferentemente por una prensa-estopas apropiado (G). Ningún blindaje debería pasar por una pared sin que haya contacto eléctrico (b). Una conexión en espiral (c) no se recomienda, incluso en forma de un hilo derecho y corto, debido al valor local alto de Z_t ; una parte de la corriente I_{MC} atravesaría la pared, por la presencia de la conexión en cola de cerdo.

Fig. 22 – Penetración de un cable blindado por una pared

En caso de distancias muy grandes, se recomienda prever para el PEC conexiones suplementarias a la red de tierra, con intervalos (eventualmente irregulares) entre los equipos. Estas conexiones suplementarias forman un camino de retorno más corto para la corriente de perturbación que atraviesa el PEC. Para los tubos, blindajes y conductos en U, es conveniente que se realicen en el exterior las conexiones de tierra suplementarias, para mantener la separación con el interior.

Se puede esperar que una fuerte corriente de MC atraviese el PEC en la industria pesada, en las subestaciones de AT, no en caso de fallos, o cuando el PEC constituye también una parte del dispositivo de protección contra el rayo. Son posibles dos procedimientos. El primero consiste en diseñar el PEC propiamente dicho de forma que resista la fuerte corriente de MC y proteja suficientemente los circuitos de señal, situados en el interior, por una baja impedancia de transferencia. De manera general, un blindaje de cable utilizado como PEC tiene el riesgo de no poder soportar estas fuertes corrientes. Otra solución consiste en elegir la topología del cableado de manera apropiada y tender el cable a lo largo de conductos o elementos de estructura metálica, que actúan como otro PEC para el blindaje del cable.

Puede adoptarse otro método para asegurar la protección contra las corrientes de fallo a frecuencia industrial ya que la corriente de perturbación tiene una frecuencia baja de la que se conoce su valor. Un condensador, que pone a tierra el blindaje en un extremo (tierra capacitiva), bloquea la corriente a frecuencia industrial en el bucle de corriente MC constituye además un camino para las corrientes de perturbación AF. Esta solución necesita un condensador de buena calidad y baja inductancia, implantado de forma que el valor local de Z_t sea bajo. Además, la entrada del equipo conectado debe resistir a la tensión en MC (alta) a frecuencia industrial, así como la componente residual de la tensión en MC a frecuencias superiores. Es conveniente que este condensador no sea insertado en el blindaje, porque eso produciría una Z_t local alta.

7.7 Topología general del cableado

Es conveniente diseñar el trazado del cableado con cuidado. Los requisitos de CEM dictan el camino a seguir, así como el diseño de los conductores puestos a tierra paralelamente a los cables (PECs), su presencia, su empalme a la instalación de puesta a tierra, su sección transversal y su forma. En cualquier caso, los requisitos de CEM prevalecen sobre las consideraciones prácticas, la comodidad de la disposición, y los aspectos estéticos. Eso no excluye la posibilidad de que estas consideraciones secundarias y los requisitos de la CEM sean satisfechos a la vez.

Para una señal dada, se podría elegir la distancia más corta posible en una instalación particular debido a la atenuación, a la sección transversal de cobre, etc. Los requisitos de la CEM modifican esta elección: es preciso seleccionar la distancia más corta correctamente protegida.

7.7.1 Recorrido del cableado entre equipos situados en una celda. El tipo de celda preferible comprende al menos una pared metálica continua bien unida a tierra (véanse igualmente los capítulos 5 y 6). Los cables se sitúan preferentemente contra esta pared y su recorrido toma la distancia más corta entre las conexiones de los equipos.

No se recomienda utilizar celdas cuyas paredes no formen un conductor metálico continuo, por ejemplo las que están pintadas antes del montaje, o fijadas con algunos tornillos solamente. Sin embargo, en estos recintos, pueden utilizarse vigas verticales u horizontales como PEC si las vigas en cuestión están conectadas correctamente a la tierra.

Se admite la conexión más corta posible entre dos equipos a condición de que exista un PEC que presente una Z_t suficientemente baja. Una excepción a esta regla puede estar constituida por un cable que sirve a un equipo para el que la inmunidad en MC (corriente y/o tensión) es lo suficientemente alta para todas las perturbaciones que pueden aparecer en el entorno de la aplicación respectiva.

7.7.2 Recorrido del cableado entre celdas. Se recomienda utilizar un cable asociado a un PEC. Como se indica en la figura 18, este conductor puede ser el hilo de tierra de protección de un cable. Un blindaje utilizado como PEC ofrece, no obstante, mejores resultados desde el punto de vista de CEM. Se admite que se sitúen conductos paralelamente a los blindajes de los cables. Es conveniente que los blindajes así como los conductos estén conectados de forma apropiada a la pared de la celda: los blindajes sobre todo el perímetro por medio de hendiduras adecuadas, y los conductos en toda la sección transversal.

7.7.3 Recorrido entre instalaciones o entre edificios. En caso de distancias más grandes entre instalaciones, es deseable utilizar ciertos tipos de PEC. Como se indica en el apartado 7.6, conexiones de tierra suplementarias permiten reducir la corriente de perturbación sobre la longitud del PEC.

Los cables a menudo se reúnen en haces y se sitúan en tendidos de cables. Es conveniente que los tendidos metálicos se interconecten, para maximizar igualmente sus propiedades en términos de CEM, y sean tratados como PEC. Los tendidos de cables se conectan al menos en los dos extremos a tierra y a los equipos alimentados por los cables que contienen. Los tendidos no conductores no se recomiendan, pero pueden utilizarse cuando están presentes otros PEC. Son posibles numerosas formas de tendidos: un tendido metálico de tipo escalera presenta una baja atenuación en CEM. Una placa, un conducto en U, una pared sólida o un conducto soldado en continuo dan mejores resultados.

Una escalera consta de dos vigas laterales entre las que están insertados barrotes. Para la CEM, estas vigas laterales revisten desventajas de importancia en la medida en que constituyen un camino para la corriente de perturbación paralelamente a los cables. En lo que respecta a la Z_t , las vigas pueden considerarse como dos hilos paralelos, como se indica en el apartado 7.5.

7.7.4 Distancia entre conductos. Diversos tendidos de cables o conductos pueden estar situados en paralelo sobre una distancia apreciable. La diafonía MD-MD entre los cables que contienen puede entonces llegar a ser importante. La distancia respectiva recomendada entre los cables situados en los tendidos depende de dos parámetros: primeramente, de su calidad en tanto que PEC, es decir, una Z_t baja, y segundo, de la diafonía MD-MD que puede necesitar un blindaje contra los campos (magnéticos) provocados por las corrientes de MD. Un conducto o un tubo profundo cuyas paredes presentan un espesor suficiente, puede cumplir simultáneamente estas dos condiciones. Los conductos a menudo pueden estar situados cerca unos de otros.

Un caso particular lo constituye la diafonía MD-MD entre los cables que transportan una corriente alta a frecuencia industrial y las líneas de señales de bajo nivel. Existen varias posibilidades:

- **Blindaje contra el campo magnético** – Un blindaje simple puede envolver los hilos monofásicos o trifásicos y el neutro. A las frecuencias industriales, un blindaje trenzado permite raramente un aislamiento suficiente contra los campos magnéticos locales. Puede así ser necesario prever un blindaje suplementario para el PEC, bien por cables PEC de la línea eléctrica, o por PEC de líneas de señales. Esta reducción de la diafonía necesita tubos separados o conductos profundos, con un espesor de pared suficiente, de acero de al menos 2 mm (véase la parte “blindaje” del capítulo B.5, así como el apartado 7.5).
- **Reducción del campo magnético por la topología** – El conductor de alimentación puede dotarse de su propio blindaje que conviene conectar a los equipos en sus dos extremos. La inducción magnética provoca un flujo de corriente en cada blindaje, de sentido opuesto a la corriente que atraviesa el conductor. El campo magnético en el exterior del blindaje se reduce gracias a la posición estratégica de cada blindaje; más bien que al blindaje verdadero. Se puede obtener una reducción suficiente optando por una solución menos radical, que consiste en situar los cables de transporte en paralelo y cerca unos de otros y fijándolos directamente contra un PEC de un espesor suficiente. Esta disposición disminuye el tamaño del circuito de MC. Además, en el conductor paralelo, el circuito se forma en imagen simétrica, lo que reduce los campos magnéticos a una cierta distancia de los hilos conductores de energía. Una bandeja o un tendido de cables tabicado (figura 23) permite una reducción suplementaria con relación a un conducto simple.

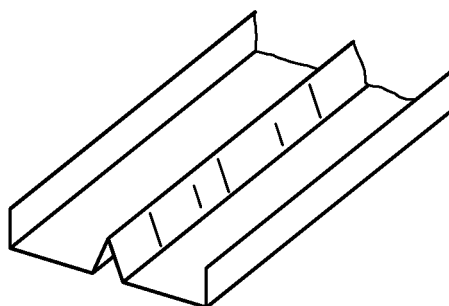
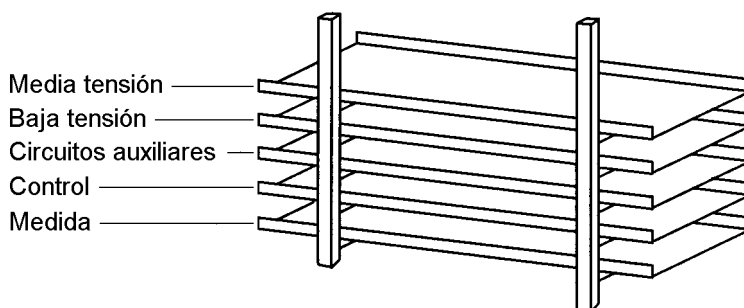


Fig. 23 – Bandeja de cables tabicada

- **Reducción del campo magnético por la distancia** – Una tercera solución consiste en mantener una cierta distancia entre las bandejas (superficiales) de diferentes tipos de cables. La experiencia sugiere la superposición tal como se representa en la figura 24. Es conveniente que las distancias entre las diferentes bandejas sean superiores a 0,15 m, en el sentido vertical u horizontal. La bandeja que contiene los cables de medida sensibles debe estar preferentemente provista de una tapa cuando se sitúe a menos de 1 m de los cables de potencia de corriente alta.



NOTA – En caso de superposición de conductos o de tendidos de cables que contienen diferentes tipos de cables, se recomienda prever una distancia mínima de 0,15 m entre los tendidos de cables. Es conveniente conectar eléctricamente estos últimos a los soportes verticales y prever una tapa para el conducto que contiene los cables de señales de medida de nivel bajo.

Fig. 24 – Ejemplo de superposición de bandejas o tendidos de cables

7.8 Haces de cables

La diafonía MD-MD entre diferentes cables merece ser estudiada con atención. Los cables que transportan señales similares pueden reunirse a menudo en haces. Se puede establecer una distinción (Goedbloed, 1990 [7]) entre los cables que transportan señales diferentes:

- muy sensibles: cables que transportan señales en baja tensión o con corriente baja tales como los provenientes de sensores;
- sensibles: líneas de señales a ≤ 24 V, cables planos que sirven para transferir datos en paralelo;
- indiferentes: cables c.a. de 100 V y 250 V, en función de las propiedades de CEM del equipo conectado;
- ruidosos: alimentación en c.a. y en c.c. sin protección (filtros o diodos, por ejemplo);
- muy ruidosos: conectados a un motor c.c. con colector, líneas conmutadas de transporte de potencia, cables e hilos de tierra de una subestación de conmutación AT, etc.

Es conveniente no reunir cables de categorías diferentes en el mismo haz. Es conveniente separar electromagnéticamente los haces unos de otros, bien por blindajes como PEC (conductores externos), o bien situando los cables en diferentes bandejas. La calidad del PEC determina la distancia a mantener entre los haces (y sus PECs). El apartado 7.5 presenta sugerencias al respecto. En ausencia de PEC, es conveniente mantener una distancia suficiente. La experiencia sugiere una distancia igual a 10 veces el diámetro más grande de los hilos.

Es preciso cumplir dos requisitos a veces contradictorios: primeramente, circuitos compactos para la atenuación en modo común, que necesita una corta distancia entre los haces y, segundo, una baja diafonía MD-MD, que necesita una cierta distancia. Una solución consiste en situar los diferentes haces en blindajes o conductos distintos. Es conveniente que los blindajes tengan suficiente espesor (véase igualmente el apartado B.5). Los blindajes trenzados permiten raramente un blindaje a las frecuencias industriales. Una bandeja simple puede estar tabicada (uno o varios tabiques, véase la figura 23) para formar un conjunto de conductos conectados, pero electromagnéticamente separados.

Ejemplos:

- Es conveniente que los cables de entrada y de salida de un filtro no estén situados en el mismo haz. Las corrientes de perturbación circularían alrededor del filtro a través de otros cables situados en el haz.
- Un cable bifilar alimenta un relé sin protección (filtro en c.a. o diodo en c.c.). Es conveniente que este cable no esté situado en el mismo haz que las líneas de señales digitales.

El acoplamiento MD-MD también ocurre cuando los haces de cables se cruzan con un cierto ángulo, o perpendicularmente. En ausencia de PEC, se aconseja mantener entre los haces una distancia mínima de alrededor de 10 veces el diámetro de los haces. Se admiten distancias más cortas para los haces situados en blindajes o conductos de buena calidad.

7.9 Cables que alimentan accesos de potencia

7.9.1 Conexión a los accesos de los equipos. Los cables correctamente aislados y que presentan una buena sección transversal de cobre conectan la fuente de potencia y los equipos. Los contactos son empernados o fijados sobre superficies de metal desnudo. Es conveniente encajar los metales de contacto para impedir la corrosión electroquímica incluso en atmósfera seca. No se admite utilizar hilos de cobre soldados bajo un perno. Pueden utilizarse conexiones enteramente soldadas en el caso de aplicaciones de baja potencia.

Es conveniente situar todas las conexiones de los hilos cerca unas de otras (circuito de MD compacto) en el interior de un equipo o de un recinto. Esta regla se aplica a las conexiones c.c., monofásicas en c.a. y trifásicas en c.a. En una red trifásica en estrella, es conveniente tratar el neutro (N) como un conductor de fase y mantenerle cerca de los conductores de fase.

NOTA – En las redes trifásicas, existen varios dispositivos para el neutro (N) y el conductor de tierra de protección (PE). Desde el punto de vista de CEM, es preciso preferir la configuración TN-S. El conductor N separado y los hilos de las tres fases forman un conjunto de circuitos de MD claramente definidos. El conductor PE suplementario (blindaje o hilo) constituye un camino suplementario para las corrientes de perturbación.

Es conveniente conectar un hilo de tierra situado en un cable a la estructura metálica de un equipo o recinto, lo más cerca posible del punto de entrada del cable. El hilo de tierra de un cable puede prolongarse más allá de esta conexión en el interior del recinto a diferentes equipos (véase el apartado 7.3 e)).

Cuando varios cables se conectan a un recinto, que contiene por ejemplo una alimentación eléctrica, todos los hilos de tierra están conectados generalmente a un raíl de puesta a tierra, para facilitar el montaje. Para la CEM, la posición correcta de este raíl es en el exterior del recinto o en el exterior del compartimento del recinto que contiene dispositivos electrónicos sensibles. Es conveniente empernar o soldar el raíl en numerosos puntos, en toda su longitud, para conectarlo a la estructura metálica del recinto. Para la puesta a tierra, no es conveniente utilizar un raíl aislado conectado al recinto por un hilo único. Conviene que en el interior de un equipo, el hilo de tierra esté conectado a la caja metálica, mediante una longitud la más corta posible.

Es conveniente conectar un blindaje de cable a las paredes metálicas del recinto, en el punto de entrada del cable. Es preferible una conexión en toda la circunferencia, que conviene asegurar por un prensa-estopas apropiado. No conviene utilizar la conexión unifilar (conexión en espiral, véase figura 22) entre el blindaje y la pared del recinto. El blindaje puede prolongarse después del prensa-estopas y ser conectado a la tierra local más en el interior del recinto.

Los hilos de tierra situados en un cable blindado son tratados como se describe precedentemente para los propios hilos de tierra.

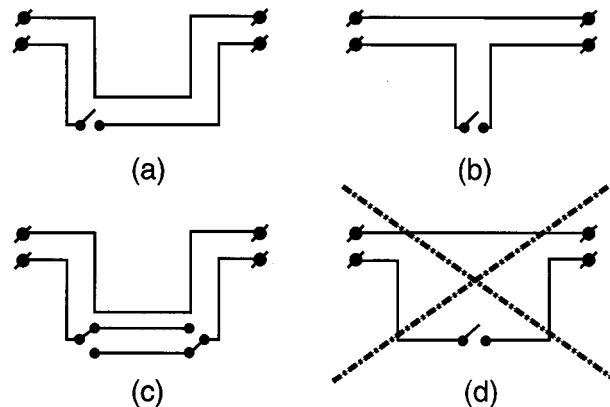
NOTA – Los blindajes compuestos de hilos de acero enrollados alrededor de cables de potencia se conciben principalmente para asegurar una protección mecánica, y no por motivos de CEM. La impedancia de transferencia de este tipo de blindajes es raramente conocida, pero puede ser baja con relación a la impedancia de transferencia de un cable de tierra simple. Incluso si este blindaje es gruesamente mallado, se recomienda igualmente conectarlo por un prensa-estopas, tal como se describe más arriba.

7.9.2 Interruptores de potencia entre equipos. Pueden situarse interruptores mecánicos en un cable, por ejemplo en el caso de los circuitos de equipos de iluminación. En todas las aplicaciones, el circuito de MD se compone del hilo de alimentación y de su retorno. Es conveniente que el circuito de MD sea mantenido lo más compacto posible. Esta compacidad permite evitar un acoplamiento local de las perturbaciones en MD, susceptibles de provocar perturbaciones en los equipos conectados en otros puntos de la misma línea de potencia. Es conveniente prever un hilo de tierra o un blindaje suplementario de manera que forme un camino continuo para la corriente del interruptor. Cuando este último se coloca en una caja metálica completamente cerrada, es conveniente tratarle como un equipo, previendo el tendido del cableado y la conexión de los hilos de la alimentación y su retorno y, eventualmente, del hilo de tierra y del blindaje como se describe anteriormente.

Hay disponibles dos tipos de interruptores: uno unipolar y otro bipolar. El interruptor bipolar, para la alimentación monofásica en c.c. o c.a., actúa sobre los dos hilos, a saber el hilo de la alimentación y el de retorno. Es conveniente mantener estos dos hilos cerca uno del otro. Para los interruptores con contacto simple, es conveniente prever un circuito de MD compacto. Los hilos interrumpidos o no interrumpidos seguirán preferentemente el mismo camino físico (figuras 25a y 25c). Cuando el interruptor está situado a cierta distancia del emplazamiento inicial del cable, el hilo interrumpido conduce al interruptor y parte siguiendo un solo camino (figura 25b).

7.10 Cables que alimentan accesos de señal o control

Primero el lector debe referirse al conjunto de las reglas de CEM enumeradas en el apartado 7.3. Desde el punto de vista de CEM, la instalación de cables y conexiones en los accesos de señal y control presentan numerosos puntos comunes comparables a los de los accesos de potencia.



NOTA – Varias soluciones (a, b, c) permiten mantener la compacidad del circuito de MD cuando son implantados interruptores. No se debería utilizar la configuración (d) para los conductores.

Fig. 25 – Topología de circuitos con interruptores

No es posible presentar una clasificación exhaustiva de los niveles de señal y de control, ni cubrir todas las aplicaciones. En lo que respecta a las señales de baja frecuencia, se mencionan algunas más abajo, por orden creciente:

- termopar y micrófono (de μV a mV);
- termistancia (de mV a V);
- indicadores de posición o interruptores electrónicos;
- controles digitales y señales similares de 1 V a 24 V ;
- señales de servicio en instalaciones de gran potencia, a menudo 42 V o 110 V ;
- bucles de corriente de alta impedancia (4 mA a 20 mA), para transmisión de señales analógicas BF.

La transferencia paralela de datos entre equipos digitales, tales como ordenadores e impresoras, constituye un caso de velocidad intermedia. Las señales AF incluyen:

- señal vídeo, televisión en circuito cerrado que utiliza ondas portadoras AF;
- señales que permiten la comunicación rápida de datos en serie con la ayuda de cables coaxiales

Los cables que alimentan las antenas para las comunicaciones móviles pueden en principio implantarse de acuerdo con las recomendaciones de este informe técnico.

7.10.1 Elección de las líneas de señales. La elección del cable, de la conexión y del recorrido del cableado se funda en la relación señal-ruido necesaria en los dos extremos del cable, y en la inmunidad en modo diferencial y modo común de los accesos del equipo. He aquí una lista indicativa de estos cables:

- Cables asimétricos: cables coaxiales, bifilares, multifilares planos;
- Cables simétricos: cables bifilares sin blindaje, cables bifilares blindados, cables planos, haces de pares múltiples trenzados, con o sin blindaje.

Los cables bifilares sirven principalmente para las señales de baja frecuencia o para energía. Desde hace poco, se considera también utilizar estos cables para señales de red digital con integración de servicios, de frecuencia más alta. Los cables coaxiales se utilizan para transportar señales a baja y alta frecuencia. El ancho de banda disponible está fundamentalmente determinado por la amortiguación debida al efecto pelicular en los conductores, así como por la longitud del cable. Los cables coaxiales cortos pueden utilizarse hasta varios gigaherzios. La impedancia de transferencia es el parámetro esencial para la evaluación de los criterios en CEM del cable, y es conveniente que los fabricantes la especifiquen. Los cables coaxiales o multifilares que incluyen varios blindajes pueden presentar una impedancia de transferencia más baja que los cables de un solo blindaje. Es posible interconectar todos los blindajes a los dos extremos o a uno sólo. En este último caso, un camino para la corriente de alta frecuencia está formado siempre por las capacidades situadas entre los blindajes. El capítulo B.2 presenta un análisis más detallado de estos puntos.

Para las señales a baja frecuencia, es conveniente comparar el transporte de señales simétricos con el asimétrico. A baja frecuencia especialmente, se pueden obtener parámetros de transferencia poco elevados utilizando un transporte simétrico. En toda la longitud del cable, la corriente de MC se reparte igualmente entre los dos hilos. Es conveniente que el equipo forme un camino a baja Z_t para la corriente de MC, mediante un filtro apropiado colocado en el acceso. Es conveniente por otra parte mantener la simetría de este acceso en la gama de frecuencias importante para las perturbaciones. Esto necesita de una buena tasa de rechazo en modo común para el acceso considerado, condición difícil de cumplir a las frecuencias situadas fuera de la banda de las señales útiles. El transporte simétrico se limita por tanto a las bajas frecuencias o a las frecuencias audio.

Preferentemente, se prevé para cada circuito de señales en MD un hilo de retorno independiente en un cable multifilar (circuitos de MD compactos), lo que evita un acoplamiento MD-MD entre los circuitos por resistencia común en c.c. y en bajas frecuencias. Es conveniente trenzar los cables bifilares y los pares de hilos situados en cables multifilares, para impedir una diafonía MD-MD de tipo inductivo y capacitivo en altas frecuencias. La transición entre bajas y altas frecuencias puede sobrevenir a algunos kiloherzios, o incluso a frecuencia industrial.

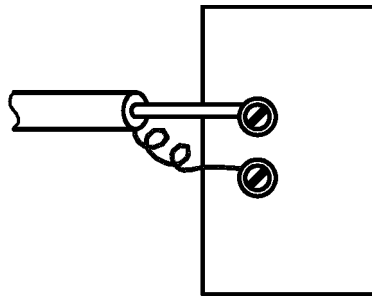
NOTA – Otras normas y documentos que tratan del cableado de los locales de usuarios han sido publicados o están en curso de preparación. Véase por ejemplo, la Norma ISO/CEI 11801: 1995 – *Tecnologías de la información. Cableado genérico de los locales de usuarios.*

7.10.2 Conectores. Es conveniente que los bornes de señal y de retorno estén muy próximos (circuitos de MD compactos) y que los contactos resistan a la corrosión. Es preciso, por ejemplo, preferir las superficies recubiertas de oro a las de plata. Los contactos corroídos pueden presentar características de corriente-tensión no lineales, susceptibles de producir la distorsión de la señal útil y la rectificación (audio) de las perturbaciones AF. La resistencia variable de los contactos corroídos puede provocar una diafonía no previsible entre diferentes circuitos de MD. En el peor de los casos, un conector corroído puede producir una Z_t alta y no lineal.

Es conveniente ajustar los contactos de los dos materiales para impedir efectos de termopar en el conector, especialmente en caso de señales c.c. de baja amplitud, tales como las emitidas por las sondas de temperatura de termopar. Es conveniente igualmente adaptar el conector al tipo de cable. Esta adaptación corresponde a la señal, la tensión y la corriente. A alta frecuencia, la impedancia característica tiene igualmente importancia. Con el fin de asegurar la CEM, esta adaptación afecta también a los parámetros de transferencia, Z_t e Y_t , en toda la gama de frecuencias en la que son previsible perturbaciones y en la que los dispositivos electrónicos son sensibles.

Es conveniente que los cables coaxiales estén dotados de conectores que preserven la simetría coaxial de extremo a extremo. El conductor externo de un cable coaxial debe ser conectado siempre al circuito de MD, en los dos extremos del cable. En el caso de accesos asimétricos, esto puede necesitar la puesta a tierra del conductor externo en sus dos extremos.

Es conveniente que los cables de par simétrico dotados de blindaje utilicen conectores que permitan un contacto sobre toda la circunferencia del blindaje. Conviene evitar las conexiones en espiral en el extremo del blindaje (figura 26). Si, por un motivo no ligado a la CEM, se revela necesaria una conexión espiral, es conveniente prever, para la corriente de MC, un camino que evite esta conexión. La mejor solución consiste en una conexión sobre la circunferencia del blindaje del cable a una pared, en un cierto punto del cable más arriba de esta conexión.



NOTA – Una conexión en forma de espiral, situada en el extremo de un cable coaxial, produce una Z_t local alta. Es conveniente evitar este género de conexión para la conexión del blindaje de cualquier cable, incluso si se trata de un hilo corto y derecho, y no del hilo rizado presentado aquí.

Fig. 26 – Conexión a evitar para la unión de un cable coaxial

7.10.3 Recorrido de las líneas de señal y control. Es conveniente que estos recorridos correspondan a los descritos en los apartados 7.7 y 7.8. A continuación se citan algunas observaciones suplementarias:

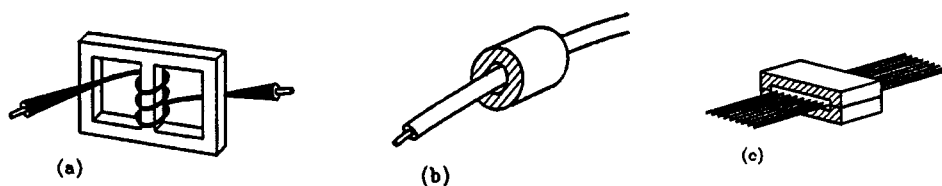
- Los cables coaxiales que transportan señales AF pueden reunirse en haces. Es conveniente que su Z_t sea lo suficientemente baja para evitar una diafonía MD-MD indeseable. La instalación de un blindaje suplementario alrededor de un haz de cables coaxiales permite reducir el acoplamiento al entorno. El blindaje forma un buen camino para una corriente de MC global, a condición de que este blindaje se conecte de manera que garantice la CEM.
- Se utilizan a menudo hilos de pares trenzados para la señal y el control a baja frecuencia. Estos hilos pueden reunirse en haces. Es conveniente que cada par sea trenzado separadamente. Es útil instalar un blindaje suplementario, como se describe más arriba.
- Es conveniente no reunir en haces los cables coaxiales que transportan señales AF y pares trenzados conectados a equipos de baja frecuencia. La diafonía de las señales AF hacia los circuitos de las señales de baja frecuencia puede producir una interferencia suplementaria, debido a las características no lineales de los circuitos de baja frecuencia. La demodulación de la AF simula una señal c.c., o una señal de baja frecuencia, cuando la señal AF es objeto de una modulación de amplitud.
- Se utiliza a menudo un cable plano para el transporte de datos en paralelo entre equipos digitales. Es conveniente que cada línea de datos y cada línea de retorno estén situadas en posiciones alternas, la una al lado de la otra. No se recomienda prever un solo retorno para varias líneas de datos. El cable plano puede ser blindado. Se recomienda con un blindaje de cada lado. Es conveniente que los blindajes estén conectados a los dos extremos, en toda su anchura, a la (placa de) tierra local, por medio de conectores apropiados.

8 OTROS MÉTODOS DE ATENUACIÓN DE LAS PERTURBACIONES

Además de las medidas preventivas que consisten en la puesta a tierra, conexión equipotencial, y recorridos apropiados del cableado, otros métodos de atenuación incluyen el filtrado, el blindaje y la instalación de dispositivos de protección contra las sobretensiones. Este capítulo describe brevemente métodos de atenuación suplementarios ligados a los métodos de cableado y soluciones alternativas al transporte de señales por soportes metálicos.

8.1 Ferrita en modo común

Pueden ser colocados filtros en los accesos de los equipos. Es conveniente que estos filtros creen un camino apropiado para la corriente de MC, con una Z_t suficientemente baja. Una ferrita en modo común produce un aumento local de la impedancia del circuito de MC (o del circuito intermedio, véase anexo C) y por consiguiente una reducción de la corriente de MC (figura 27). El circuito de MC permanece presente. Se obtiene una reducción más o menos eficaz en función de la impedancia inicial del circuito de MC. Los núcleos o toros de ferrita alrededor de un cable constituyen una autoinductancia de una vuelta en el circuito de MC. Varios núcleos o toros pueden ser colocados en serie. Ni el transformador ni la ferrita afectan la señal de MD. El transformador con un efecto “neutralizador” constituye un tipo particular de ferrita en modo común, que a veces es utilizado en las subestaciones de AT.



- (a): bobina de autoinducción de MC con cable coaxial. La autoinductancia de la bobina así creada se añade al circuito MC, pero no al circuito de MD.
- (b): arandela de ferrita que envuelve el cable coaxial.
- (c): estribo de ferrita que envuelve un cable plano. Todos estos dispositivos tienen la misma función.

Fig. 27 – Utilizaciones típicas de ferritas en modo común

La autoinductancia suplementaria creada por la bobina de autoinducción de MC o la ferrita está en concurrencia con la impedancia de la parte restante del circuito de MC, $Z_{MC,rest}$. Se obtiene más reducción de la corriente de MC cuando el valor de $Z_{MC,rest}$ ya es bajo. Este es el caso cuando un conductor puesto a tierra (PEC) está en paralelo al cable. Se dan algunos ejemplos más abajo:

- una bobina de MC o un toro de ferrita envuelven un cable situado en una conducción;
- una ferrita entre dos blindajes de un cable con doble blindaje fuerza a la corriente de MC a circular por el blindaje exterior;
- una ferrita envuelve un cable con un hilo de tierra separado cercano;
- núcleos de ferrita envuelven un cable coaxial a distancias irregulares, el blindaje del cable estando conectado al conductor de tierra entre los núcleos.

En el comercio se encuentran cables coaxiales especiales que incluyen una ferrita situada entre dos blindajes. En la ferrita de MC, el cable de MD se enrolla en una o varias vueltas alrededor de un núcleo magnético o en el aire. La capacidad entre los arrollamientos y las pérdidas de este núcleo limitan su utilización a bajas frecuencias

8.1.2 Propiedades de la ferrita. Las ferritas son materiales magnéticos cuya permeabilidad μ_r varía fuertemente, entre 10 y 10 000. Existe una cierta conductividad; la mayor parte de los materiales presentan igualmente una constante dieléctrica importante. A bajas frecuencias, la ferrita es inductiva. A altas frecuencias, las corrientes inducidas y otros fenómenos atenúan esta inductancia. La transición entre las dos zonas de frecuencia depende de la composición y del proceso de fabricación.

8.1.3 Algunas observaciones sobre la utilización de las ferritas. Cuando un cable está rodeado de ferritas, pueden producirse resonancias u ondas estacionarias en el circuito MC. Las frecuencias de resonancia son mucho más bajas que las que se podrían esperar con relación a los múltiplos de la longitud de mitad de onda sobre la longitud del cable, a la vez debido a los valores μ_r y ϵ_r de la ferrita. Para asegurar la CEM, las pérdidas son bienvenidas en la medida en que tienen tendencia a atenuar las resonancias.

Se puede igualmente enrollar ferritas alrededor de cables desprovistos de conductores paralelos. Es conveniente situar los núcleos o las arandelas cerca del punto de conexión de los cables al equipo. La reducción de la corriente I_{MC} produce una disminución de las emisiones radiadas. Según la impedancia del bucle de corriente I_{MC} completo, las ferritas harán disminuir o no la sensibilidad global a la perturbación.

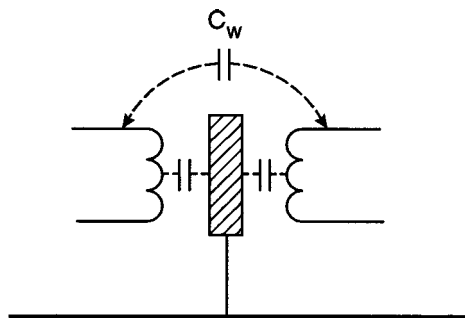
En el caso de fuertes corrientes de MC, la ferrita puede saturarse y perder su eficacia, por ejemplo, bajo el efecto de fallos o de rayos. La histéresis puede impedir el funcionamiento normal de la ferrita saturada. Se puede igualmente utilizar anillos de tamaño suficiente alrededor de los cables de potencia. Incluso en caso de corrientes de MD más fuertes, es raro que se produzca una saturación.

Cualquiera que sea la aplicación examinada, conviene consultar las indicaciones del fabricante para elegir la ferrita aceptable en términos de CEM.

8.2 Separación eléctrica

La separación eléctrica permite a menudo aumentar la impedancia del circuito de MC. Esta separación puede ser eficaz en c.c. y a bajas frecuencias, pero se degrada a frecuencias más altas, debido a las capacidades parásitas paralelas. Se recurre generalmente a un transformador de aislamiento, a fibras ópticas o a optoacopladores. A condición de llevar un cierto cuidado en su utilización, estos dispositivos pueden ser utilizados para asegurar la CEM.

8.2.1 Transformadores de aislamiento. El bucle de corriente de MC se interrumpe por la separación eléctrica entre los arrollamientos primario y secundario. Es conveniente que la capacidad de la tensión soportada de MC entre estos arrollamientos sea lo suficientemente alta para resistir todas las perturbaciones previsibles. Un acoplamiento intempestivo entre los arrollamientos primario y secundario, tanto MC-MC como MC-MD, se produce por la capacidad parásita C_w . Los blindajes electrostáticos, situados entre los arrollamientos y que conviene poner correctamente a tierra, reducen la capacidad entre los arrollamientos y crean caminos bien definidos y distintos para las corrientes de MC, a través de los cables conectados a los diferentes arrollamientos. Es conveniente que los cables o los conductores unidos al transformador estén separados de forma que el transformador no sea contorneado por una capacidad parásita que sobrevenga en otro punto. De nuevo, es conveniente considerar el conjunto de las perturbaciones posibles.



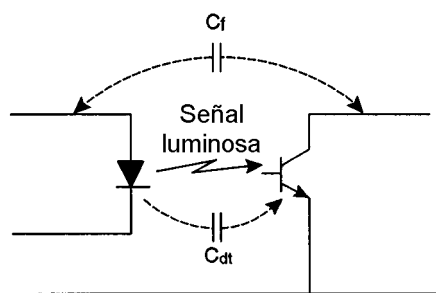
NOTA – Un transformador de aislamiento interrumpe el bucle de corriente de MC a baja frecuencia. A frecuencias superiores, las capacidades parásitas C_w entre los arrollamientos primario y secundario y una capacidad análoga entre los cables del transformador forman un camino potencial para la corriente de MC. Para más claridad, la capacidad C_w sólo se indica entre los hilos superiores, pero de hecho se reparte entre los dos arrollamientos y las conexiones.

Fig. 28 – Limitaciones en la eficacia de un transformador de aislamiento

8.2.2 Fibras ópticas. La señal de MD se convierte en una señal luminosa modulada, transportada por la fibra. Cuando las fibras se eligen correctamente, la banda pasante es ancha y la atenuación de la señal luminosa es baja. Las observaciones que siguen son importantes desde el punto de vista de la CEM:

- es conveniente que CEM del equipo emisor y del equipo receptor sea suficiente, en lo que respecta a las corrientes de MC que provienen de los conductores de señal y de las alimentaciones eléctricas;
- conviene que la fibra esté exenta de metal. Esta regla corresponde al metal añadido para asegurar la protección mecánica de la fibra, o los conductores de alimentación eléctrica paralelos a la fibra, o así como el revestimiento metálico eventual de la fibra destinado a protegerla contra la humedad. Cualquier metal formará un bucle de corriente en MC que pasa por un acceso muy sensible. Es muy probable que este bucle de corriente sea inesperado y constituya una fuente de perturbación.

8.2.3 Optoacopladores. Los optoacopladores cumplen una función similar a los transformadores de aislamiento. En lo que respecta a la CEM, la capacidad parásita C_{dt} entre el diodo electroluminiscente y el fototransistor es un elemento importante. Una corriente de MC AF que traspasa esta capacidad, traspasa igualmente el transistor existiendo el riesgo de conectarlo por inadvertencia. Los hilos unidos al optoacoplador pueden igualmente formar un contorneamiento para las perturbaciones AF, a través de la capacidad parásita C_f .



NOTA – Un optoacoplador compuesto por un diodo electroluminiscente y un fototransistor interrumpe el bucle de corriente de MC a baja frecuencia. A frecuencias superiores, la capacidad C_f entre los hilos y la capacidad C_{dt} entre el diodo y el transistor rodean el optoacoplador. Además, la corriente de MC que pasa en C_{dt} podría desbloquear por error el fototransistor, incluso en ausencia de señal del diodo.

Fig. 29 – Acoplamiento parásito en alta frecuencia

9 MÉTODOS DE MEDIDA Y DE ENSAYO

9.1 Puesta a tierra y conexión equipotencial

No existe ningún método de medida AF general y reconocido o normalizado, ni ningún criterio preciso concerniente a la impedancia entre dos puntos de un sistema de tierra. Sin embargo, el objetivo fundamental es rebajar esta impedancia al valor más bajo posible. Desde esta óptica, el procedimiento siguiente da a los usuarios unas indicaciones relativas al diseño de un nuevo sistema de tierra:

- a) Definir las necesidades:
 - determinar cuáles son los sistemas a implantar y a proteger;
 - disponer de una documentación y utilizarla.
- b) Utilizar un buen electrodo de tierra (consideraciones de seguridad):
 - determinar las características del suelo;
 - datos geológicos;
 - presencia de otros sistemas de tierra.
 - mejorar las características del suelo, si fuere necesario.
- c) Implantar una buena red de tierra (consideraciones de CEM):
 - escoger la configuración óptima;
 - se recomienda una red mallada única, a menos que la aplicación prevista dicte otro procedimiento comprobado;
 - reforzar la malla (aumentar la densidad de las celdas) en las zonas críticas.
- d) Asegurar la conservación del sistema de tierra:
 - verificar la resistencia de las conexiones equipotenciales;
 - limpiar las conexiones (corrosión);
 - mantener los revestimientos protectores;
 - verificar la presión de las conexiones atornilladas y empernadas.

9.2 Cables e instalación

Se propone un cierto número de ensayos en los documentos relativos a la CEM, tales como las normas de la serie CEI 61000-4 o el método de Bersier de inyección de corriente. Todos los ensayos prevén el acoplamiento, capacitivo o inductivo, de una corriente (de MC o de MD) en el cable. La corriente no se mide siempre. Se detecta más bien sus efectos sobre los equipos. Es conveniente determinar si el ensayo prescrito permite una representación razonable de las perturbaciones reales. Sin embargo, queda claro que ninguna especificación de ensayo puede pretender simular todas las perturbaciones posibles. El ensayo prescrito puede constituir el fundamento de un acuerdo comercial o jurídico entre las partes, en la espera de que la conformidad a los requisitos del ensayo aumente la probabilidad de que la instalación tenga un funcionamiento satisfactorio en condiciones reales.

Todas las recomendaciones tienen por objeto obtener una tensión de perturbación en MD baja en los accesos de los equipos. Cuando la impedancia en MC del acceso es alta, es conveniente igualmente verificar que la tensión en MC se sitúa en los límites soportados por el equipo. Conviene concebir el equipo de medida con cuidado, para que su presencia no introduzca fenómenos parásitos. En el plano de la CEM, conviene que la calidad del equipo de medida sea igualmente suficiente y su banda pasante esté adaptada a las perturbaciones. En especial, cuando una rotura o un arco se produce cerca, es necesario preferir un equipo que presente una velocidad de funcionamiento del orden del nanosegundo.

Los equipos son susceptibles de ser sometidos a fenómenos parásitos que afectan a su funcionamiento normal, o se pueden observar tensiones excesivamente altas. Se determinan primero las corrientes de MC a lo largo de los cables, en su punto de conexión al equipo. Las corrientes de MC en los puntos remotos se miden a continuación. Este informe técnico propone soluciones para desviar las corrientes de MC, lo que permite reducir las perturbaciones.

ANEXO A (Informativo)

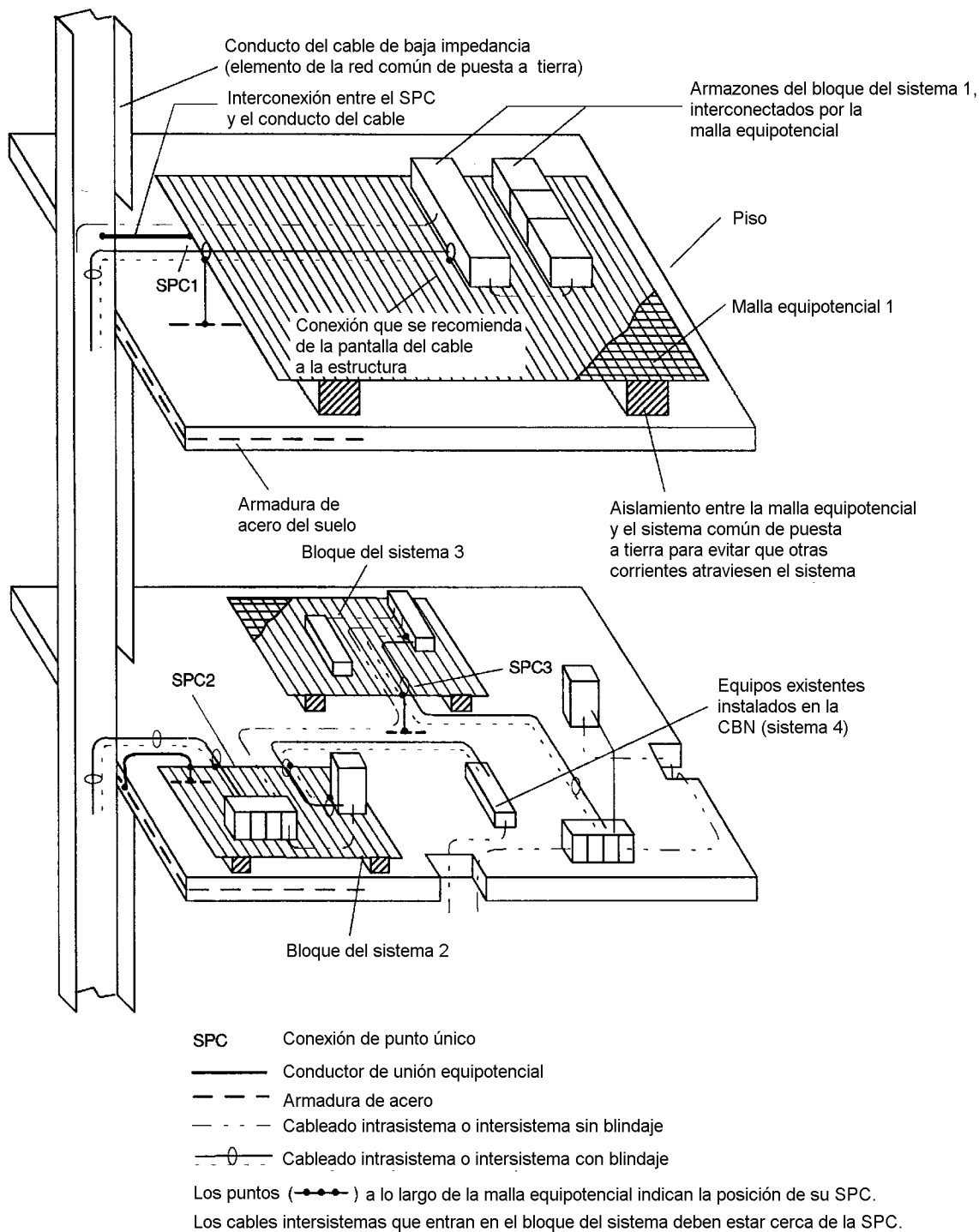
EJEMPLOS DE SISTEMAS DE TIERRA E IMPLANTACIÓN DE LOS CABLES

El sistema de tierra descrito en el capítulo 5 (configuración mallada) constituye el procedimiento recomendado en el caso general de una nueva instalación, en particular si el edificio debe ocuparse por organismos o empresas que no disponen de prácticas de conservación muy establecidas en materia de CEM. Este informe técnico ha señalado ya el hecho de que otros procedimientos se reconocen eficaces, como ha demostrado su puesta en práctica con éxito, especialmente por entidades que tienen los medios y la actividad para poner en funcionamiento prácticas de conservación coherentes en términos de CEM. Las figuras siguientes ilustran la diversidad de las prácticas con éxito:

- la figura A.1 representa la configuración de una instalación de telecomunicación de acuerdo con la directiva K.27 del antiguo CCITT;
- la figura A.2 representa la topología de un recinto de 5 caras que asegura la CEM en un entorno hostil;
- las figuras A.3 y A.4 representan ejemplos de sistemas de tierra para dispositivos electrónicos de gran potencia;
- las figuras A.5 y A.6 representan un caso de mejora en la práctica del cableado para asegurar la CEM.

A.1 Enlace híbrido

Esta configuración es un ejemplo de las prácticas aplicables cuando el usuario o propietario de una instalación dada ejerce un control total sobre la nueva instalación. Esta configuración se ha utilizado con éxito desde hace muchos años, especialmente en el interior de edificios existentes que deben acoger nuevos equipos en unión de los existentes. Crea interfaces especialmente definidas para los ensayos de aceptación de CEM y delimita las responsabilidades de los diferentes suministradores y usuarios del sistema (Montandon, 1992 [4]). La figura A.1 muestra esquemáticamente este procedimiento, descrito en las directivas del CCITT (actualmente UIT-T).



NOTA 1 – Los bloques de sistema 1, 2 y 3 son instalaciones nuevas que se ajustan al método en IBN mallado. Pueden unirse a instalaciones existentes (sistema 4) que usan cualquier método de unión equipotencial.

NOTA 2 – La SPC es la única interfaz metálica entre el IBN mallado y el CBN. Debe estar unida directamente a la armadura del suelo. Todos los cables que conducen al sistema entran por este punto. Todos los conductores que se unen al IBN mallado deben estar conectados a la SPC (por ejemplo, pantallas del cable, retornos de batería, etc.).

NOTA – Esta configuración responde al concepto de zona. Los bloques de los sistemas 1, 2 y 3 constituyen instalaciones nuevas que respetan escrupulosamente el principio de la unión híbrida. Estos bloques de sistemas pueden estar conectados a bloques existentes (bloque 4) que no es necesario modificar. Para más detalle sobre la puesta en práctica, véase la fuente indicada anteriormente.

Fig. A.1 – Ejemplo de configuración de una red de tierra híbrida

A.2 Recinto CEM

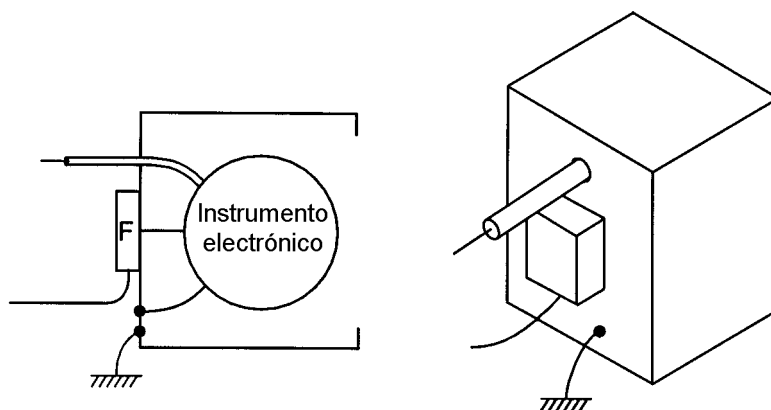
Este ejemplo describe un recinto CEM que se revela apto para garantizar una muy buena protección de los equipos electrónicos, incluso en un entorno electromagnético hostil. Este es el caso, por ejemplo, directamente debajo del cruce AT de una subestación AT de 380 kV de exterior (van Houten, 1990 [9]). Este recinto CEM se presenta aquí como la última protección que puede ser obtenida por una reducción de la impedancia de transferencia Z_t y reconducción de las corrientes en modo común. Los principios son todavía mejorados cuando se adopta un gran cuidado en la configuración de los cables situados en el interior del recinto, según las recomendaciones de este documento.

En un entorno menos perturbado que las subestaciones AT, es posible prever versiones del recinto CEM simplificadas y reducidas, conservando los principios. Se puede, por ejemplo, no utilizar más que el panel de atrás, e incluso reducir el tamaño de este panel, mientras sea posible conservar un camino definido para las corrientes en modo común que circulan alrededor de la parte electrónica.

El recinto comprende paredes metálicas continuas sobre cinco caras. Estando el resto abierto, lo que podría constituir una desviación con relación a los preceptos clásicos según los cuales es conveniente que un recinto blindado se cierre por todos los lados. Sin embargo, una comparación con el ejemplo precedente (enlace híbrido) muestra claramente que este recinto CEM y los “bloques de sistemas” de la figura A.1 son equivalentes en el plano topológico: los “bloques de sistemas” y sus extremos de cables corresponden a la configuración del recinto CEM si su parte de atrás y cuatro de sus caras son desarrolladas sobre un solo plano, que se asimila al suelo alzado de los “bloques de sistemas” de la figura A.1.

Todos los cables (líneas de señales y cables de potencia) penetran en el recinto por el panel de atrás. Los blindajes o los conductores externos de las líneas de señales se conectan sobre toda la circunferencia en este panel. La alimentación c.a. penetra en el recinto por un filtro (F) unido al panel de atrás. Un conductor de tierra de seguridad adicional se conecta igualmente cerca del filtro.

Todas las corrientes de MC que llegan hasta el recinto por los cables y el conductor de tierra de seguridad fluyen por el panel de atrás, lo que produce una muy baja impedancia de transferencia entre las corrientes de MC que circulan en el exterior del recinto y los instrumentos electrónicos situados en el interior de este recinto. Se observa que, en numerosas aplicaciones, esta Z_t baja es mucho más importante que el posible blindaje provisto por el recinto, incluso si está completamente cerrado para formar una jaula Faraday.



NOTA – Todas las corrientes de MC exteriores se encaminan por el panel de atrás, lo que produce una Z_t mínima entre las corrientes que circulan en el exterior del recinto y los dispositivos electrónicos situados en el interior del recinto.

Fig. A.2 – Recinto CEM que sirve para proteger dispositivos electrónicos sensibles

A.3 Sistemas de tierra de las instalaciones de electrónica industrial

Los principios de los sistemas de tierra expuestos en este informe técnico se han utilizado con éxito en instalaciones industriales que incluyen dispositivos y controles electrónicos (Benda, 1994 [8]). Las figuras A.3 y A.4 representan esquemáticamente la aplicación práctica de estos principios.

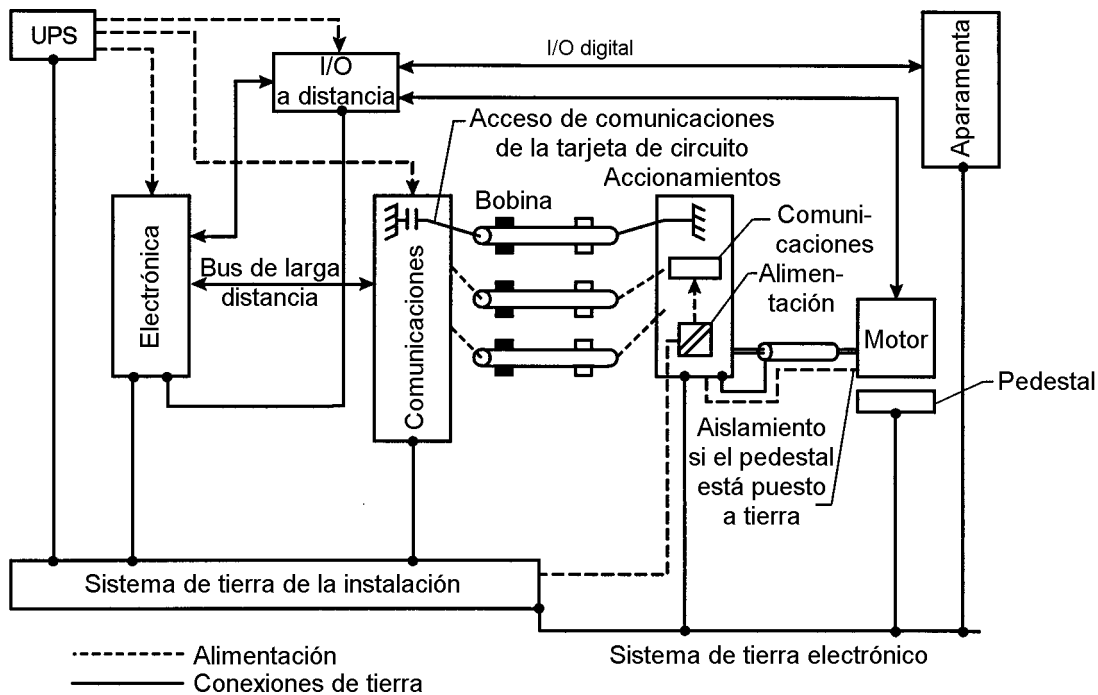


Fig. A.3 – Sistema de tierra para un controlador con convertidor y equipo electrónico asociado

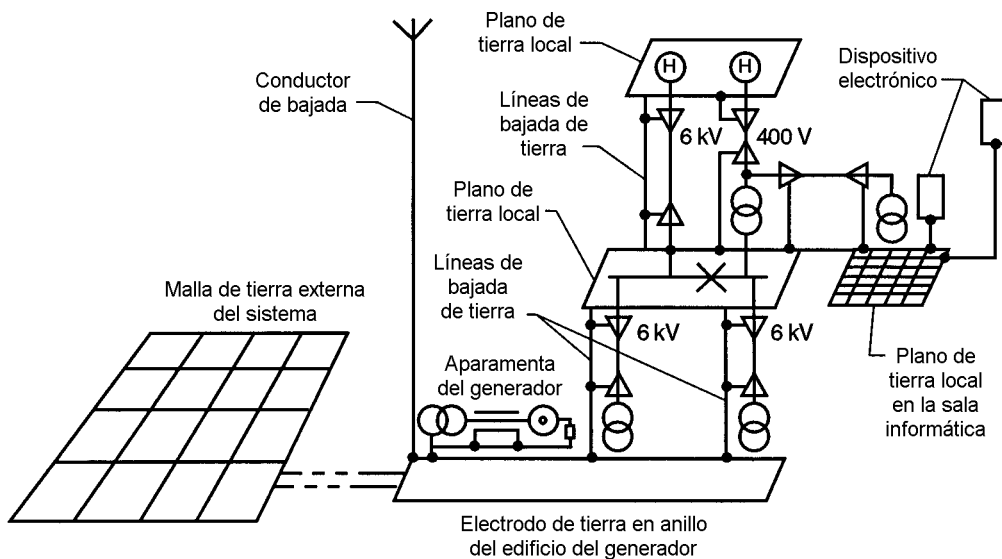
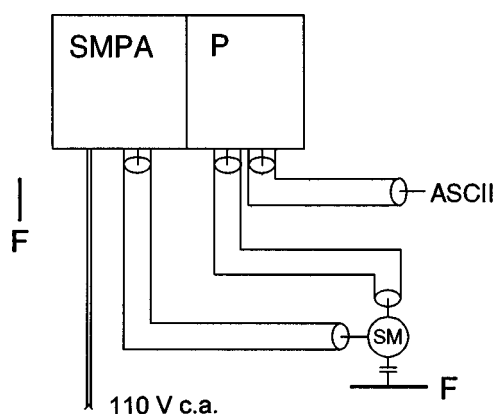


Fig. A.4 – Sistema de tierra de una red eléctrica incluyendo dispositivos electrónicos de control y de vigilancia

A.4 Estudio del caso de una unión con blindaje

En este caso, un servomotor (SM) estaba alimentado por un amplificador de potencia en modo conmutado (switched mode power amplifier, SMPA) controlado por un microprocesador P integrado (figura A.5). Las señales de realimentación emitidas por el SM y transmitidas al procesador del SMPA correspondían a la posición, por un codificador digital, y al par. Las entradas del procesador estaban constituidas por informaciones digitales RS232 en código ASCII, en la secuencia “dirección del SMPA” y “datos”. Una unidad simple SMPA/SM, conectada a la alimentación, y un ordenador que encargaba del procesador del SM funcionaban correctamente. Hubo problemas serios cuando varias unidades fueron implantadas en una gran máquina de tratamiento en la que un solo ordenador principal controlaba el proceso y una sola instalación eléctrica alimentaba los SMPAS (110 V c.a.), con todas las líneas de datos ASCII interconectadas en serie.



NOTA – El servomotor (SM) se alimenta por un amplificador de potencia en modo conmutado (SMPA), controlado a su vez por un microprocesador P y alimentado a 110 V c.a. Las señales de realimentación que provienen del motor y son transmitidas al procesador indican la posición y/o el par.

Fig. A.5 – Disposición inicial de los cables de alimentación y control

Se solicitó a un ingeniero especialista en CEM ayudar a resolver este problema. Las unidades SMPA/SM habían sido suministradas por un tercero. Ningún esquema había sido presentado al constructor de la máquina de proceso. Teniendo en cuenta la configuración de las tarjetas SMPA, queda claro que ningún filtrado o un muy bajo filtrado estaba presente en la salida del SMPA o al nivel de sus líneas de alimentación eléctrica.

Las corrientes de MC se midieron en todos los cables conectados al SMPA. Cuando el motor llegaba a su par máximo, se podían medir corrientes de MC de alrededor de 1 A, con tiempos de subida inferiores al microsegundo, en el cable situado entre el SMPA y el SM. El gran bucle de corriente MC comprendía el cable, la capacidad parásita entre los arrollamientos del motor y el chasis, el armazón (F en la figura A.5) de la máquina y la alimentación eléctrica igualmente unida al armazón. Importantes acoplamientos con otros circuitos cerrados vecinos eran posibles.

En consecuencia, fuertes corrientes de MC pasaban por el cable, de la alimentación eléctrica, así como por el cable situado entre el ordenador de control y el procesador del SMPA.

El problema fue resuelto sobre la base del razonamiento siguiente: puesto que una unidad SMPA/SM simple no estaba sometida a perturbaciones, las corrientes de MC de cada unidad no eran las responsables de su disfuncionamiento. La causa más probable de los problemas era una destrucción de los mensajes ASCII entre el ordenador principal y otros procesadores.

Debido a la falta de tiempo disponible para resolver este problema, como es habitualmente el caso cuando se sospecha de problemas de la CEM en un equipo de proceso, era preciso encontrar un procedimiento seguro para obtener la CEM. Los costes presentaban una importancia menor, lo que no resulta raro en esas condiciones.

Primeramente, el SMPA fue dotado de un panel frontal de latón, que constituía así un conductor más fiable que el conductor inicial anodizado (figura A.6). En segundo lugar, el blindaje del cable, ya implantado entre el SM y el SMPA, fue conectado a este panel en el SMPA, así como el chasis del SM. Al principio, el blindaje solo estaba conectado a tierra en el SMPA. La misma solución fue adoptada para el blindaje de los cables que transmiten datos de posición y de par, situados entre el SM y el SMPA.

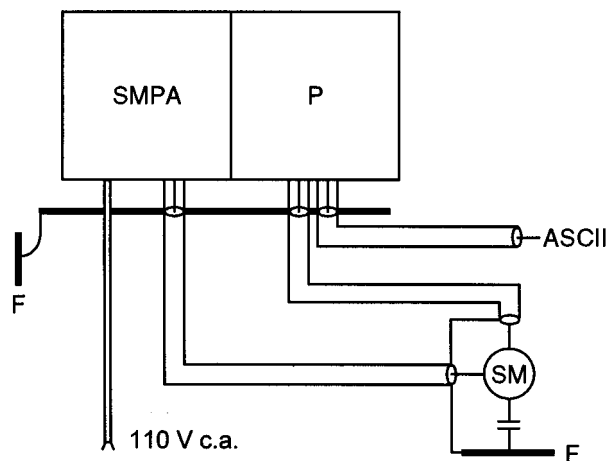
El blindaje y el panel de latón formaban un camino compacto para la corriente de MC, sobre el cable de alimentación del SM. La corriente de MC total que pasaba por el blindaje y el cable fue así dividida por 20.

En tercer lugar, el blindaje del cable de transmisión de los datos ASCII fue conectado al panel de latón, así como a la tierra local en el otro extremo del cable. Un simple filtro RC paso-bajo fue implantado en las líneas de datos ASCII en la entrada y salida de cada procesador. La frecuencia de corte fue ajustada a la velocidad de modulación de la comunicación.

Alrededor de dos días fueron necesarios para determinar y poner en práctica las modificaciones. Al fin de esta operación, hasta siete unidades SM/SMPA funcionarán en perfecta armonía.

Son útiles algunas observaciones:

- Por supuesto, se intentó igualmente instalar un filtro de MC a la salida del SMPA, pero se pudo ver que los dispositivos electrónicos perdían su estabilidad con numerosos tipos de filtro.
- Se había considerado instalar un filtro en la alimentación con corriente alterna, pero esta medida se reveló innecesaria.
- Este ejemplo ha sido descrito aquí para mostrar que aunque incluso si el ingeniero en CEM no era familiar con los detalles del funcionamiento de los dispositivos electrónicos, el problema ha sido totalmente resuelto después de un atento examen de las corrientes de perturbación de MC y de la adopción de medidas que permiten mejorar los caminos de las corrientes de MC



NOTA - Un panel frontal de latón, cuidadosamente conectado al chasis de la máquina F, ha reemplazado el original anodizado, en el SMPA. Todos los blindajes de los cables han sido conectados a este panel de latón, así como a la tierra local en el otro extremo.

Fig. A.6 –Diseño mejorado en la conexión de los blindajes

ANEXO B (Informativo)

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LOS CABLES CON VISTAS A MEJORAR LA CEM:
COMPORTAMIENTO DE Z_t EN FUNCIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE CABLES

B.1 Generalidades

Este informe técnico se funda de forma constante en una impedancia de transferencia Z_t generalizada, no solamente para los cables coaxiales, sino igualmente para otros tipos de cables y para los accesos de los equipos. Se presenta a continuación una breve descripción de la impedancia de transferencia Z_t para diferentes cables, con relación al modo de conexión en los dos extremos de estos cables.

Para la transmisión de señales asimétrico, los dos tipos de cables siguientes pueden considerarse como soluciones extremas:

- a) cable bifilar;
- b) cable coaxial dotado de un conductor externo sólido.

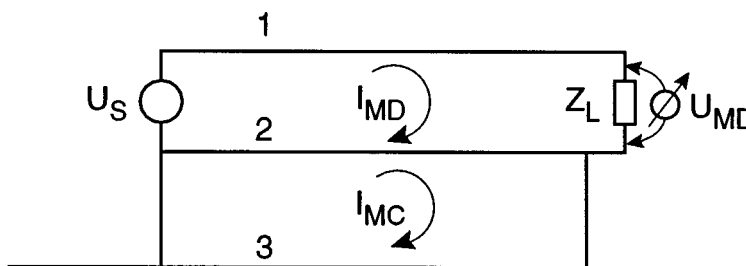
Otros tipos de cables, tales como los cables dotados de un conductor externo trenzado, presentan una Z_t a medio camino entre estas dos soluciones extremas, que puede ser tomada a partir de ellos. Para una descripción detallada de los métodos de medida y para una visión general de Z_t de los cables AF, el lector ha de referirse a otros documentos, como los elaborados por el Comité Técnico 46 de CEI.

B.2 Dos hilos paralelos

B.2.1 Circuito de MD asimétrico

En la figura B.1, una señal de MD es enviada por un circuito *asimétrico*, a través de un cable conectado a la tierra local en sus dos extremos. En esta versión simplificada de la figura 17 (véase el apartado 7.2), la puesta a tierra se realiza de manera explícita. Se presentan otras posibilidades en el apartado 7.2. Para este circuito asimétrico de señal, se elige naturalmente hacer pasar todos los I_{MC} por el hilo conectado a la tierra. El receptor (de impedancia de entrada elevada, Z_L) en el extremo del cable presenta una tensión en MD, U_{MD} , que se compone de la señal esperada, U_S , y de una tensión de perturbación suplementaria, U_{dist} , debida a:

- a) la resistencia del hilo de retorno,
- b) el flujo magnético en el circuito de MD, provocado por la corriente I_{MC} .



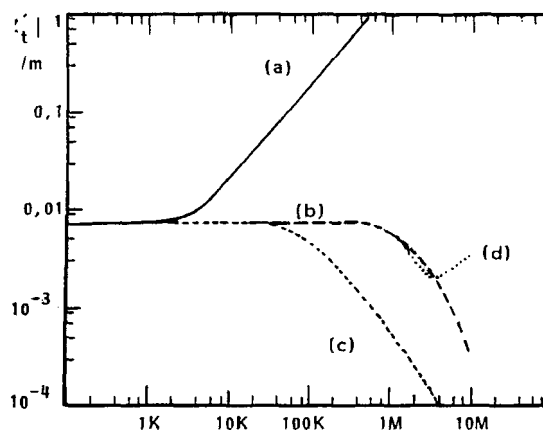
NOTA – La tensión en MD, U_{MD} , lado receptor, se compone de la señal esperada, U_S y de una componente de perturbación, U_{dist} , provocada por I_{MC} y acoplada en el circuito de DM a través de la impedancia de transferencia Z_t . El significado de 1, 2 y 3 se explica en el capítulo B.4.

Fig. B.1 – Transmisión asimétrica de señales

Se parte de la hipótesis de que el equipo, en sus dos extremos, no contribuye a la impedancia de transferencia total. La tensión U_{dist} es pues proporcional a la longitud de la línea. Para las frecuencias cuya longitud de onda es superior a la longitud l del cable, se puede escribir según la ecuación (B.1):

$$U_{\text{int}} / (I_{\text{MC}} \cdot l) = Z'_t = R' + j\omega \cdot M' \quad (\text{B.1})$$

donde R' designa la resistencia del hilo conectado a tierra, eventualmente aumentada por el efecto pelicular. La inductancia mutua puede ser objeto de una aproximación: $[(\mu_0 / 2\pi) \log (d/r)]$, donde d es la distancia entre los dos hilos del circuito de MD y r el radio del hilo conectado a la tierra. En el caso de un cordón de alimentación normalizado dotado de hilos de $2,5 \text{ mm}^2$, R' se eleva alrededor de $20 \text{ m}\Omega/\text{m}$, y M' se aproxima a $0,3 \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$. La figura B.2 presenta el comportamiento de Z'_t así como de la Z_t para otros tipos de cable, examinados más adelante. M' produce un aumento de Z'_t a frecuencias superiores a 4 kHz . Esta Z'_t no está influenciada por el trenzado de los hilos.



- a) Línea de transmisión bifilar (cobre, sección de $2,5 \text{ mm}^2$)
- b) Cable coaxial dotado de un conductor externo de cobre sólido de radio $r = 3 \text{ mm}$ y de espesor $d = 0,13 \text{ mm}$, (sección de $2,5 \text{ mm}^2$)
- c) Conductor externo del caso (b) subdividido en dos conductores externos de cobre distantes de 1 mm , $r = 3 \text{ mm}$ y 4 mm respectivamente, $d = 0,056 \text{ mm}$, sección total de $2,5 \text{ mm}^2$
- d) Comportamiento del cable en el caso (b), cuando aperturas en el conductor externo producen un valor M' asumido igual a $50 \text{ pH}/\text{m}$.

Fig. B.2 – Comportamiento de Z'_t en función de la frecuencia, para varias configuraciones de cables coaxiales (a), (b), (c) y (d)

Cuando la fuente y el receptor tienen una impedancia baja, una corriente I_{int} circula por el circuito de MD. Esta corriente se produce por I_{MC} por el desvío de Z_t . En un cable corto, la aproximación a baja frecuencia de I_{int} se da por la ecuación (B.2):

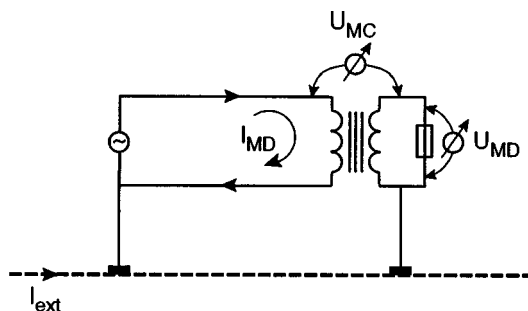
$$I_{\text{int}} = Z'_t \cdot I_{\text{MC}} \cdot l / Z_{\text{MD}} \quad (\text{B.2})$$

donde Z_{MD} designa la impedancia total del bucle de la corriente de MD: fuente, cable y receptor. La tensión de perturbación se reparte ahora por las diferentes impedancia en este bucle. Sobre Z_L , se observa la parte dada por la ecuación (B.3):

$$U_{\text{int}} = Z'_t \cdot I_{\text{MC}} \cdot l \cdot Z_L / Z_{\text{MD}} \quad (\text{B.3})$$

La corriente I_{MC} se mide correctamente por una sonda de corriente situada alrededor del cable.

Como se indica en el apartado 7.6, el circuito de MC puede ser interrumpido a veces. Una tensión de MC se desarrolla durante esta interrupción. Según el equipo utilizado (por ejemplo, el transformador presentado en la figura B.3), esta tensión de MC presentará más o menos riesgo para el apartado. En caso extremo, una cebadura puede producirse y provocar una perturbación no controlable, hasta una destrucción del equipo. Ninguna interrupción es perfecta. La capacidad parásita local del transformador permitirá siempre la circulación de una corriente de MC. Esta capacidad parásita presenta una impedancia más baja a frecuencias superiores, lo que agrava el problema de perturbación.

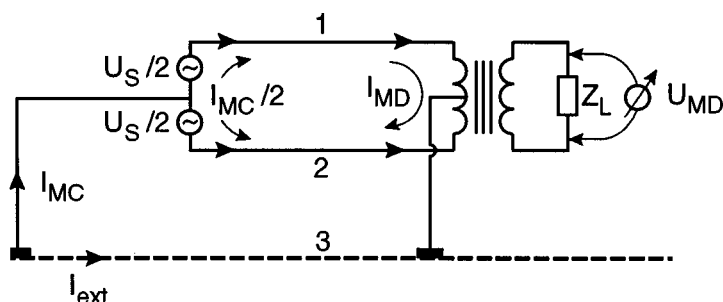


NOTA – En la interrupción del circuito de MC (el transformador en esta figura), una tensión en MC se desarrolla debido al flujo que atraviesa el bucle de tierra.

Fig. B.3 – Sistema de transmisión asimétrico, conectado a tierra en uno de sus extremos

B.2.2 Circuito de MD simétrico

Cuando el circuito de MD es *simétrico*, I_{MC} se reparte naturalmente sobre los dos hilos, de forma igual. En el caso de un circuito de MD perfectamente simétrico, Z'_t es igual a cero (figura B.4). No existe ninguna inducción magnética en el bucle de corriente de MD a partir de las dos mitades iguales de la corriente I_{MC} a través de los dos hilos. La tensión en MD provocada por la resistencia de los hilos aparece efectivamente en U_{MD} . La reducción real en lo que respecta al cable asimétrico depende de la simetría a lo largo del cable y en el equipo de emisión y recepción. Se pueden obtener -40 dB tomando ciertas precauciones a bajas frecuencias. Es difícil mantener la asimetría en toda la gama de frecuencias o de amplitud de las perturbaciones (I_{MC}). De nuevo, el retorcimiento de los hilos no permite reducir las perturbaciones que provienen de la asimetría residual. Con equipos especiales, concebidos para soportar la corriente de MC a lo largo de los hilos que dirigen la corriente de MD cualquiera que sean las perturbaciones, se puede utilizar una transmisión simétrica sin que sea necesario un PEC.



NOTA – La red simétrica crea un camino bien definido para la corriente de MC, en cualquier condición a baja frecuencia. Es conveniente llevar un cuidado especial en la simetría a lo largo de la línea y en sus dos extremos, para evitar que las perturbaciones de MC sean convertidas en señales de MD. El significado de 1, 2 y 3 se explica en el capítulo B.4.

Fig. B.4 – Sistema de transmisión simétrico

El sistema representado en la figura B.4 comprende dos conexiones conductoras explícitas a tierra, en los dos extremos del cable. Se admite que una u otra de estas conexiones conductoras esté ausente, incluso que las dos estén ausentes en el caso de un circuito *flotante simétrico*, como es a menudo el caso de los sistemas audio profesionales, por ejemplo. Sin embargo, es conveniente estar al tanto de que las capacidades parásitas locales pueden constituir un camino para las corrientes de MC a AF.

B.3 Cable coaxial

La figura B.5 es la representación esquemática de un cable coaxial dotado de un conductor externo *sólido*. Para un conductor externo delgado (espesor de las paredes d), la Z'_t se obtiene por la ecuación siguiente (Kaden, 1956 [10]; Schelkunoff, 1934 [11]):

$$Z'_t = R'_{cc} \cdot k \cdot d / \sinh(k \cdot d) \quad (\text{B.4})$$

donde R'_{cc} es la resistencia en c.c. por metro del conductor externo,

$k = (1 + j) / \delta$, con la profundidad de la zona superficial del conductor externo, $\delta = (2\rho / \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega)^{1/2}$.

Los demás símbolos tienen la significación usual:

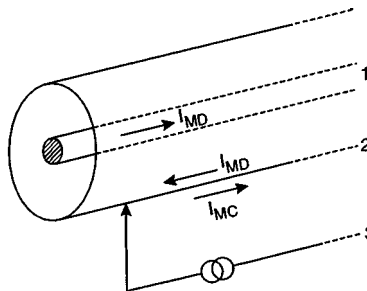
ρ = resistividad del material de las paredes,

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío,

μ_r = permeabilidad relativa del material de las paredes,

ω = frecuencia angular

La figura B.2 describe igualmente el comportamiento de esta Z'_t .



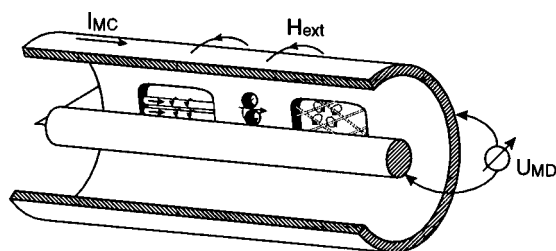
NOTA – La corriente de MD recorrida por el hilo interior vuelve por el conductor externo. La corriente de MC fluye por el conductor externo. La elección específica de las corrientes de MD y de MC, que corresponde a la de la figura B.1, se explica en el capítulo B.4.

Fig. B.5 – Caminos de corriente en un cable coaxial

Con relación al cable bifilar, la diferencia de comportamiento reside en la *disminución* de Z'_t . El efecto pelicular crea una separación eficaz de los circuitos de MD y MC. La corriente de MD retorna principalmente en la superficie interior del conductor externo, y la corriente de MC circula esencialmente en el exterior de este conductor. El campo magnético creado por I_{MC} se sitúa en el exterior del conductor externo sólido. Por consiguiente, no existe ninguna componente M' en Z'_t .

Es más frecuente tener un conductor externo *trenzado*. El campo magnético debido a I_{MC} inicialmente exterior al conductor trenzado, penetra por las aberturas, ranuras, orificios, etc., como muestra la figura B.6. Esta vez, existe una componente M' en Z'_t , pero es en general de varios órdenes de magnitud inferior a la de un cable bifilar: tiende hacia niveles de nH/m o pH/m, en función del tipo de cable y de su conductor externo.

Hay que observar que el comportamiento de Z'_t , diferente para el sistema bifilar asimétrico y el sistema coaxial, es únicamente debido a la configuración del metal y no depende de la sección transversal (en mm²) del conductor de retorno. El retorno elegido por la señal de MD toma forma de un hilo paralelo al hilo de señal o de un conductor envolviendo este hilo.



NOTA – El campo magnético H_{ext} debido a la corriente de MC en la pared de un cable trenzado penetra en parte por las aberturas de esta pared. Cuando un flujo limpio aparece en el circuito de MD, una tensión en MD se produce y puede ser medida en el extremo del cable.

Fig. B.6 – Tensión en modo diferencial inducida por un campo magnético en un cable coaxial con pantalla trenzada

B.4 Circuitos en modo diferencial y en modo común

Los capítulos B.2 y B.3 tratan de una transmisión de señales asimétrica por un cable bifilar o coaxial. El circuito de transmisión de las señales previstas se forma por los conductores 1 y 2 representados en las figuras B.1 y B.5, que encaminan una corriente, I_1 e I_2 respectivamente, en el mismo sentido. En el caso de la configuración asimétrica, el conductor 2 se conecta a la tierra local en los dos extremos del cable. La corriente de MC se elige generalmente igual a $I_1 + I_2$. Retorna por la tierra, constituyendo así el conductor 3 representado en las figuras B.1 y B.5. Para los cálculos, se puede partir de la hipótesis de que la corriente de MC pasa íntegramente por el conductor 2 puesto a tierra. El bucle de la corriente de MD se elige de forma que incluya el circuito de señal anteriormente mencionado, los conductores 1 y 2, la fuente de señal y la carga. La elección de los circuitos de MC y de MD implica que $I_1 = I_{MD}$ y que $I_2 = I_{MC} - I_{MD}$. Considérese, por ejemplo, un cable blindado: el blindaje constituye el camino de retorno preferente de una corriente de señal que atraviesa el hilo interior. Cuando el blindaje es sólido y buen conductor, las corrientes I_{MC} e I_{MD} representan los modos TEM apropiados. I_{MD} circula en la pared interior e I_{MC} en la pared exterior del blindaje, debido al efecto pelicular. El circuito de MC es conforme igualmente con la definición y los métodos de medida de la impedancia de transferencia Z_t .

En la figura B.1, la tensión en la entrada del receptor, a impedancia elevada, es la tensión en MD, U_{MD} , de acuerdo con la definición dada en 3.5. La contribución debida a la corriente de MC es igual a $[Z_t \cdot I_{MC} \cdot l]$, donde l designa la longitud del cable. Cuando la impedancia Z_{MD} del bucle de corriente de MD comprendida la impedancia de entrada del receptor, es baja, una parte de la corriente de MD, I_{MD} , circula debido a la tensión $[Z_t \cdot I_{MC} \cdot l]$ en Z_{MD} . Este fenómeno no afecta directamente al valor de I_{MC} o de Z_t .

Una transmisión de señal simétrica por un cable bifilar necesita terminaciones simétricas en los dos extremos y una disposición simétrica de los hilos 1 y 2 con relación al hilo 3, el hilo de tierra o retorno. Una elección razonable para la combinación de I_{MC} e I_{MD} , que permite una descripción simple, se constituye por $I_{MC} = I_1 + I_2$ e $I_{MD} = (I_1 - I_2) / 2$, o, inversamente, $I_1 = I_{MC} / 2 + I_{DM}$ e $I_2 = I_{MC} / 2 - I_{MD}$. Los valores elegidos para I_{MC} e I_{MD} corresponden a los modos de transmisión electromagnética para un cable simétrico. La elección de I_{MC} es análoga a la definición dada en 3.4.

De manera general, la corriente reales I_1 e I_2 pueden representarse por conjuntos, elegidos por métodos diferentes, de corrientes I_{MD} e I_{MC} . La matriz de transformación lineal será diferente en cada caso elegido. Es conveniente hacer uso de esta libertad para efectuar cálculos más fácilmente o con más comodidad y con fines de descripción de acuerdo con el comportamiento a alta frecuencia. Las dos elecciones propuestas anteriormente son fácilmente adaptables a cables con blindajes múltiples o con hilos múltiples, tomando en cuenta la definición complementaria de las corrientes más apropiadas y sus bucles. Es conveniente entonces que los bucles se cierren en el interior del cable. Sólo el bucle de corriente de MC se cerrará por el exterior del cable. Este procedimiento se sigue en C.2.1 y C.2.2.

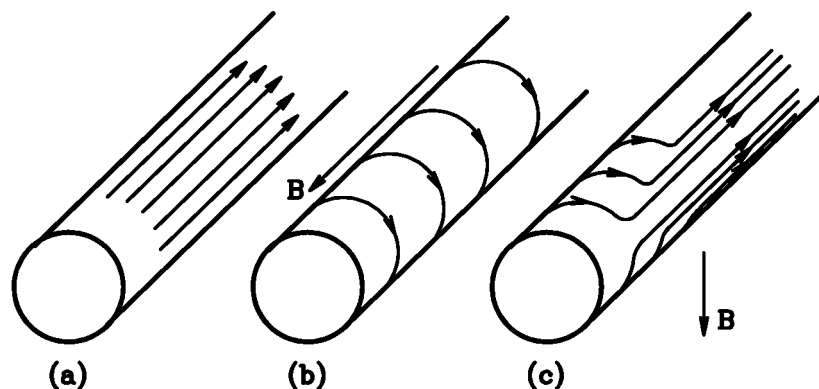
Como se ha descrito anteriormente, para las dos configuraciones (simétrica y asimétrica), a sonda de corriente situada alrededor del cable mide correctamente la corriente de MC. Por supuesto que Z_t puede variar mucho de un cable a otro en los dos sistemas.

B.5 Blindaje con relación a los campos E y B, por el conductor externo de un cable coaxial

El conductor externo tiene tres funciones. Primeramente forma un camino de retorno para la corriente de MD y es conveniente conectarlo en todos los casos a los dos extremos del circuito de MD. En segundo lugar, constituye una parte del circuito de MC como se indica en B.3. En tercer lugar, puede blindar el interior del cable contra los campos E y B exteriores, de ahí su denominación de “pantalla” o “blindaje”. La cuestión es saber si este aislamiento es eficaz y cuándo necesario.

B.5.1 Blindaje contra los campos E

Un conductor externo metálico sólido constituye una muy buena pantalla contra los campos E, en todas las frecuencias. Un campo E puede provenir de otro hilo, situado a cierta distancia del cable, y a cierta tensión con relación al conductor externo. Conectando este conductor externo, por al menos uno de sus extremos, a la tierra o al circuito de MC, se crea un camino de retorno para la corriente acoplada capacitivamente (corriente de desplazamiento) y se evitan así tensiones en MC elevadas en los dos extremos. La corriente inducida se representa en la figura B.7



- Corrientes longitudinales, entre los dos extremos conectados a tierra (el conductor externo forma parte de los circuitos de MD y MC), o que llegan hasta el conductor externo, bajo la forma de corrientes de desplazamiento, provocadas por un campo E exterior (el conductor externo es el blindaje). Este último circuito puede ser cerrado poniendo a tierra el conductor externo en un extremo.
- Corrientes que circulan en la superficie del conductor externo e inducidas por un campo B longitudinal (el conductor externo es el blindaje).
- Perfil de corrientes inducidas por un campo B perpendicular al eje del cable (el conductor externo es el blindaje).

Fig. B.7 – Corrientes en el conductor externo de un cable coaxial

La presencia de aberturas en el conductor externo permite a las líneas del campo E penetrar en el circuito de MD. La corriente inducida en el hilo de señal puede describirse por una admitancia de transferencia, Y_t . Esta admitancia es más a menudo una capacidad situada entre un hilo exterior o la tierra y el hilo exterior del cable coaxial. En el caso de un conductor externo metálico sólido, Y_t es igual a cero.

B.5.2 Blindaje contra los campos B

Se pueden distinguir dos orientaciones del campo B exterior: la orientación perpendicular y la orientación paralela al eje del cable. Las figuras B.7 (b) y B.7 (c) representan las corrientes inducidas en el conductor externo. Ninguna corriente neta es inducida en el blindaje. Los campos exteriores penetran en un conductor externo sólido, a frecuencias tales que $r \cdot d < \delta^2$, donde r designa el radio del conductor externo, d y δ están definidos en B.3. En el caso de un conductor externo trenzado, la forma de la corriente es más compleja y da lugar a un aislamiento menor. Para los cables más corrientemente utilizados, con un conductor externo trenzado y un producto $[r \times d]$ pequeño, un campo B exterior penetra en el interior del cable, no obstante sin inducir allí una tensión en MD cuando el conductor central está situado sobre el eje del cable.

Un campo B local del cable **no induce** una corriente de MC. Es conveniente considerar, para esta corriente, el flujo total que atraviesa el circuito de MC, así como la impedancia total del bucle de corriente de MC.

B.5.3 Blindaje contra las ondas EM

De manera general, en las instalaciones, un cable coaxial se sitúa cerca de grandes superficies metálicas. Las ondas EM incidentes son fuertemente modificadas por fenómenos de reflexión. El conductor externo del cable solo constituye uno de los conductores puestos a tierra. La corriente es inducida en este conductor externo. El acoplamiento al circuito de MD se describe por Z_t . Las líneas de campo eléctrico se terminan en el conductor externo del cable, principalmente en sentido perpendicular. Algunas líneas de campo E pueden pasar por los orificios del conductor externo e inducir una corriente de MD. De nuevo, el acoplamiento por Z_t es a menudo predominante.

B.5.4 Emisión de ondas EM

Las emisiones por un cable coaxial son descritas con precisión en dos tiempos: primeramente, el circuito de MD se acopla, por Z_t , al circuito de MC, aquí el conductor externo. El circuito de MC o el conductor externo funciona después como una antena. Se puede impedir la aparición de emisiones parásitas reduciendo los dos parámetros de transferencia o aumentando la impedancia de la corriente de MC, por ejemplo colocando toros de ferrita alrededor del cable. Otra solución consiste en modificar la configuración del circuito de MC de forma que este circuito se convierta en una antena de calidad mediocre. Una utilización apropiada de metal cerca del cable constituye también una buena ayuda.

B.6 Acoplamiento al cable bifilar sin blindaje

B.6.1 Campos E

Las líneas de campo E que se terminan en la superficie de un cable bifilar provocan una corriente (de desplazamiento) que atraviesa los dos hilos. La figura B.8 representa un circuito equivalente. Cuando los hilos se disponen de manera simétrica con relación a la tierra próxima, las corrientes I_{int} que circulan por ambos cables son iguales. La utilización de hilos trenzados ayuda igualmente a repartir las corrientes de manera más homogénea entre los dos hilos.

Las tensiones de perturbación en MC y MD en los extremos del cable dependen:

- a) de las impedancias en los dos extremos del cable;
- b) de la capacidad entre los hilos;
- c) de si los circuitos están equilibrados o no.

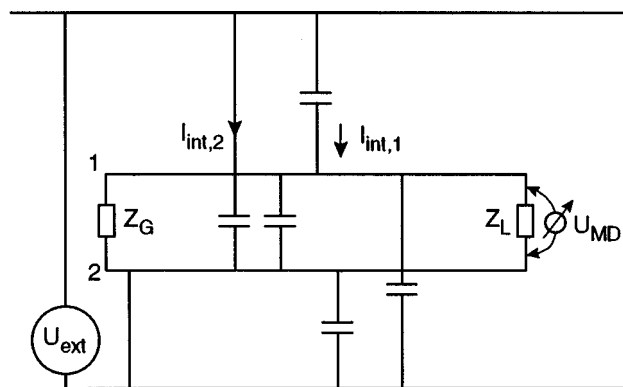


Fig. B.8 – Cable bifilar perturbado por una toma cercana, a la tensión U_{ext}

La tensión de perturbación en MD, $U_{MD,dist}$ es igual a cero para una terminación perfectamente simétrica. Como se ha indicado precedentemente, esta simetría es prácticamente imposible de obtener en una gama de frecuencias extendida. En el caso de una terminación asimétrica, con un hilo conectado a tierra, el valor $U_{md,int}$ se obtiene por la ecuación (B.5) siguiente:

$$U_{MD,int} = U_{ext} \cdot Y'_t \cdot I \cdot Z_{par} \quad (B.5)$$

donde Z_{par} designa la impedancia de la fuente y la carga en paralelo (véase la figura 18). Además, la corriente I_{int} que pasa por el hilo conectado a tierra puede inducir una tensión en MD de segundo orden, por Z_t .

B.6.2 Campos B

Campos B perpendiculares al plano de los hilos producen un flujo magnético entre estos hilos. El trenzado de los dos hilos permite crear un conjunto de pequeñas zonas con un flujo inverso en el bucle del circuito de MD. El flujo total que circula en el circuito de MD se reduce así.

Los dos hilos pueden ser trenzados de manera desigual. En el peor de los casos, uno de ellos se enrolla en espiral alrededor del otro que permanece derecho. Se forma entonces una zona de captura de flujo por los campos B en paralelo a la línea, lo que provoca una tensión de inducción en MD, que no se observa en el caso de cables no trenzados o trenzados de manera homogénea.

B.6.3 Acoplamiento con ondas EM

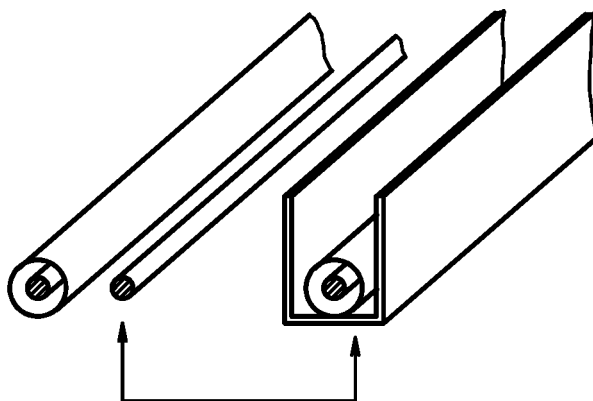
El cable bifilar simétrico constituye una antena mediocre en lo que respecta a I_{MD} , incluso a frecuencias superiores a 100 MHz. Una asimetría puede producirse en la longitud del cable o en sus dos extremos, provocando una conversión de las señales de MD en señales MC, e inversamente. Para I_{MC} , el cable constituye a menudo una antena eficaz, tanto para la emisión como para la recepción. Esta antena puede ser considerada menos eficaz mediante un metal situado cerca, como se indica para el cable coaxial en el capítulo B.3.

ANEXO C (Informativo)

**VENTAJAS PRODUCIDAS POR CONDUCTORES SUPLEMENTARIOS
SITUADOS PARALELAMENTE A UN CABLE**

C.1 Generalidades

El conductor de tierra paralelo (PEC) ha sido propuesto ya en los apartados 7.3 y 7.5. Este PEC se destina a reducir la corriente de MC a través de los hilos que transportan igualmente las señales de MD (véase la figura C.1). De hecho, ahora tenemos dos circuitos en el exterior del circuito MD: el primero es el circuito intermedio entre el PEC y el cable, mientras que el segundo está constituido por el gran circuito de MC en el exterior del PEC.



A la izquierda: Cable coaxial dotado de un hilo paralelo de cobre destinado a desviar una parte de la perturbación de corriente que proviene del cable. Cuando el conductor externo del cable y el hilo paralelo tienen un tamaño comparable y están unidos uno al otro en sus dos extremos, una perturbación de corriente en AF es repartida por el conductor externo y el hilo paralelo en componentes casi iguales

A la derecha: Cable coaxial en un conducto. La mayor parte de la corriente de MC fluye por este conducto como en la figura C.2.

Fig. C.1 – Cables coaxiales con conductores de tierra paralelos

El PEC está siempre unido a la tierra local en sus dos extremos. Para disminuir la impedancia de transferencia, este PEC puede estar constituido por un hilo paralelo, un panel plano, un conducto, una (segunda) trenza, un tubo con paredes sólidas (véase la figura 18). El hilo paralelo y el tubo con paredes sólidas son las equivalentes de los circuitos de MD descritos en B.2.1. y B.2.2, donde el hilo de señal es reemplazado por un cable. El documento de referencia (Vance, 1976 [6]) da unas expresiones equivalentes para la admitancia de transferencia global.

C.2 Ejemplos de conductores suplementarios

C.2.1 Cable coaxial con dos conductores externos

Consideramos un cable coaxial con dos conductores externos sólidos mantenidos a cierta distancia el uno del otro por un espacio en el aire (figura C.2). Estos dos conductores están interconectados en los dos extremos del cable.

Con fines descriptivos, seguimos el mismo orden que en B.1. Además del circuito de MD, se representan dos circuitos (véase la figura C.2). El circuito intermedio MI está ahora muy definido. El circuito externo es el gran circuito (MC) inicialmente presente, pero modificado aquí por el PEC. El acoplamiento entre el circuito MI y el circuito de MC se crea por Z'_t del PEC. La corriente MC circula por el conducto, Una corriente perturbadora I_{MI} circula por el conductor externo del cable, en el bucle intermedio formado por este conductor externo y el conducto. En el blindaje del cable, la corriente I_{MI} viene a ser según la ecuación (C.1):

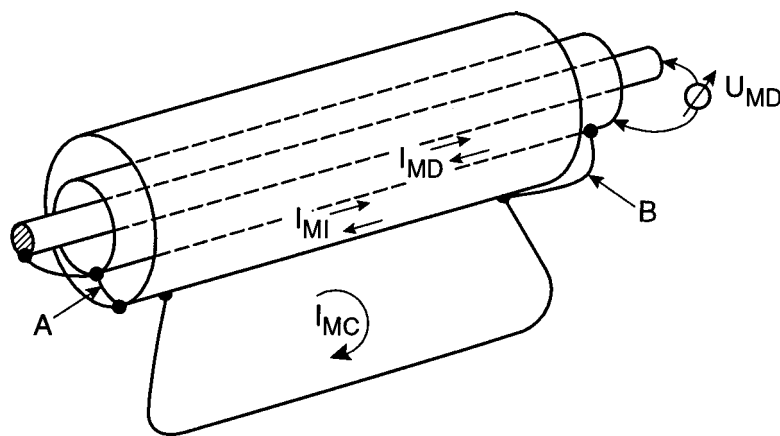
$$I_{MI} = I_{MC} \cdot Z'_{t,PEC} \cdot I / Z_{MI} \quad (C.1)$$

donde $Z'_{t,PEC}$ designa la impedancia de transferencia del PEC, y Z_{MI} la impedancia del bucle MI. En una buena aproximación, la impedancia de transferencia global Z'_t se obtiene con la ecuación (C.2) siguiente:

$$Z'_t = Z'_{t,PEC} \cdot Z_{t,MI} / Z_{MI} \quad (C.2)$$

donde $Z_{t,MI}$ designa la impedancia de transferencia entre el circuito MI y el circuito de MD. La corriente I_{MI} es más pequeña que I_{MC} cuando la impedancia de transferencia del conducto ($Z'_{t,PEC}$) es más pequeña que la impedancia del bucle MI (Z_{MI}). Esta condición se puede satisfacer fácilmente con formas de conducto y posiciones de cable habituales. La impedancia Z_{MI} del bucle MI puede ser elegida a voluntad utilizando de manera apropiada un espacio en el aire, ferrita, hierro o un mu-metal. Esta condición se puede satisfacer fácilmente con formas de conducto y posiciones de cable habituales. Esta impedancia variará en función de la aplicación (véase Vance, 1976 [6]).

La impedancia de transferencia global es obtenida con una buena aproximación por la ecuación (C.1). La impedancia Z_{MC} puede entonces escribirse $R_1 + R_2 + j\omega \cdot L$, donde R_1 y R_2 designan las resistencias de los dos conductores y L describe el flujo magnético entre los conductores exterior e interior, estos tres parámetros siendo considerados en función del bucle interior de la corriente de MC. La figura B.2 representa un ejemplo obtenido por cálculo. Las dos resistencias y la inductancia pueden ser mejoradas colocando una ferrita o un mu-metal en el bucle de la corriente de MC, tal como se indica en el capítulo 8. Estos cables están disponibles en el comercio, bajo la denominación de “cables con IEM bajo” o de “cables con blindaje reforzado”. Es conveniente observar que a bajas frecuencias (varios kilohertzios), es la inductancia, antes que la resistencia, la que determina el flujo de corriente incluso en presencia de un espacio en el aire. Los cables coaxiales con tres conductores externos pueden ser considerados siguiendo el mismo razonamiento.



NOTA – En un cable coaxial con dos conductores externos, las corrientes circulan en los tres circuitos (MD, MI y MC), como se indica. Los dos conductores externos se unen conjuntamente en los extremos A y B.

Fig. C.2 – Cable coaxial con dos conductores externos

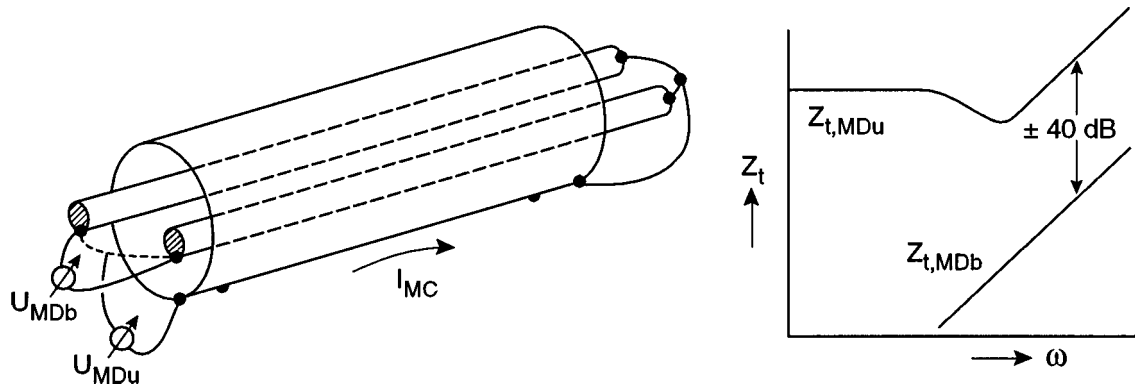
C.2.2 Cable bifilar simétrico situado en un conductor externo

Para baja frecuencia, un ejemplo es un cable de micrófono simétrico (véase figura C.3). Existen dos modos diferenciales en el interior del blindaje, un modo simétrico (MDb) entre los dos hilos y un modo asimétrico (MDu) para los dos hilos paralelos al blindaje que forma el retorno. Las dos principales tensiones son U_{MDb} entre los dos hilos y U_{MDu} entre los dos hilos y el conductor externo. Existen igualmente dos impedancias de transferencia, que describen el acoplamiento entre la corriente de MC (I_{MC}) que atraviesa el conductor externo:

- $Z_{t,MDb}$ describe la componente perturbadora en U_{MDb} provocada por I_{MC} ;
- $Z_{t,MDu}$ describe la componente perturbadora en U_{MDu} .

El comportamiento de los dos Z_t se representa en la figura C.3. $Z_{t,MDu}$ se comporta como Z_t en el caso de un hilo simple en un conductor externo. Véase la curva (d) de la figura B.2. $Z_{t,MDb}$ no tiene componente resistiva. La parte inductiva es mucho más baja que para $Z_{t,MDu}$. Se puede obtener un valor de -40 dB teniendo un cuidado especial en la configuración. Los valores efectivos de $Z_{t,MDu}$ dependen fuertemente de la configuración del cable y de su historia, de la técnica de montaje, etc. Por tanto la figura C.3 no presenta ninguna escala absoluta.

En el caso de un circuito de MD flotante, es decir, no puesto a tierra en ninguno de sus extremos, como es el caso, por ejemplo, de algunos circuitos audio, la tensión U_{MDu} está repartida por las interrupciones en los dos extremos.

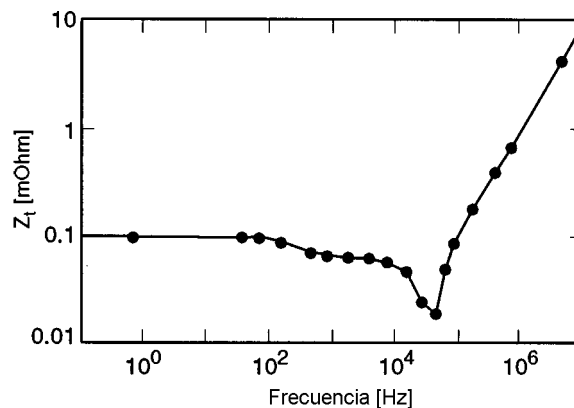


- A la izquierda : Cable bifilar simétrico situado en un blindaje.
- A la derecha: Impedancia de transferencia para los dos circuitos de corriente MD.

Fig. C.3 – Impedancias de transferencia en un par blindado equilibrado

C.2.3 Conductos que forman conductores externos

La figura C.4 representa la Z_t calculada para una conducción general (van der Laan, 1993 [12]). Las dimensiones de este conducto de aluminio son las siguientes: altura h igual a dos veces la anchura, es decir 9 cm (véase igualmente la figura C.5). El espesor de las paredes es de 1 mm. El hilo de medida está situado a 0,75 mm por encima del punto central de la parte inferior de este conducto. Un conducto de cobre presenta una resistencia en c.c. ligeramente inferior. Un conducto de acero del mismo tamaño presenta una resistencia en c.c. superior, pero su $|Z_t|$ disminuye a una frecuencia inferior, con relación a un conducto de aluminio o de cobre cuando el acero presenta un valor μ_r alto. Además, el acero permite una atenuación debido al efecto pelicular para las corrientes MI en el interior del conducto y para las corrientes exteriores. Los conductos de acero son los conductos preferentes.

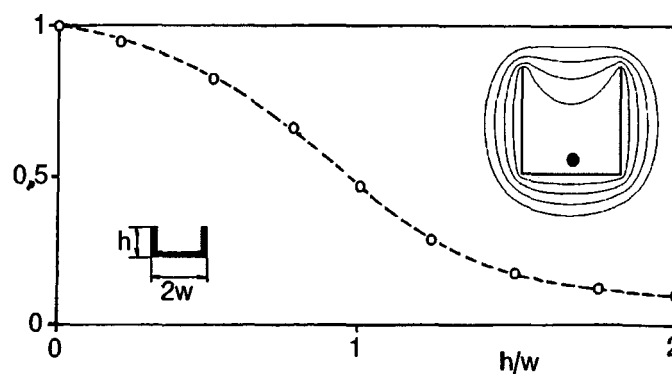


NOTA – La curva da la impedancia Z_t por metro, para un conductor de aluminio de 1 mm de espesor, de altura $h = 2$ veces la anchura = 90 mm, con un hilo de medida situado a 0,75 mm por encima del centro de la parte inferior. Los puntos corresponden a los valores calculados. La línea es una interpolación. Por debajo de 100 Hz, Z_t es igual a la resistencia en c.c. Por encima de 100 Hz, la corriente se concentra en los bordes del conductor, y Z_t disminuye. En alrededor de 7 kHz, el efecto pelicular llega a ser importante. Por encima de 40 kHz, Z_t está dominada por una componente $M' = 150 \text{ pH/m}$ para este conductor y para esta posición del cable.

Fig. C.4 – Ejemplo de la variación de la impedancia de transferencia en función de la frecuencia para un conductor de aluminio

Para los conductos, la componente M' depende poco del equipo y mucho de la configuración. La figura C.5 (van Houten, 1990 [9]) representa la variación de M' en función de la relación anchura/altura. El factor g designa la relación entre la componente M' de Z_t para un conductor y la componente M' para un panel de referencia plano. En esta comparación, cada conductor de dimensiones apropiadas ($2 \times h + 2 \times w$) se realiza doblando un panel plano de espesor y anchura total constantes. La corriente I_{MC} se mantiene igualmente constante. Los conductos profundos se prefieren por razón de su M' baja.

A una altura determinada, la componente M' depende igualmente de la posición del cable sobre la parte inferior. Los campos magnéticos disminuyen cerca de los ángulos, tal como se indica en el esquema de la figura C.5. La componente M' de Z_t disminuye en consecuencia.



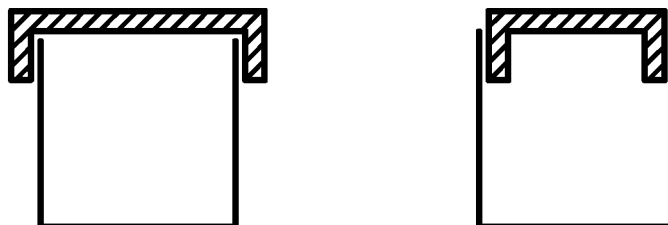
NOTA – La curva da la inductancia mutua M para un conductor, comparada a la de una placa de las mismas dimensiones [$2 \times h + 2 \times w$]. El esquema representa varias líneas de campo magnético para un conductor de altura $h = 2 \times w$.

Fig. C.5 – Inductancia mutua y campo magnético para un conductor o tendido de cables

C.2.4 Tapas situadas en un conductor

Una buena tapa responde a los mismos requisitos que el conductor: estructura contigua, conectada de manera muy conductora al conductor, al menos en los dos extremos. Es preferible una tapa dotada de numerosos contactos, por ejemplo resortes metálicos en toda su longitud.

Cuando un acceso fácil al cable es requerido también, se puede utilizar una tapa aislada, al costo de una impedancia de transferencia más alta. La superposición entre la tapa y el conducto es importante. Una tapa interior es preferible, en la medida en que permite dividir por dos el valor de M' para el conducto y la tapa (van Houten, 1990 [9]).



NOTA – Desde el punto de vista CEM, las tapas interiores son preferibles debido al valor más bajo de la componente M' de la inductancia mutua.

Fig. C.6 –Tapas aisladas situadas en un conducto

C.2.5 Resonancias en el bucle de corriente de modo común

La utilización de un PEC permite hacer compacto el circuito MI. Las resonancias que se forman así en la línea de transmisión pueden mejorar la corriente MI en caso de interferencia armónica y, por lo tanto, hacer aumentar el acoplamiento del cable en los circuitos de corriente de MD. Una primera solución correctora sería cortocircuitar el circuito MI en breves intervalos irregulares. Esta medida permite acrecentar las frecuencias de resonancia, pero disminuye los factores de calidad debido a la atenuación por el efecto pelicular. La estructura irregular impide igualmente que las ondas progresivas penetren en los circuitos MI. Una segunda solución consiste en permitir una atenuación con la ayuda de resistencias o situando ferrita absorbente alrededor del cable, en el PEC.

ANEXO D (Informativo)

BIBLIOGRAFÍA

D.1 Documentos citados

- [1] Kouteynikoff, P. "Numerical computation of the grounding resistance of substations and towers", *IEEE Transactions PAS-99*, No. 3, May/June 1980, pp. 957-965.
- [2] Kuussaari, M., A.J. Pesonen, "Mesures de l'impédance de terre des postes HT", *Rapport 3602*, présenté à la session 1978 de la CIGRE (París).
- [3] Lu, I.D., R.M. Shier, "Application of a signal analyzer to the measurement of power system ground impedances", *IEEE Transactions PAS-100*, No. 4, April 1981, pp. 1918- 1922.
- [4] Montandon, E., "Bonding and routing practice with respect on lightning protection and EMC", *Proceedings*, 21st ICLP, Berlin, September 1992.
- [5] Schnetzer, G.H. and R.J. Fisher, "Measured responses of a munitions storage bunker to rocket-triggered lightning", *Proceedings*, 21st ICLP, Berlin, September 1992, pp. 237- 242.
- [6] Vance, E.D., *Coupling to Shielded Cables*, Krieger, 1976.
- [7] Goedbloed, J.J., *Electromagnetic Compatibility*, Prentice Hall, 1992, from a Dutch publication: *Elektromagnetische Compatibiliteit*, Kluwer, Deventer (Netherlands), 1990.
- [8] Benda, S., "Earthing and bonding in large installations", *ABB Review*, 1994, pp. 22-29.
- [9] van Houten, M.A., *Electromagnetic Compatibility in High-Voltage Engineering*, thesis, University of Technology, Eindhoven, Netherlands, 1990.
- [10] Kaden, H., *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*, 2nd edition, Springer Verlag, Berlin, 1959.
- [11] Schelkunoff, S.A., *The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields*, Bell Syst. Techn. J. 13 1934, pp. 532-579.
- [12] van der Laan, P.C.T, M.J.A.M. van Helvoort, A.P.J. van Deursen, M.A. van Houten, "New developments in grounding structures for the protection of micro-electronics", *Proc. Int. Zürich Symp. on EMC*, Zürich, 1993, pp. 415-418.

D.2 Documentos consultados

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

CEI 61000-2-3:1992 – *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 3: Descripción del entorno. Fenómenos radiados y conducidos a frecuencias distintas de las de la red.*

IEEE Standard 81-1980: *Guide for measuring ground resistances and potential gradients in the earth.*

Laurent, P .G., Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre", *Revue Générale d'Electricité*, T 81 Nos 7/8 et 9, 1972.

Sunde, E.D., *Earth conduction effects in transmission systems*, Dover Publ. Inc., New York, 1968.

Tagg, G.F., *Earth resistances*, George Newnes, 1964.

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD DE VIGO