

Diciembre 2000

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 2: Entorno

Sección 10: Descripción del entorno IEMN-GA

Perturbaciones conducidas

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-10: Environment. Description of HEMP environment. Conducted disturbance.

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2-10: Environnement. Description de l'environnement IEMN-HA. Perturbations conduites.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 61000-2-10 de febrero 1999, que a su vez adopta la Norma Internacional CEI 61000-2-10:1998.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 208 *Compatibilidad Electromagnética* cuya Secretaría desempeña UNESA.

ICS 33.100.01

Descriptores: Compatibilidad, impulsión, magnetismo, radiación nuclear, explosión, altitud, onda electromagnética, perturbación radioeléctrica, entorno, medio ambiente, reacción nuclear, energía nuclear, forma de onda, descripción, interferencia electromagnética, campo electromagnético.

Versión en español

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 2: Entorno
Sección 10: Descripción del entorno IEMN-GA
Perturbaciones conducidas
(CEI 61000-2-10:1998)

Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 2-10: Environment. Description of
HEMP environment. Conducted
disturbance.
(IEC 61000-2-10:1998)

Compatibilité électromagnétique (CEM).
Partie 2-10: Environnement. Description
de l'environnement IEMN-HA.
Perturbations conduites.
(CEI 61000-2-10:1998)

Elektromagnetische Verträglichkeit
(EMV).
Teil 2-10: Umgebungsbedingungen
Beschreibung der HEMP-Umgebung
Leitungsgeführte Störgrößen.
(IEC 61000-2-10:1998)

Esta norma europea ha sido aprobada por CENELEC el 1999-01-01. Los miembros de CENELEC están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CENELEC, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CENELEC en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CENELEC son los comités electrotécnicos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

CENELEC
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN ELECTROTÉCNICA
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 35 B-1050 Bruxelles

ANTECEDENTES

El texto del documento 77C/61/FDIS, futura edición 1 de la Norma CEI 61000-2-10, preparado por el SC 77C, Inmunidad a los impulsos electromagnéticos nucleares de alta altitud (HA-NEMP) del TC 77 Compatibilidad Electromagnética, de CEI, fue sometido al voto paralelo CEI-CENELEC y fue aprobado por CENELEC como EN 61000-2-10 el 1999-01-01.

Se fijaron las siguientes fechas:

- Fecha límite en la que la norma EN debe ser adoptada a nivel nacional por publicación de una norma nacional idéntica o por ratificación (dop) 1999-10-01
- Fecha límite de retirada de las normas nacionales divergentes (dow) 2001-10-01

Los anexos denominados “normativos” forman parte del cuerpo de la norma.

Los anexos denominados “informativos” se dan sólo para información

En esta norma, el anexo ZA es normativo y los anexos A, B, C y D son informativos.

El anexo ZA ha sido añadido por CENELEC.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional CEI 61000-2-10:1998 fue aprobado por CENELEC como norma europea sin ninguna modificación.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	6
Capítulos	
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	7
2 NORMAS PARA CONSULTA	7
3 GENERALIDADES	7
4 DEFINICIONES	8
5 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO IEMN-GA, PARÁMETROS CONDUCIDOS.....	11
5.1 Consideraciones introductorias	11
5.2 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA inicial.....	12
5.3 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA intermedio.....	13
5.4 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA final.....	14
5.5 Corrientes de antena.....	16
5.6 Entorno conducido interno por el IEMN-GA	21
ANEXO A (Informativo) DISCUSIÓN DEL ACOPLAMIENTO DEL IEMN-GA INICIAL EN LÍNEAS LARGAS.....	22
ANEXO B (Informativo) DISCUSIÓN DEL ACOPLAMIENTO DEL IEMN-GA INTERMEDIO EN LÍNEAS LARGAS	25
ANEXO C (Informativo) RESPUESTA DE LAS ANTENAS SIMPLES AL ENTORNO IEMN-GA INICIAL DEFINIDO POR LA CEL.....	26
ANEXO D (Informativo) MEDIDA DE LAS CORRIENTES DE ACOPLAMIENTO EN LOS CABLES EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS DE CENTRALES TELEFÓNICAS	41

INTRODUCCIÓN

La Norma CEI 61000 se ha publicado en partes separadas de acuerdo con la siguiente estructura:

- 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 estos límites 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: Guía de instalación y atenuación
 - Guías de instalación
 - Métodos y dispositivos de atenuación
- Parte 6: Normas genéricas
- Parte 9: Varios

Cada parte está dividida en varias partes, publicadas como normas internacionales o como informes técnicos, algunos de los cuales han sido publicados como secciones. Otros serán publicados con el número de la parte seguido de un guión y un segundo número identificando la subdivisión.

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 2: Entorno
Sección 10: Descripción del entorno IEMN-GA
Perturbaciones conducidas

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma internacional define el entorno IEMN-GA conducido (impulso electromagnético a gran altitud) consecuencia de una explosión nuclear a gran altitud.

Generalmente se estudian dos casos:

- las explosiones nucleares a gran altitud;
- las explosiones nucleares a baja altitud.

Para los sistemas civiles, el caso más importante es la explosión nuclear a gran altitud. En este caso, los otros efectos de la explosión nuclear: sacudidas, temblores de tierra, radiación ionizante nuclear y térmica, no están presentes a nivel del suelo.

Sin embargo, el impulso electromagnético asociado a una explosión puede perturbar o dañar los sistemas de comunicaciones, sistemas electrónicos o redes eléctricas, poniendo en peligro la estabilidad de la sociedad moderna.

El objeto de esta norma es establecer una referencia común para el entorno IEMN-GA conducido que permita definir unos niveles realistas para aplicar a los equipos perjudicados a fin de evaluar su funcionamiento.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta Norma Internacional. En el momento de la publicación las ediciones indicadas estaban en vigor. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta Norma Internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las normas indicadas a continuación. Los miembros de CEI y de ISO poseen el registro de las Normas Internacionales en vigor en cada momento.

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

CEI 61000-2-9:1996 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones radiadas. Norma básica de CEM.*

CEI 61000-4-24:1997 – *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 24: Métodos de ensayo para dispositivos de protección para perturbaciones conducidas de IEMN-GA. Norma básica de CEM.*

3 GENERALIDADES

Una explosión nuclear a gran altitud (superior a los 30 km) produce tres tipos de impulsos electromagnéticos que pueden observarse en la superficie terrestre:

- IEMN-GA inicial (rápido);
- IEMN-GA intermedio (medio);
- IEMN-GA final (lento).

Históricamente se ha puesto más interés en el IEMN-GA inicial al que se llamaba simplemente "IEMN-GA". Aquí se utilizará el término "IEM a gran altitud" o "IEMN-GA" para referirnos a los tres tipos. El término IEMN¹⁾ cubre muchas categorías de impulsos electromagnéticos nucleares, incluidos aquellos producidos por explosiones en superficie (SREMP)²⁾ o creados por sistemas espaciales (SGEMP)³⁾.

Dado que el impulso IEMN-GA está producido por una explosión a gran altitud, no se tendrán en cuenta en la superficie de la tierra otros entornos nucleares militares tales como los rayos gamma, ondas de calor o de choque. Los IEMN-GA y sus incidencias en los equipos electrónicos lejanos al punto de la explosión fueron constatados en los ensayos a gran altitud en el Pacífico Sur por los Estados Unidos y en la URSS al principio de los años 60.

Esta norma describe el entorno conducido inducido por el IEMN-GA en los cables y líneas de energía, en instalaciones internas o externas, y en antenas externas.

4 DEFINICIONES

Para el propósito de esta norma, las definiciones dadas en la Norma CEI 60050(161) así como las siguientes son de aplicación:

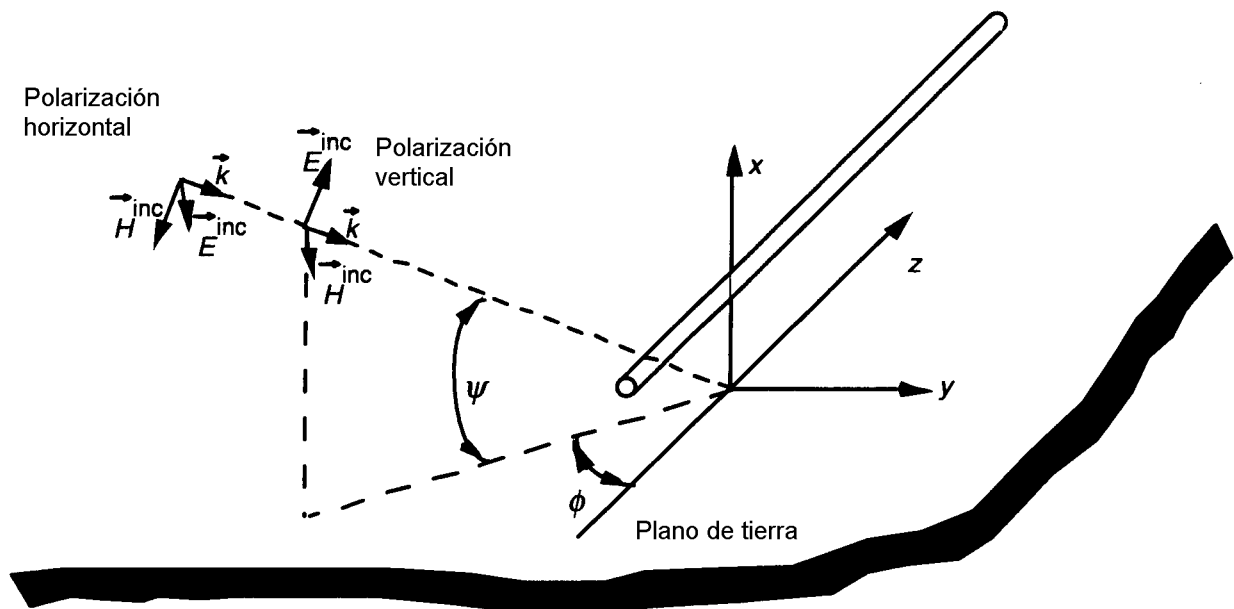


Fig. 1 – Geometría empleada para la definición de la polarización y de los ángulos de elevación Ψ y azimutal ϕ

4.1 ángulo de elevación en el plano vertical, Ψ : Ángulo medido en el plano vertical entre una superficie plana horizontal como la tierra y el vector de propagación (véase la figura 1).

4.2 ángulo azimutal, ϕ : Ángulo entre la proyección del vector de propagación en el plano de tierra y el eje principal del objeto perjudicado (eje z para la línea de transmisión de la figura 1).

1) IEMN: Impulso Electromagnético Nuclear.

2) SREMP: Impulso electromagnético nuclear de la región fuente. (Source Region Electromagnetic Pulse)

3) SGEMP: Impulso electromagnético nuclear generado por el sistema. (System Generated Electromagnetic Pulse).

4.3 forma de onda compuesta: Forma de onda que maximiza las características más importantes de un grupo de formas de ondas.

4.4 acoplamiento: Interacción del campo IEMN-GA con un sistema para producir corrientes y tensiones en la superficie y cables del sistema. Las tensiones son producidas por las cargas inducidas y se definen sólo a bajas frecuencias con longitudes de onda superiores a las dimensiones de la superficie o apertura.

4.5 dirección de propagación de la onda electromagnética: Dirección de propagación del vector \vec{k} , perpendicular al plano que contiene los vectores de los campos eléctricos y magnéticos (véase la figura 2).

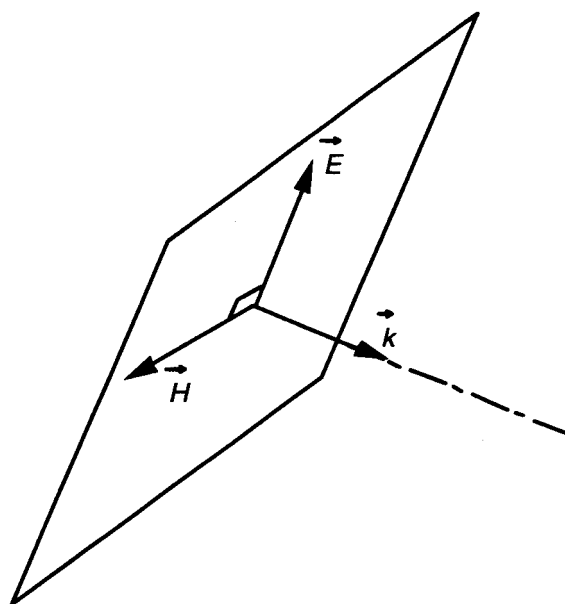


Fig. 2 – Geometría para la definición de una onda plana

4.6 E1, E2, E3: Términos empleados para los campos eléctricos de ondas IEMN-GA inicial, intermedio y final.

4.7 IEM: Cualquier impulso electromagnético, descripción general.

4.8 ángulo de caída geomagnética, θ_{dip} : Ángulo de caída formado por el vector de densidad de flujo geomagnético \vec{B}_e , medido con relación a la horizontal en el plano norte-sur magnético. $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$ en el polo norte magnético y -90° en el polo sur magnético (véase la figura 3).

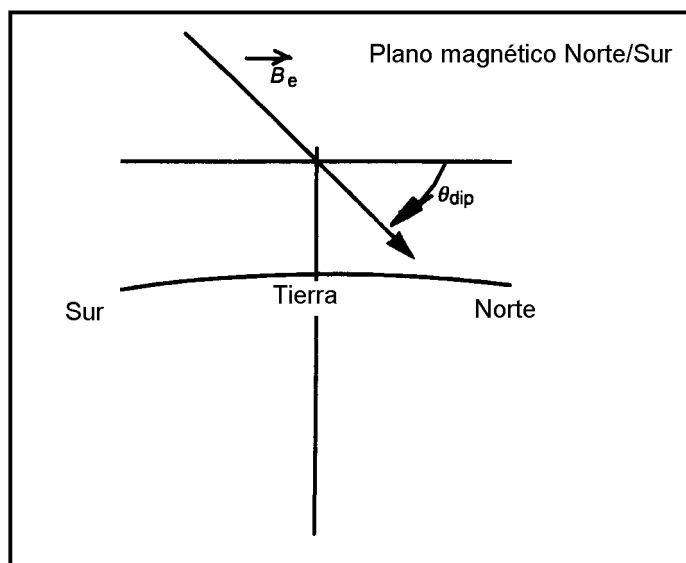


Fig. 3 – Ángulo de caída geomagnética

4.9 IEMN-GA: Impulso electromagnético de origen nuclear a gran altitud.

4.10 gran altitud (explosión nuclear): Altitud de explosión superior a 30 km

4.11 polarización horizontal: Una onda electromagnética está polarizada horizontalmente si el vector del campo magnético se encuentra dentro del plano de incidencia y el vector del campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia y por tanto paralelo al plano de tierra (véase la figura 1). [Este tipo de polarización también se llama polarización perpendicular eléctrica o transversal eléctrica (TE)].

4.12 plano de incidencia: Plano formado por el vector de propagación y la normal al plano de tierra.

4.13 baja altitud (explosión nuclear): Altitud de una explosión inferior a 1 km.

4.14 IEMN: Impulso electromagnético (IEM) nuclear, todos los tipos de ondas IEM provocadas por una explosión nuclear.

4.15 punto de entrada (PdE): Punto (localización física) de una barrera electromagnética, en donde la energía electromagnética puede entrar o salir de un volumen topológico, a menos que se provea de un dispositivo de protección adecuado de PdE. Un PdE no se limita a un punto geométrico. Los PdE se clasifican en PdE de apertura o PdE de conducción según el tipo de penetración. También se clasifican en PdE arquitectónicos, mecánicos, estructurales o eléctricos según la función para la que sirven.

4.16 longitud del impulso: A menos que se indique de otra manera, el intervalo de tiempo entre los puntos del frente ascendente y descendente de un impulso en el que el valor instantáneo es el 50% de la amplitud de pico.

4.17 impulso rectificado (IR): Integral del valor absoluto de la forma de onda en el tiempo en un intervalo de tiempo especificado.

4.18 tiempo de subida (de un impulso): A menos que se indique de otra manera, el tiempo de subida entre los instantes en los que la amplitud instantánea de un impulso alcanza primero los valores límites mínimo y máximo especificados, habitualmente 10% y 90% de la amplitud del pico del impulso.

4.19 corriente de cortocircuito: Valor de la corriente que fluye cuando los terminales del circuito están cortocircuitados. Esta corriente es generalmente de interés cuando se comprueba el funcionamiento de los dispositivos de protección contra los impulsos.

4.20 impedancia de fuente: Impedancia que presenta una fuente de energía a los terminales de entrada de un equipo o de una red.

4.21 polarización vertical: Una onda electromagnética está polarizada verticalmente si el vector del campo magnético se encuentra dentro del plano de incidencia y el vector del campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia, y por tanto paralelo al plano de tierra (véase la figura 1). [Este tipo de polarización también se llama polarización paralela o transversal magnética (TM)].

5 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO IEMN-GA, PARÁMETROS CONDUCIDOS

5.1 Consideraciones introductorias

El campo electromagnético generado por una explosión nuclear a gran altitud descrito en la Norma CEI 61000-2-9 puede inducir corrientes y tensiones en todas las estructuras metálicas. Estas corrientes y tensiones que se propagan en los conductores constituyen el entorno conducido. Esto significa que el entorno conducido es un fenómeno secundario consecuencia sólo del campo radiado.

Todas las estructuras metálicas (cables, conductores, tubos, canalizaciones, etc.) estarán afectadas por el IEMN-GA. El entorno conducido es importante porque puede dirigir la energía del IEMN-GA a la electrónica sensible a través de las conexiones de señal, potencia y tierra. Existen dos categorías de conductores: conductores externos e internos (con respecto al edificio o a otra envolvente). Aunque pueda parecer simplista, esta diferenciación es crítica en lo que concierne a la información dada en esta norma.

La diferencia entre estos dos tipos de conductores se explica por la topología electromagnética. En general, los conductores externos están situados en el exterior del edificio y están completamente expuestos al entorno IEMN-GA total. Esta categoría incluye líneas de potencia y líneas metálicas de comunicación, cables de antenas y tuberías de agua o de gas (si son metálicas). Para efectos de esta norma los conductores pueden elevarse sobre el suelo o enterrarse en la tierra. Los conductores internos son aquellos que están parcial o completamente apantallados por el edificio, que reduce los campos IEMN-GA. Esta situación es mucho más compleja, porque las formas de onda del campo IEMN-GA pueden ser alteradas significativamente por la pantalla del edificio, y el acoplamiento a los conductores y cables internos es consecuentemente muy difícil de calcular, a pesar de disponer de algunos datos de medida obtenidos de ensayos simulados de IEMN-GA.

En esta norma los entornos conducidos en modo común sobre los conductores externos se calculan empleando las geometrías simplificadas de los conductores y de los entornos IEMN-GA especificados por las formas de onda inicial, intermedia y final. Los entornos externos conducidos están destinados a evaluar el funcionamiento de los dispositivos de protección en el exterior de un edificio, y por causa de las variaciones en los sistemas de telecomunicaciones y de potencia, los efectos de los transformadores y de los repetidores telefónicos no son de consideración aquí. Este método permite obtener las formas de onda aproximadas pero bien definidas que se necesitan para ensayar los elementos de protección en conductores externos de manera normalizada. Para los conductores internos, se define un procedimiento para estimar los entornos conducidos apropiados para los equipos de ensayo. Para cables multipolares no apantallados, se asume que las corrientes de fase a tierra son iguales a las corrientes en modo común.

5.2 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA inicial

El campo eléctrico intenso del IEMN-GA inicial se acopla de manera eficaz en las antenas y a cualquier línea expuesta tales como las líneas telefónicas y de potencia. El mecanismo de acoplo de una antena es extremadamente variable y depende fuertemente de los parámetros de la antena. En muchos casos, es recomendable efectuar ensayos en onda continua (CW) en la antena y combinar la función de respuesta de la antena con el entorno creado por un incidente IEMN-GA. Sin embargo, el apartado 5.5 contiene las ecuaciones simples que permiten calcular la respuesta de las antenas delgadas. Para las líneas largas es posible efectuar una serie completa de cálculos en modo común que son fiables y dependen solamente de unos pocos parámetros. Estos parámetros comprenden la longitud del cable, la situación (sobre el terreno o enterrado), y la conductividad de la superficie de tierra (para profundidades entre 0 m y 5 m). Adicionalmente, ya que el acoplamiento del IEMN-GA depende del ángulo de elevación y polarización (véase la figura 1), es posible determinar estadísticamente la probabilidad de obtener un nivel de corriente dado.

La tabla 1 describe las corrientes de cortocircuito en modo común (valores calculados) y las impedancias de fuente del modelo Thevenin equivalente (empleadas para calcular las tensiones de circuito abierto), en función del nivel de severidad, de la posición y de la longitud del conductor así como de la conductividad del terreno. Estos resultados son apropiados para calcular las corrientes en modo común que circulan por los hilos desnudos, cables aéreos aislados, y los apantallamientos de los cables apantallados o coaxiales. Para los cables apantallados, es conveniente emplear la impedancia de transferencia medida o especificada con el fin de determinar las corrientes y tensiones en los hilos internos. A pesar de que la forma de onda varíe en función de la orientación, una sola forma de onda se especifica para las líneas aéreas. La onda está definida por los tiempos de subida (10% a 90%) y el ancho del impulso (a la mitad del máximo); cuando las características del impulso de tiempo de subida y ancho se describen juntas, la descripción habitual es $\Delta t_r / \Delta t_{pw}$.

En la tabla 1, un nivel de severidad del 99% indica que un 99% de las corrientes inducidas serán inferiores a este valor. Las corrientes calculadas en las líneas enterradas varían mucho menos con el ángulo de incidencia y denotan una distribución de probabilidad muy grande (pequeñas diferencias entre los niveles de severidad del 10% y 90%) y por tanto no se describen en términos de niveles de severidad; las variaciones se indican con relación a la conductividad del terreno. Las corrientes en los conductores aéreos descritos en la tabla 1 son válidas para alturas superiores a 5 m y las corrientes en los conductores enterrados son válidas para conductores ligeramente por encima ($h < 30$ cm) o por debajo del terreno. Para alturas de conductores inferiores a 5 m, los valores obtenidos en la tabla 1 pueden interpolarse linealmente (entre 0,3 m y 5 m). Para los casos donde las líneas aéreas penetran dentro del terreno de forma aislada, las corrientes inicialmente reflejarán la forma de onda 1, decreciendo en función de la distancia enterrada hasta alcanzar la forma de onda 2 (requiriéndose aproximadamente 20 m). Para más información sobre la obtención de estas formas de onda, véase el anexo A.

Tabla 1
Corrientes de cortocircuito en modo común generadas por un IEMN-GA inicial, incluyendo el valor de pico I_{pk} y la evolución temporal como función del nivel de severidad, longitud L en metros y la conductividad del terreno σ_g

Tabla 1a
Conductor aéreo

Severidad (%) ¹⁾	I_{pk} A		
	$L > 200$ m	$100 \leq L \leq 200$ m	$L < 100$ m
50	500	500	$5,0 \times L$
90	1 500	$7,5 \times L$	$7,5 \times L$
99	4 000	$20 \times L$	$20 \times L$

1) Porcentaje de corriente cuyo valor es inferior al valor indicado.
 Forma de onda 1: 10/100 ns.
 Impedancia de la fuente: $Z_s = 400 \Omega$.

Tabla 1b
Conductor enterrado

σ_g S/m	I_{pk} A
	Todas las longitudes > 10 m
10^{-2}	200
10^{-3}	300
10^{-4}	400

Forma de onda 2: 25/500 ns.
 Impedancia de la fuente: $Z_s = 50 \Omega$.

5.3 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA intermedio

El IEMN-GA intermedio sólo se acopla eficientemente en conductores de una longitud superior a 1 km. Es por tanto de interés principalmente para conductores externos tales como líneas de potencia y de comunicaciones. Dado que el ancho del impulso de este entorno es mucho mayor que el del entorno inicial, el acoplamiento varía menos en función del ángulo de elevación. Esto significa que la variación estadística es menos importante que en el caso del acoplamiento con la onda inicial. Por otro lado, la conductividad del terreno es más importante aquí afectando el acoplamiento en las líneas aéreas además de las líneas enterradas. Véase el anexo B para una información más detallada.

La tabla 2 describe el entorno conducido externo en función de la longitud de línea, y de la conductividad del terreno (hasta profundidades de 1 km).

Tabla 2
Corrientes de cortocircuito en modo común generadas por un IEMN-GA intermedio, incluyendo el valor de pico I_{pk} y la evolución temporal como función de la longitud L en metros y la conductividad del terreno σ_g

Tabla 2a
Conductor aéreo

σ_g S/m	I_{pk} A			
	$L > 10\ 000$ m	$1\ 000 \leq L \leq 10\ 000$ m	$100 \leq L \leq 1\ 000$ m	$L < 100$ m
10^{-2}	150	75	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	350	200	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	800	600	$0,45 \times L$	0

Forma de onda 3: 25/1 500 μ s.
Impedancia de la fuente: $Z_s = 400 \Omega$.

Tabla 2b
Conductor enterrado

σ_g S/m	I_{pk} A		
	$L > 1\ 000$ m	$100 \leq L \leq 1\ 000$ m	$L < 100$ m
10^{-2}	50	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	150	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	450	$0,45 \times L$	0

Forma de onda 3: 25/1 500 μ s.
Impedancia de la fuente: $Z_s = 50 \Omega$.

5.4 Entorno conducido externo generado por el IEMN-GA final

El entorno del IEMN-GA final es importante solamente para el acoplamiento a conductores externos largos tales como líneas de potencia y de comunicaciones. En este caso, sin embargo, el cálculo de las corrientes de cortocircuito para las configuraciones típicas no se acomete fácilmente debido a que el entorno del IEMN-GA final se describe como una fuente de tensión que se genera en la tierra y que induce corrientes que circulan sólo en conductores conectados a tierra en dos o más puntos. Ya que la corriente que circula depende fuertemente de la resistencia presente en el circuito, un método analítico que permite desarrollar un entorno conducido normalizado se propone a continuación.

El método a emplear se ilustra con un ejemplo. En la figura 4a, se representa una configuración trifásica-estrella-triángulo junto con su circuito equivalente en la figura 4b (donde E_o es el valor de pico del IEMN-GA final). Nótese que el problema puede describirse como un problema en corriente cuasi continua con la fuente de tensión calculada directamente en el entorno del IEMN-GA final. Puesto que las mayores frecuencias contenidas en el entorno del IEMN-GA final son del orden de 1 Hz, esto es claramente apropiado. Puede por tanto asumirse que la fuente de tensión V_s tiene la misma dependencia del tiempo que E_o . Dado que las resistencias en la figura 4b (la resistencia del arrollamiento estrella R_y y la resistencia del apoyo o resistencia de tierra R_f) no son dependientes de la frecuencia para $f < 1$ Hz, la corriente inducida I_{pk} tendrá la misma dependencia del tiempo que E_o .

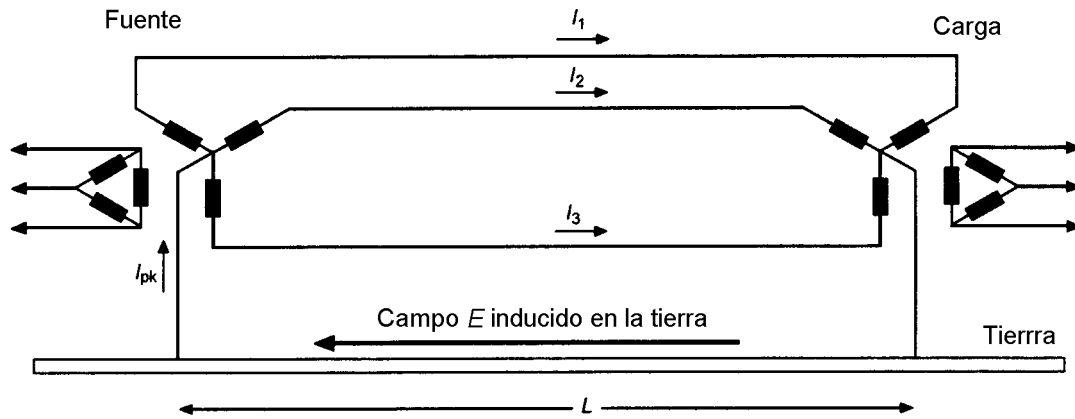


Fig. 4a – Configuración trifásica de línea y transformador

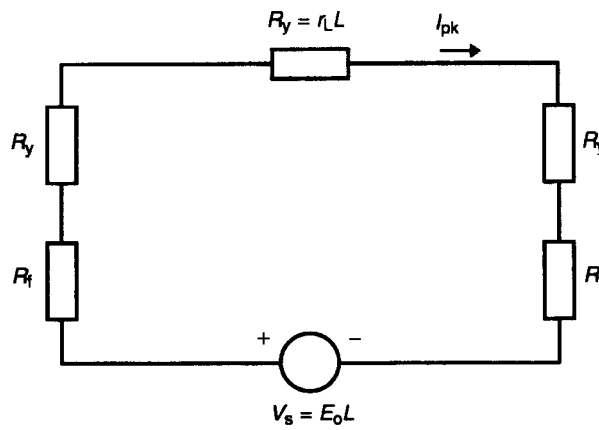


Fig. 4b – Circuito equivalente simple en el que E_0 es el campo eléctrico inducido por el IEMN-GA final

Fig. 4 – Línea trifásica y circuito equivalente para el cálculo de la corriente inducida por el IEMN-GA final

Empleando el ejemplo anterior, la corriente de pico puede calcularse como:

$$I_{pk} = \frac{E_0 L}{2(R_f + R_y) + r_L L} \quad (1)$$

donde

r_L es la resistencia de la línea paralela por unidad de longitud (Ω/m);

R_f es la resistencia de la puesta a tierra (Ω);

R_y es la resistencia paralela del devanado de un transformador (Ω);

L es la longitud de la línea (m).

En América del Norte, una línea larga de transmisión de 500 kV tendría una resistencia por unidad de longitud de $8,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$, una resistencia del devanado del transformador de $0,06 \Omega$ y una resistencia de puesta a tierra de $0,75 \Omega$. Para una línea de 10^5 m , la corriente de pico inducida es de aproximadamente $40\,000 \times E_0$ (en donde E_0 es $0,04 \text{ V/m}$ según la Norma CEI 61000-2-9 para una conductividad del suelo en profundidad ($d \gg 10 \text{ km}$) del terreno de 10^{-4} S/m) o aproximadamente $1\,600 \text{ A}$. Dado este valor de pico, la forma de onda de la corriente en el tiempo puede aproximarse por un pulso unipolar con un tiempo de subida y un ancho del impulso de $1/50 \text{ s}$. Para simular la forma de onda de este ejemplo, es conveniente emplear una fuente de tensión de 4 kV y una resistencia interna de $2,45 \Omega$. Es importante poner a tierra los transformadores para usar el circuito de la figura 4. Algunos transformadores son triángulo-triángulo y no poseen una conexión directa a tierra.

La ecuación 1 anterior puede fácilmente extrapolarse para los casos de líneas de transporte de energía calculando la resistencia total del circuito y dividiéndola en la tensión inducida total sobre la longitud del conductor. La ecuación 1 está dada para el caso de líneas largas sobre la tierra; para cables submarinos, las corrientes calculadas pueden reducirse por un factor de 100. Esta reducción es debida al comportamiento del campo eléctrico E_0 que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la conductividad del terreno (para profundidades de 10 km a 100 km). Para los lagos de agua dulce o mares poco profundos, las corrientes no pueden reducirse tanto.

5.5 Corrientes de antena

Las antenas pueden ser de diferentes tamaños y formas. Dentro de la banda de frecuencias VLF y LF (3 kHz a 300 kHz), las antenas tienen normalmente la forma de hilos muy largos que en algunas ocasiones están enterrados. Las antenas de la banda MF (300 kHz a $3\,000 \text{ kHz}$) tienen normalmente la forma de torres verticales que se alimentan de una red de contrapeso enterrada en la tierra. En la banda de HF y VHF (3 MHz a 30 MHz y 30 MHz a 300 MHz , respectivamente), las antenas presentan típicamente la forma de dipolos alimentados por el centro y a más altas frecuencias (UHF, SHF, etc.) se parecen más a sistemas distribuidos, incluyendo los reflectores y las aperturas radiantes.

Habitualmente, las antenas funcionan dentro de una banda estrecha situada alrededor de la frecuencia fundamental para la que están diseñadas. Para cumplir con su funcionamiento dentro de esta banda estrecha, estas antenas son a menudo sintonizadas con ayuda de elementos de impedancia, añadiendo elementos pasivos cerca de la antena activa, o situando la antena en una red.

Dada la diversificación de las configuraciones de las antenas, es difícil dar una especificación precisa de la respuesta (forma de onda de corriente y tensión) de cada tipo de antena. Como un modelo aproximado, es posible considerar el dipolo simple vertical mostrado en la figura 5, y emplear su respuesta como una indicación de las que serían las respuestas de otras antenas más complejas. Por supuesto, este modelo sólo es de aplicación en antenas dentro de la categoría de dipolos eléctricos; las antenas de bucle (magnéticos) así como las antenas de apertura que no pueden modelizarse adecuadamente con esta estructura simple. Para las antenas más complejas, se recomienda efectuar iluminaciones en CW o ensayos de impulsos de alto nivel para evaluar su respuesta.

Estos tipos de métodos de ensayo se describen en la Norma CEI 61000-4-23*.

La antena de la figura 5 está supuestamente cargada con una resistencia nominal de 50Ω , que es la resistencia típica de carga de una antena dentro de su banda. La antena es un cilindro de longitud ℓ (de extremo a extremo) y de radio a ; estos parámetros definen el factor de forma $\Omega = 2 \ln(\ell/a)$. El factor Q de corriente de carga de esta antena puede aproximarse por $Q = \Omega/3,6$. Para antenas no ideales, el parámetro Q debe derivarse de las medidas de respuesta de la antena.

* CEI 61000-4-23: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-23: Técnicas de ensayo y medida. Métodos de ensayo para los dispositivos de protección para las perturbaciones radiadas por el IEMN-GA. Norma básica de CEM (en preparación).

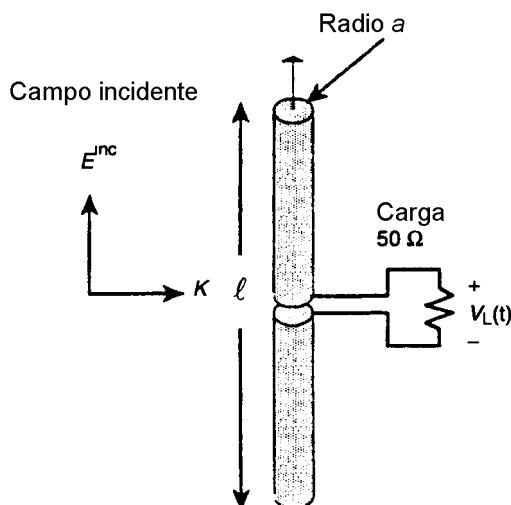


Fig. 5 – Antena dipolo cargada por el centro de longitud ℓ y radio a , excitada por el campo incidente de un IEMN-GA inicial

Habitualmente la antena de la figura 5 se encuentra emplazada en la vecindad de otros objetos conductores que modifican el campo incidente y, por consiguiente, cambian la respuesta obtenida por la antena aislada. Por ejemplo, la antena puede estar emplazada en o cerca del suelo en donde el campo reflejado por la tierra puede provocar una excitación adicional en la antena. Igualmente el dipolo puede estar montado en un mástil en donde el campo difuso del mástil y de los cables de sujeción modificarán la excitación.

Con estas variaciones de la geometría de la antena, es difícil tener en cuenta todas estas posibilidades para desarrollar una forma de onda de respuesta normalizada. Sin embargo, el problema se hace un poco más sencillo por el hecho de que, en muchos casos, el campo reflejado llega a la antena después de que el campo incidente la ha excitado, sugiriendo que la respuesta al campo incidente puede dar una especificación de la respuesta suficiente. Para este proceso de especificación simplificado, todas las excitaciones debidas a campos difusos serán despreciadas.

Para calcular la respuesta de la antena, la frecuencia fundamental de resonancia viene dada por

$$f_c = \frac{c}{2\ell} \tag{2}$$

donde

c es la velocidad de la luz, y

ℓ es la longitud de un dipolo o el doble de la altura de un monopolo en un plano de tierra.

La respuesta de la antena viene dada por una corriente en una carga de 50Ω :

$$I_L(t) = k I_p e^{\frac{-\pi f_c t}{Q}} \text{sen}(2\pi f_c t) \quad \text{para } t \geq 0 \tag{3}$$

con I_p definido a continuación en la tabla 3. El factor normalizado k depende del valor de Q y de f_c , y se define para permitir a I_L un valor de pico igual a I_p . En la tabla 3, I_p se define como el producto $\ell \hat{I}$, donde \hat{I} es el pico del campo magnético incidente producido por el IEMN-GA. Por debajo de 10 MHz el pico de la corriente de antena se asume constante.

Tabla 3
Corriente de carga pico máxima de un dipolo eléctrico en función de la frecuencia

f_c MHz	ℓ m	\hat{I} A/m	$\ell \hat{I}$ A	I_p A
< 1	> 150	–	–	2 000*
1 – 10	15 – 150	–	–	2 000*
10	15	130	1 950	1 950
100	1,5	130	195	195
200	0,75	130	97,5	97,5
> 200	$150/f_c$	130	$19\,500/f_c$	$19\,500/f_c$

* Valor máximo permitido.

La aproximación previa da unos resultados de acoplamiento peores para una antena de dipolo vertical (sin reflexiones del terreno), pero es posible obtener informaciones estadísticas del acoplamiento empleando una técnica similar a la empleada en la tabla 1. Considerando la variación del ángulo de elevación y una cobertura en el suelo para una altura de explosión de 100 km, el anexo C muestra los resultados del acoplamiento para antenas de dos hilos finos. Estas incluyen una antena monopolo vertical de longitud ℓ_m (incluyendo las reflexiones del IEMN-GA del terreno) y una antena monopolo horizontal de longitud ℓ_h (sin reflexiones del terreno), ambas con cargas de 50Ω . Estos resultados se resumen en las tablas 4 a 6 para una antena monopolo vertical y en las tablas 7 a 9 para una antena monopolo horizontal.

Tabla 4
Niveles de V_{co} generados por un IEMN-GA para una antena monopolo vertical

Valores en kV

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	13,6	28,4	33,6	46,5	91,7	104,6	125,7	232,0	249,0	383,2	470,7	477,1	
15°	13,1	27,0	32,4	45,1	88,5	101,1	125,3	226,2	240,5	365,5	454,0	461,0	
30°	11,8	24,3	29,0	40,5	80,3	90,4	107,2	200,2	215,5	326,9	406,9	413,1	
45°	9,5	19,5	23,7	32,7	64,9	73,8	89,0	164,3	175,9	273,6	332,3	337,3	
60°	6,6	14,1	16,5	23,3	45,6	52,1	63,9	116,4	124,4	190,1	234,8	238,4	
75°	3,5	7,2	8,6	12,0	23,9	26,9	33,2	60,1	64,3	98,8	121,6	123,3	
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 5
Niveles de I_{cc} generados por un IEMN-GA para una antena monopolo vertical

Valores en kA

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	0,08	0,19	0,22	0,33	0,66	0,70	1,12	1,74	1,91	3,13	3,68	4,37	
15°	0,08	0,18	0,21	0,32	0,64	0,68	1,13	1,68	1,85	3,02	3,55	4,31	
30°	0,07	0,16	0,19	0,28	0,57	0,61	0,96	1,50	1,65	2,71	3,25	4,13	
45°	0,06	0,13	0,16	0,23	0,47	0,50	0,79	1,23	1,35	2,23	2,72	3,67	
60°	0,04	0,10	0,11	0,16	0,33	0,35	0,57	0,87	0,95	1,57	1,94	2,73	
75°	0,02	0,05	0,06	0,08	0,17	0,18	0,30	0,45	0,49	0,81	1,01	1,38	
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 6
Niveles de I_L generados por un IEMN-GA para una antena monopolo vertical adaptada*

Valores en kA

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	0,06	0,15	0,17	0,23	0,49	0,55	0,76	1,31	1,33	2,37	2,71	3,53	
15°	0,06	0,14	0,16	0,23	0,48	0,53	0,76	1,26	1,29	2,28	2,59	3,34	
30°	0,05	0,13	0,15	0,20	0,43	0,47	0,65	1,13	1,15	2,03	2,32	3,00	
45°	0,04	0,10	0,12	0,16	0,35	0,39	0,54	0,92	0,94	1,69	1,91	2,51	
60°	0,03	0,07	0,08	0,12	0,25	0,27	0,39	0,65	0,67	1,17	1,35	1,79	
75°	0,02	0,04	0,04	0,06	0,13	0,14	0,20	0,34	0,34	0,61	0,70	0,91	
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

* Para los correspondientes valores de tensión con la carga, multiplicar estos valores por 50 Ω.

Tabla 7
Niveles de V_{co} generados por un IEMN-GA para una antena dipolo horizontal

Valores en kV

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	0,8	4,0	11,5	2,8	13,5	44,0	7,9	37,9	110,4	19,0	99,8	289,1	
15°	4,9	7,0	13,1	17,1	25,1	45,8	44,3	68,2	113,3	115,3	162,2	309,1	
30°	8,9	12,5	15,4	31,0	45,6	53,9	81,3	128,1	154,6	211,9	291,0	367,3	
45°	12,5	17,6	18,6	43,1	64,1	67,3	112,7	179,7	188,2	293,9	407,4	434,7	
60°	15,1	21,4	21,9	52,5	78,2	79,8	136,2	218,6	224,0	355,4	495,9	508,0	
75°	16,8	23,9	24,2	58,3	87,0	88,4	152,2	243,9	248,6	395,1	552,1	563,6	
90°	18,0	24,6	25,1	60,0	89,9	91,5	159,4	251,7	257,2	404,8	573,1	583,3	

Tabla 8
Niveles de I_{cc} generados por un IEMN-GA para una antena dipolo horizontal

Valores en kA

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	0,003	0,01	0,04	0,01	0,05	0,15	0,03	0,16	0,47	0,10	0,53	1,66	
15°	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,17	0,19	0,27	0,48	0,55	0,81	1,71	
30°	0,03	0,04	0,05	0,11	0,17	0,20	0,35	0,49	0,62	1,04	1,36	1,99	
45°	0,04	0,06	0,06	0,15	0,24	0,25	0,49	0,69	0,73	1,47	1,87	2,27	
60°	0,05	0,07	0,07	0,18	0,29	0,30	0,59	0,84	0,86	1,79	2,27	2,52	
75°	0,05	0,08	0,08	0,20	0,32	0,33	0,65	0,94	0,96	2,00	2,52	2,65	
90°	0,05	0,08	0,08	0,21	0,34	0,34	0,67	0,97	0,99	2,06	2,61	2,69	

Tabla 9
Niveles de I_L generados por un IEMN-GA para una antena dipolo horizontal adaptada*

Valores en kA

Longitud ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m			
	Severidad	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
Ángulo de caída													
0°	0,002	0,012	0,032	0,008	0,040	0,13	0,028	0,14	0,39	0,078	0,42	1,26	
15°	0,014	0,020	0,036	0,050	0,078	0,14	0,16	0,23	0,40	0,45	0,65	1,33	
30°	0,024	0,036	0,044	0,092	0,15	0,17	0,29	0,44	0,54	0,84	1,10	1,58	
45°	0,034	0,050	0,054	0,13	0,20	0,22	0,41	0,61	0,64	1,17	1,51	1,83	
60°	0,042	0,062	0,062	0,16	0,25	0,26	0,50	0,74	0,76	1,44	1,83	2,05	
75°	0,046	0,068	0,070	0,17	0,28	0,29	0,55	0,83	0,85	1,60	2,04	2,18	
90°	0,048	0,070	0,072	0,17	0,28	0,30	0,57	0,86	0,88	1,66	2,10	2,22	

* Para los correspondientes valores de tensión con la carga, multiplicar estos valores por 50 Ω .

5.6 Entorno conducido interno por el IEMN-GA

Como se ha explicado previamente, los entornos conducidos internos (dentro de un edificio o de una instalación) son mucho más difíciles de determinar que los entornos conducidos externos. Las señales conducidas internas están generadas por señales conducidas externas que penetran a través del apantallamiento (con o sin atenuación debida al endurecimiento del PdE) y por cualquier campo del IEMN-GA que puedan penetrar en el edificio y acoplarse con el cableado expuesto. Existen una gran variedad de materiales de apantallamiento electromagnético utilizables dentro de los edificios, que van desde construcción de madera a habitaciones apantalladas de gran calidad, por tanto es difícil calcular el acoplamiento con los cables y otros conductores dentro de una instalación. Sin embargo, es posible definir un procedimiento que permite estimar los transitorios conducidos internos.

El primer paso en la resolución del problema de un conductor interno es reconocer que la falta de transitorios conducidos externos es una consideración importante. Es conveniente emplear los entornos externos especificados previamente y determinar el tipo de protección presente en los puntos de entrada de la instalación. Empleando resultados de análisis o datos de ensayos, puede estimarse la forma de onda de corriente que penetra en la instalación. Es conveniente señalar que en caso de utilización de un elemento no lineal, será probablemente necesario realizar un ensayo empleando la Norma CEI 61000-4-24, a menos que se espere una capacidad de supresión muy elevada.

El segundo paso es estimar la atenuación electromagnética producida en el entorno radiado del IEMN-GA inicial. (No es necesario evaluar la atenuación del campo de los entornos intermedio o final porque estos campos de baja frecuencia no se acoplarán bien a las geometrías compactas de los cables dentro de la mayor parte de las instalaciones). Definiendo el factor de atenuación de onda plana A_t (para $f > 1$ MHz), D como la longitud interna del cable considerado en metros y B un factor de amplitud basado en los factores de severidad introducidos en la tabla 1, se puede estimar el pico interno de la corriente en modo común en el cable I_{pk} como

$$I_{pk} = BDA_t \quad \text{para } D < 100 \text{ m} \quad (4)$$

El parámetro B (A/m) se ha calculado para que el producto BD sea consistente con la última columna de la tabla 1. Los valores de B son 5,0 A/m, 7,5 A/m y 20 A/m para los niveles de severidad 50%, 90% y 99% respectivamente. Así pues para un nivel de severidad del 50%, un factor de atenuación del edificio de 0,01 (-40 dB) y una longitud de conductor de 10 m, el pico de la corriente acoplada es de 0,5 A. Como se indica en el anexo D, las formas de onda de las corrientes inducidas se asemejan a sinusoides amortiguadas. Es conveniente que las ecuaciones (2) y (3) se empleen suponiendo que $\ell = D$ y $Q \geq 60$.

Este método no es preciso porque la atenuación de un campo electromagnético incidente varía con la frecuencia, especialmente cuando hay aberturas presentes. Además, una vez que el campo interno se ha establecido, a menudo hay presentes muchos campos que hacen difícil la precisión de los cálculos de acoplamiento. Finalmente, el tamaño y forma de un edificio producirán cavidades que influirán en las formas de onda de las corrientes acopladas. A pesar de estas dificultades, este método puede dar una estimación razonable de las corrientes conducidas internas.

Una segunda alternativa para estimar las corrientes conducidas internas I_{pk} por un IEMN-GA consiste en utilizar directamente los datos recogidos en el pasado para tres clases de construcciones. Como se indica en el anexo D, se dan las severidades de corrientes del 50%, 90% y 99% para construcciones de hormigón, metal ribeteado y hormigón armado. Las corrientes pico a pico al 50% son de 10 A, 10 A y 3 A para los tres tipos de construcción, mientras que al 99% los valores son de 25 A, 25 A y 7 A respectivamente. Estas corrientes internas son debidas únicamente al acoplamiento del campo externo del IEMN-GA y no tienen en cuenta las corrientes que penetran dentro del edificio por los conductores exteriores. Las ecuaciones (2) y (3), para $f_c = 7$ MHz y $Q \geq 60$, muestran las formas de onda en el tiempo de las corrientes.

Un tercer (y más preciso) procedimiento de evaluación de las corrientes de los conductores internos pasa por las medidas experimentales. Este método implica generalmente el empleo de un simulador de ondas comprendidas entre la banda de 100 kHz a 500 MHz. Las corrientes en los cables internos se miden para exposiciones del edificio en diferentes posiciones para diferentes ángulos de elevación y polarización. Las funciones de transferencia obtenidas son entonces superpuestas con la forma de onda del IEMN-GA inicial incidente por el cálculo de las formas de onda de las corrientes en los conductores internos. Generalmente es necesario evaluar las variaciones de los valores de pico de las corrientes y la forma de los impulsos para desarrollar las formas de onda compuestas para el ensayo de los equipos.

Es importante reconocer que los tres procedimientos indicados anteriormente dan solamente las corrientes internas del acoplamiento directo de los campos del IEMN-GA. Es necesario estimar (o medir) el retardo de las corrientes que provienen del exterior del edificio a través de las paredes (teniendo en cuenta las protecciones contra las sobretensiones) con el fin de determinar la contribución de las corrientes externas a la corriente total interna.

ANEXO A (Informativo)

DISCUSIÓN DEL ACOPLAMIENTO DEL IEMN-GA INICIAL EN LÍNEAS LARGAS

A.1 Líneas aéreas

Los resultados presentados anteriormente en la tabla 1 son producto de una serie de cálculos estadísticos de acoplamiento realizados por Ianoz y otros [A.1]*. En estos cálculos, los autores utilizan el campo eléctrico del IEMN-GA inicial como se define en la Norma CEI 61000-2-9 para evaluar el acoplamiento (corriente de cortocircuito) en una línea situada a 10 m de altura, de una longitud de 1 km y situada sobre un terreno de 10^{-2} S/m de conductividad. Los cálculos se han realizado sucesivamente para una polarización del 100 % horizontal y 100% vertical. Para cada polarización, se han variado los ángulos de elevación Ψ y azimutal ϕ entre el vector de propagación del campo incidente y la línea, en pasos de $2,5^\circ$. Estos resultados fueron registrados y combinados para cualquier altura de explosión y cualquier localización del punto de explosión (definido por la latitud geomagnética) de interés.

En la figura A.1 se presenta un resumen de los cálculos para una altitud de explosión de 100 km y para cinco ángulos de caída magnética (0° , 45° , 67° , 75° y 90°). Los resultados obtenidos para una caída magnética de 0° han sido descartados, dado que los cálculos de acoplamiento no permiten tener en cuenta la reducción del campo eléctrico del IEMN-GA debido al menor valor del campo magnético terrestre en el ecuador magnético. Esto daría como resultado una reducción del campo incidente y de las corrientes inducidas del 30% al 40%. A partir de los resultados mostrados en la figura A.1 ($\theta_{\text{dip}} > 45^\circ$), la selección de las corrientes de 4 000 A para el 1,0% de los casos, 1 500 A para el 10% de los casos y de 500 A para el 50% de los casos, son las indicadas (con una precisión del 10%). Las probabilidades del 1%, 10% y 50% que se discuten en este anexo equivalen al 99%, 90% y 50% de los niveles de severidad mencionados en el capítulo 5.

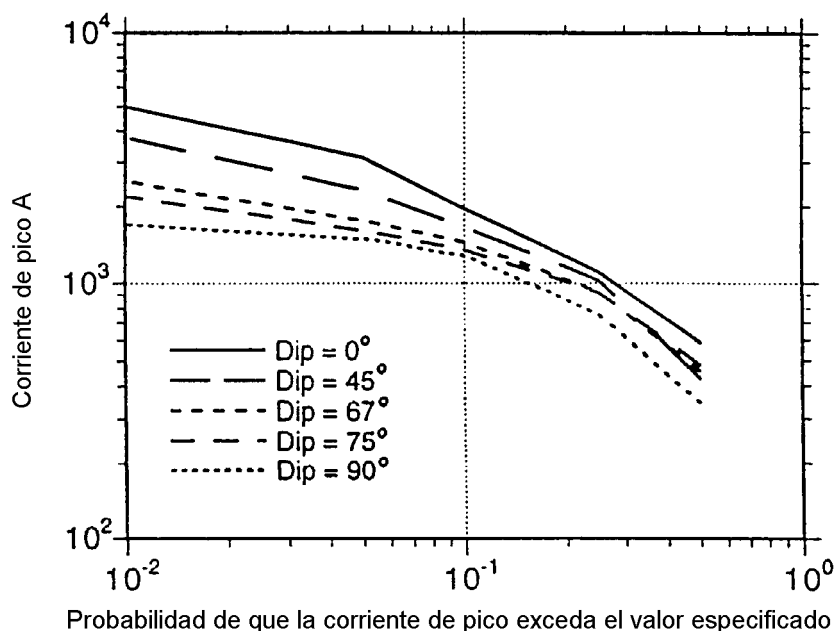


Fig. A.1 – Variación de la corriente de pico acoplada en un cable en función del ángulo de caída geomagnética local

* El número entre corchetes se refiere al documento de referencia del capítulo A.3.

Para obtener las características de las formas de onda temporales de corriente presentes en esta norma, el estudio presentado en [A.1] también considera diversas características de la forma de onda, incluyendo el tiempo de subida (10% - 90%) y el impulso rectificado que es el área de impulsión para un impulso monopolar. Los valores de la impulsión rectificados para una polarización vertical se indican en la tabla A.1 junto con el cálculo del ancho efectivo del impulso rectificado, Δt_{pw} eficaz (impulso rectificado dividido por el valor de pico), para las corrientes de pico especificadas.

Tabla A.1
Impulso rectificado (IR) y ancho eficaz de impulsión calculado para una polarización vertical del IEMN-GA inicial para un conductor aéreo (h = 10 m)

Probabilidad %	IR > A x s	I pico > A	Δt_{pw} ef. ns
50	$3,7 \times 10^{-5}$	500	74
10	$1,9 \times 10^{-4}$	1 500	127
1	$3,0 \times 10^{-4}$	4 000	75

Para esta evaluación se ha seleccionado, un ancho máximo efectivo del pulso de 127 ns y permite obtener un ancho de impulso a media amplitud de 88 ns suponiendo una forma de onda decreciente exponencial. Este valor está en torno a los 100 ns en la tabla 1.

La evaluación de las características del tiempo de subida presentó muchas más dificultades. La referencia [A.1] presenta las tablas del tiempo de subida del 10% - 90% para las polarizaciones del IEMN-GA vertical y horizontal. Los valores nominales del tiempo de subida indicados son de 2,3 ns y 5,1 ns respectivamente para una polarización horizontal y para una polarización vertical. Un examen atento de los resultados, mostró que estos tiempos de subida no se corresponden con las corrientes de pico más elevadas. Como las derivaciones no se han tabulado en este estudio, son necesarios realizar cálculos complementarios.

Para una polarización totalmente vertical del campo eléctrico definido por CEI, un ángulo de elevación de 5° y, para la misma geometría de acoplamiento que la de referencia [A.1], la derivada máxima de corriente calculada es de $2,7 \times 10^{11}$ A/s. Este valor máximo se ha encontrado después de una serie de cálculos y el valor de pico de la corriente inducida se ha calculado para el mismo ángulo. Para el caso de una probabilidad especificada del 1%, el valor calculado del tiempo de subida 10% - 90% es:

$$(0,8) \times (4\ 000\ A) / (2,7 \times 10^{11}\ A/s) = 1,2 \times 10^{-8}\ s$$

Para los propósitos de esta norma, se ha seleccionado el valor de 10 ns como tiempo de subida. A pesar de que los tiempos de subida más lentos pueden parecer más apropiados para la mayor parte de los casos, los cálculos muestran que el caso de una probabilidad del 50% tiene un tiempo de subida de 14,4 ns. Por tanto, teniendo en cuenta la pequeña diferencia relativa, el mismo valor del tiempo de subida del impulso se emplea para todos los casos de la tabla 1.

A.2 Acoplamiento en una línea subterránea

Para las líneas de comunicaciones o de alimentación enterradas, la señal inducida por el IEMN-GA no varía de forma significativa con la polarización del campo o el ángulo de caída. Sin embargo, la conductividad del terreno en la superficie tiene cierta importancia. Los cálculos de acoplamiento del IEMN-GA utilizando la onda de CEI se efectuaron para una línea enterrada a una profundidad de 1,0 m y para tres conductividades del terreno diferentes: 10^{-2} S/m, 10^{-3} S/m y 10^{-4} S/m. Los resultados de 42 simulaciones considerando las variaciones de ángulo de elevación y de polarización del campo se resumen a continuación en la tabla A.2.

Tabla A.2
Corriente inducidas por el IEMN-GA inicial sobre un conductor enterrado ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarización	Max. I_{cc} A	Ψ grados
10^{-2}	V	152	60
10^{-2}	H	148	90
10^{-3}	V	332	45
10^{-3}	H	267	90
10^{-4}	V	437	30
10^{-4}	H	418	90

Para las dos conductividades menores, los valores se han redondeado en la tabla al valor de la centena de amperios más próxima ($10^{-3} - 300$ A, $10^{-4} - 400$ A), que constituye en los dos casos una reducción del 10%. Para los valores más altos de la conductividad del terreno de la tabla A.2, la corriente se ha incrementado hasta 200 A para tener en cuenta los niveles de campo más elevados en la proximidad de la superficie terrestre (apropiado para las profundidades habituales de enterramiento).

En lo que concierne a las formas de onda a emplear, la gama de variaciones del tiempo de subida 10% - 90% y anchos de impulso a media amplitud se indican a continuación en la tabla A.3.

Tabla A.3
Parámetros de la forma de onda de corriente inducida por el IEMN-GA inicial sobre un conductor enterrado ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarización	$\Delta t_r(10\%-90\%)$ ns	$\Delta t_{pw}(50\%-50\%)$ ns
10^{-2}	V	26,7 - 34,7	185 - 355
10^{-2}	H	17,6 - 19,5	263 - 282
10^{-3}	V	25,0 - 29,2	198 - 398
10^{-3}	H	19,3 - 26,5	236 - 267
10^{-4}	V	27,0 - 29,8	309 - 583
10^{-4}	H	27,4 - 29,3	361 - 458

La tabla A.4 muestra la media de las variaciones obtenidas en la tabla A.3 para cualquier conductividad del terreno.

Tabla A.4
Parámetros medios de la forma de onda de corriente inducida por el IEMN-GA inicial sobre un conductor enterrado

σ_g S/m	$\Delta t_r(10\%-90\%)$ ns	$\Delta t_{pw}(50\%-50\%)$ ns
10^{-2}	24,6	271
10^{-3}	25,0	275
10^{-4}	28,4	428

Dada esta información, se recomienda utilizar un tiempo de subida de 25 ns. Las variaciones del ancho del impulso con la conductividad del terreno son muy importantes. Un valor de 500 ns se recomienda (mejor que 400 ns) con el fin de englobar los mayores anchos del impulso calculados (véase la tabla A.3) para conductividades del terreno pequeñas. Estos valores se aplican en la tabla 1.

A.3 Documentos de referencia

[A.1] Ianoz, M., Nicoara, B. y Radasky, W.A., *Modelling of an EMP Conducted Environment*, IEEE/EMC Transactions on EMC, Vol. 38, No. 3, p. 400-413, Agosto 1996

ANEXO B (Informativo)

DISCUSIÓN DEL ACOPLAMIENTO DEL IEMN-GA INTERMEDIO EN LÍNEAS LARGAS

Los resultados de cortocircuitos presentados en la tabla 2 han sido obtenidos a partir de una serie de 70 cálculos de acoplamiento del IEMN-GA para una línea aérea ($h = 10$ m) y para una línea enterrada ($h = -1$ m). El estudio considera variaciones de la longitud de la línea (1 km – 100 km), del ángulo de elevación ($0^\circ - 85^\circ$) y de la conductividad del terreno (10^{-2} S/m, 10^{-3} S/m y 10^{-4} S/m). Los cálculos se han efectuado con ayuda de un código resolviendo en el dominio temporal las ecuaciones de las líneas de transmisión; la forma de onda empleada es el IEMN-GA intermedio definido por CEI suponiendo una polarización vertical.

B.1 Líneas aéreas

Para líneas de longitud superior a 10 km, el pico máximo de corriente de cortocircuito y las características de la forma de onda se muestran en la tabla B.1.

Tabla B.1
Corriente de cortocircuito inducida por el IEMN-GA intermedio para un conductor aéreo ($h = 10$ m)

Conductividad del suelo S/m	I_{pk} A	$\Delta t_r(10\%-90\%)$ μs	$\Delta t_{pw\ ef.}$ μs
10^{-2}	138	60 - 120	700 - 2 100
10^{-3}	342	25 - 65	850 - 2 100
10^{-4}	849	30 - 65	1 000 - 2 100

Para líneas más cortas, las corrientes de pico se reducen pero las características del impulso son las mismas. Los valores recomendados de la tabla 2 para la corriente de pico son de 150 A, 350 A y 850 A. Las características del impulso pueden aproximarse para conseguir un tiempo de subida de 25 μs y un ancho de banda efectivo de 2 100 μs ; este ancho de banda efectivo del impulso se convierte en un ancho de impulso a media altura de 1 500 μs .

B.2 Líneas subterráneas

Para las líneas enterradas de longitud superior a 1 km, las corrientes de pico calculadas son prácticamente constantes y varían solamente con la conductividad del terreno. Para las líneas de longitud inferior a 1 km, la corriente de pico es proporcional a la longitud. Las variaciones del ángulo de incidencia para los ángulos de elevación comprendidos entre 0° y 85° dan una variación inferior al 10%. La tabla B.2 presenta un resumen de los cálculos del IEMN-GA.

Tabla B.2
Corriente de cortocircuito inducida por el IEMN-GA intermedio para un conductor enterrado ($h = -1$ m)

Conductividad del suelo S/m	I_{pk} A	$\Delta t_r(10\%-90\%)$ μs	$\Delta t_{pw\ ef.}$ μs
10^{-2}	46	38 - 57	1 800 - 2 000
10^{-3}	147	40 - 61	1 900 - 2 100
10^{-4}	431	46 - 78	1 900 - 2 100

Los resultados mostrados anteriormente pueden ser aproximados a valores de pico de 50 A, 150 A y 450 A por un impulso único de tiempo de subida (10% - 90%) de 40 μs y un ancho eficaz del impulso de 2 100 μs . Transformando el ancho eficaz en un ancho a media altura (suponiendo un decrecimiento exponencial) se obtiene un valor de 1 455 μs o 1 500 μs . Puesto que las características de la forma de onda son similares para la línea aérea y la línea subterránea, sólo se requiere una forma de onda en la tabla 2; los valores correspondientes son 25 μs y 1 500 μs .

ANEXO C (Informativo)

RESPUESTA DE LAS ANTENAS SIMPLES AL ENTORNO IEMN-GA INICIAL DEFINIDO POR LA CEI

C.1 Introducción

Para la comprensión de los requisitos de protección contra los efectos de un impulso electromagnético de gran altitud IEMN-GA sobre los sistemas civiles, es útil disponer de las respuestas de diferentes tipos de antenas. El análisis de las antenas es una disciplina madura con numerosos modelos de cálculo disponibles a utilizar para determinar las respuestas típicas [C.1]*. Sin embargo, el análisis de las antenas es frecuentemente conducido solamente en el rango de frecuencias intrabanda (es decir, operacional) y esto no es particularmente útil para obtener la respuesta transitoria de la antena, en donde se requiere un análisis en un ancho de banda muy amplio.

Además, en el caso de analizar la respuesta transitoria de una antena, los resultados se presentan a menudo en la forma de una forma de onda transitoria correspondiente a un número limitado de ángulos de incidencia de la excitación. Por esta razón, no se dispone habitualmente de un conocimiento global del comportamiento de la antena y de sus respuestas típicas.

Uno de los remedios a esta situación consiste en efectuar un gran número de cálculos individuales de transitorios para cada antena correspondientes a diferentes ángulos de incidencia del IEMN-GA y presentar los resultados de la respuesta de la antena (por ejemplo, el valor de pico de la tensión de circuito abierto de la antena) en forma de una distribución acumulativa de probabilidad (DAP) que proporciona una indicación de la probabilidad de respuesta de una antena excediendo un valor especificado. En esta norma, las respuestas de dos antenas diferentes son determinadas dentro de un entorno del IEMN-GA inicial definido por CEI. Las antenas son, una antena unipolar vertical que se asume se alimenta con respecto a tierra, y una antena dipolo horizontal situada sobre la tierra. En cada uno de estos casos, los valores observados son los valores de pico de la tensión de circuito abierto (V_{co}), la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión de pico a través de una resistencia de carga de 50Ω conectada en la entrada de la antena (V_L) y la correspondiente corriente de pico que circula por la carga de 50Ω (I_L).

C.2 El entorno IEMN-GA inicial definido por CEI

El IEMN-GA, según se describe en la Norma CEI 61000-2-9, está representado por una onda plana (véase figura C.1) incidente en un sistema situado en el suelo o en la proximidad, con un ángulo vertical de elevación Ψ y un ángulo azimutal de incidencia ϕ , medidos con relación a una dirección de referencia conveniente (eje x).

Debido a la geometría esférica de la tierra, sólo una zona limitada de la superficie terrestre es directamente afectada por los campos del IEMN-GA. Como se muestra en la figura C.2, la región afectada de la tierra está definida por el radio tangente R_t , que viene dado por la expresión

$$R_t = R_e \arccos \left(\frac{R_e}{R_e + ADE} \right) \quad (C.1)$$

donde ADE es la altura de la explosión, y R_e es el radio de la tierra (6 371,2 km). Para $ADE < 500$ km, la expresión se aproxima por

$$R_t \approx 110 \sqrt{ADE} \quad (\text{unidades en km}) \quad (C.2)$$

* El número entre corchetes se refiere al documento de referencia del capítulo C.6.

Para este estudio, se asumirá que la explosión se localiza a una altura de 100 km. Esto implica que el radio tangente es $R_t = 1\ 100$ km.

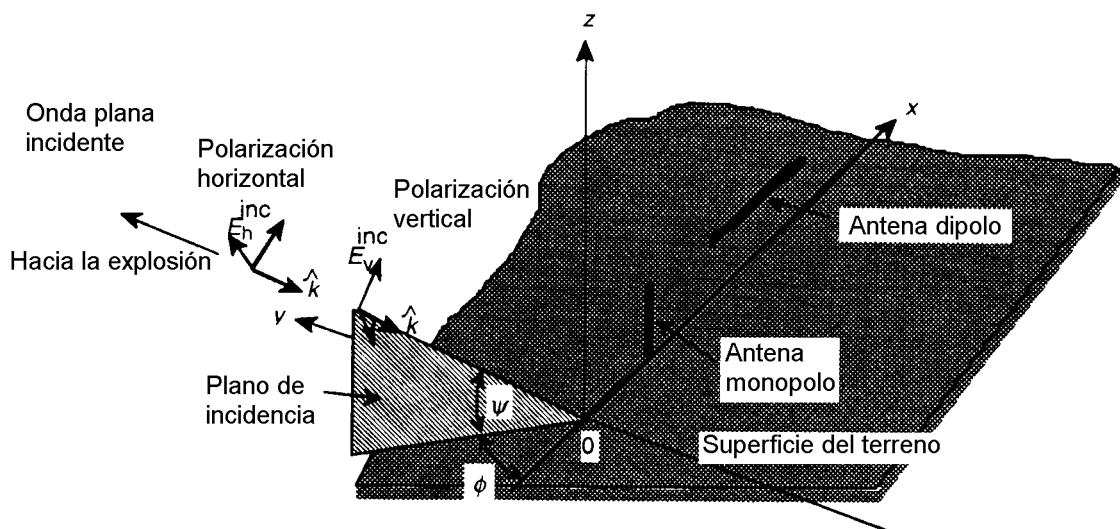


Fig. C.1 – Campo incidente del IEMN-GA

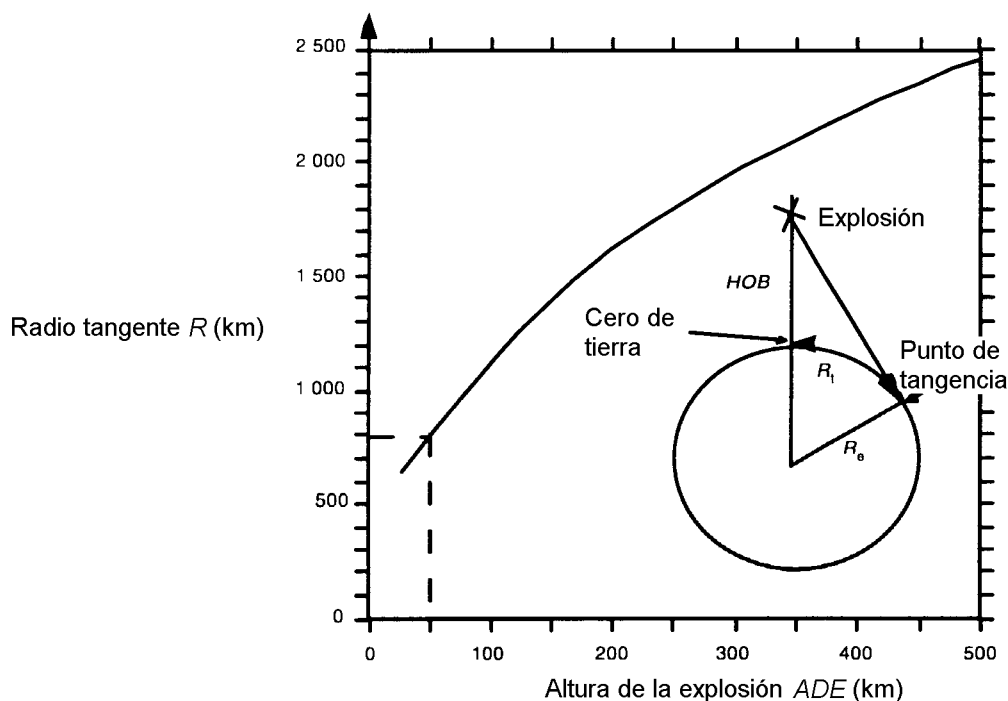


Fig. C.2 – Radio tangente R_t del IEMN-GA que define la región afectada en función de la altura de la explosión (ADE)

Fuera de la región afectada, los campos del IEMN-GA se suponen iguales a cero. Dentro de esta región, se supone que la forma temporal del campo incidente viene dada por una onda doble exponencial del tipo

$$E^{\text{inc}}(t) = 65\,000 \left(e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t} \right) t > 0 \text{ (V / m)} \quad (\text{C.3})$$

y que se descompone en componentes polarizadas vertical y horizontalmente, como se indica en la figura C.1.

Como se indica en la Norma CEI 61000-2-9, la división del campo del IEMN-GA incidente en componentes vertical y horizontal depende del ángulo de caída del campo geomagnético θ_{dip} . Este parámetro varía según los emplazamientos de la explosión y del observador, y es tratado por tanto, como una variable independiente en el cálculo de las respuestas para diferentes valores de θ_{dip} . Las componentes vertical y horizontal del campo incidente se denotan por E_v^{inc} y E_h^{inc} ; y se indican en términos de las fracciones de polarización f_v y f_h como $E_v^{\text{inc}} = f_v E^{\text{inc}}$ y $E_h^{\text{inc}} = f_h E^{\text{inc}}$. Para este estudio se han aproximado las fracciones de polarización a sus valores máximos, $f_v = \cos \theta_{\text{dip}}$ y $f_h = \sin \theta_{\text{dip}}$.

Como se muestra en la figura C.1, las dos antenas estudiadas son una antena unipolar vertical montada sobre el terreno y una antena dipolo horizontal situada paralela al terreno. El cálculo de la corriente inducida en las antenas hace necesario conocer el campo E de excitación tangencial a lo largo de las antenas. Este campo se compone del campo del IEMN-GA incidente más el campo reflejado por el suelo. En lo que concierne al monopolo vertical, el campo de excitación es la componente z del campo E , que a cualquier altitud z , corresponde a [C.2].

$$E_z = E^{\text{inc}} \cos \theta_{\text{dip}} \cos \Psi \left(1 - R_v e^{-jk2z \text{sen} \Psi} \right) \quad (\text{C.4})$$

en donde R_v es el coeficiente de reflexión de Fresnel para un campo polarizado verticalmente, dado por [C.3]:

$$R_v = \frac{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) \text{sen} \Psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) - \cos^2 \Psi \right]^{1/2}}{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) \text{sen} \Psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) - \cos^2 \Psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.5})$$

en donde σ_g es la conductividad eléctrica del terreno, ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del terreno y ϵ_o es la constante dieléctrica del espacio libre. Hay que señalar que para el campo vertical, sólo la componente polarizada verticalmente del campo del IEMN-GA incidente contribuye a la respuesta.

Para la antena horizontal, que se supone paralela al eje x , se requiere para la excitación la componente del campo E_x a una altitud h sobre el terreno. Este campo se expresa en términos de componentes de onda polarizadas vertical y horizontalmente como en [C.2]:

$$E_x = E^{\text{inc}} e^{-jkx \cos \Psi \cos \phi} \left[\cos \theta_{\text{dip}} \text{sen} \Psi \cos \phi \left(1 - R_v e^{-jk2h \text{sen} \Psi} \right) + \text{sen} \theta_{\text{dip}} \text{sen} \phi \left(1 + R_h e^{-jk2h \text{sen} \Psi} \right) \right] \quad (\text{C.6})$$

donde se ha introducido la reflexión de Fresnel para el campo horizontal R_h . Esto se indica igualmente en [C.3] como

$$R_h = \frac{\text{sen} \Psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) - \cos^2 \Psi \right]^{1/2}}{\text{sen} \Psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_o} \right) - \cos^2 \Psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.7})$$

C.3 Evaluación de las respuestas de las antenas

Dados los campos de excitación tangenciales de las ecuaciones (C.4) y (C.6), junto con la especificación de la longitud de la antena, del radio y de la impedancia de carga, las corrientes inducidas en una antena dada y en las cargas pueden ser calculadas aplicando el método de los momentos [C.4]. Este es un procedimiento numérico que resuelve la ecuación integral de la corriente dependiente de la frecuencia. Una vez calculado el espectro de la respuesta en el dominio de la frecuencia, la respuesta transitoria se calcula empleando la transformada rápida de Fourier (FFT). Véanse [C.5] y [C.6] para los detalles de estos cálculos.

C.3.1 La antena unipolar

La figura C.3 muestra la geometría de una antena unipolar vertical empleada en este estudio. Como se indica en la ecuación (C.4), el campo de excitación es independiente del ángulo azimutal ϕ . Por consiguiente, sólo el ángulo vertical de elevación ψ entra dentro del cálculo. La antena unipolar tiene una longitud L , un radio a y una carga de 50Ω situada en la base de la antena conectada a tierra. Para tales antenas, es usual especificar la relación de longitud-radio por un parámetro Ω_0 , definido por

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{2L}{a} \right) \tag{C.8}$$

El parámetro $\Omega_0 = 8$, correspondiente a una relación L/a de 27,3, representa, para el siguiente cálculo, una antena de espesor razonable.

La tierra, para estos cálculos, se supone con una conductividad $\sigma_g = 0,01 \text{ S/m}$ y una constante dieléctrica relativa $\epsilon_r = 10$, que son los valores típicos según [C.3].

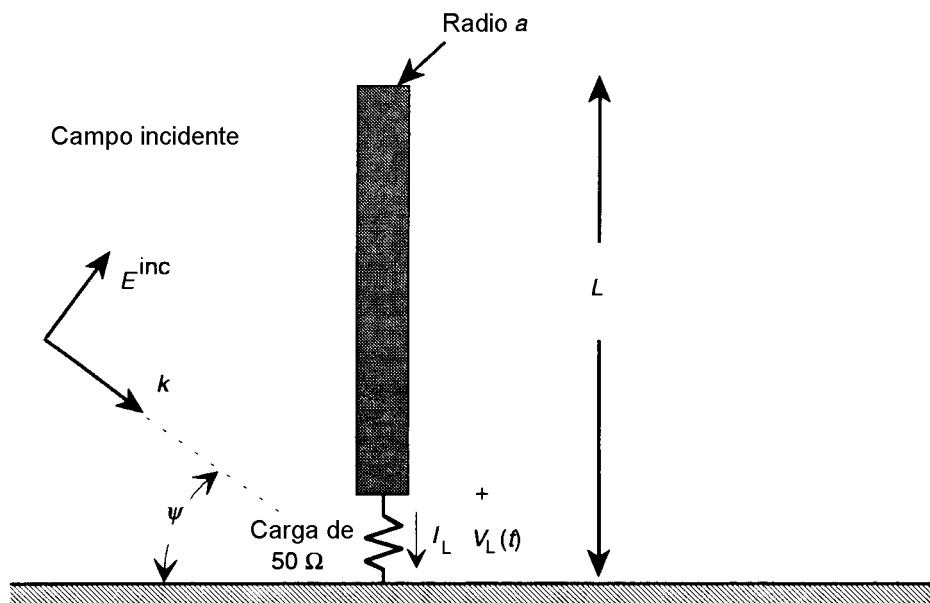


Fig. C.3 – Geometría de la antena unipolar

Para esta antena (lo mismo que para el dipolo presentado en el apartado C.3.2), se calculan cuatro magnitudes: la tensión de circuito abierto (V_{co}) en el sumidero situado en la base de la antena, la corriente de cortocircuito (I_{cc}) pasante en la base de la antena, la tensión de carga (V_L) a través de la impedancia de entrada a la antena y la corriente de carga correspondiente (I_L). Todas estas magnitudes están relacionadas por la ecuación integral de la corriente de la antena, según la descripción de Harrington [C.4]. Debido a la relación simple v-i en la impedancia de carga, la tensión de carga y la corriente de carga se relacionan de manera evidente por $V_L = Z_L I_L$. El valor de pico de las respuestas transitorias es un caso de particular interés, y estas son las magnitudes realmente obtenidas y guardadas durante el progreso de los cálculos.

La determinación de las DAP por los valores observados precedentes implica numerosos cálculos de respuestas de antena en un punto de observación seleccionado al azar en la región afectada. Así, se emplean 3 000 emplazamientos de observación distintos, y para cada uno de ellos, se utiliza la solución de la ecuación integral para conocer los valores observables. Esto conduce a una distribución de las respuestas y finalmente a una DAP que indica la probabilidad de una respuesta particular excediendo el valor especificado.

C.3.2 La antena dipolo

La figura C.4 muestra la geometría de la antena dipolo horizontal. La función de excitación, para esta antena, depende de los ángulos ϕ y ψ de incidencia y de las dos componentes de polarización del campo incidente. La longitud total, para esta antena, se denota por L , el radio es a y la impedancia de carga se elige de nuevo igual a 50Ω . La relación longitud-radio se define en este caso por

$$\Omega_0 = 2 \ln\left(\frac{L}{a}\right)$$

donde de nuevo se elige el parámetro $\Omega_0 = 8$. Esto corresponde a una relación L/a de 54,6.

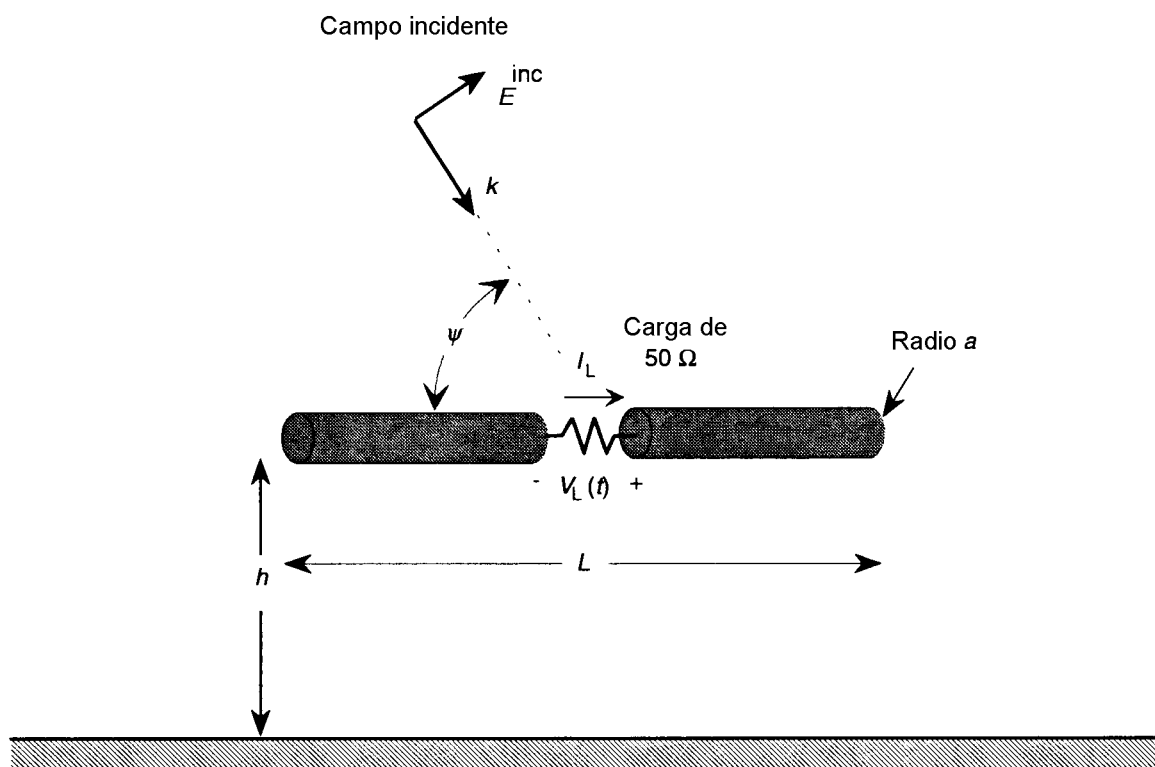


Fig. C.4 – Geometría de la antena dipolo

La presencia del plano de tierra exige un nuevo parámetro para definir la geometría, que es precisamente la altura de la antena sobre el suelo, h . Como indica la ecuación (C.6), la excitación de la antena proviene del campo incidente más la contribución que aporta la reflexión del suelo. La excitación reflejada del suelo, en principio, tiende a inducir una respuesta en la antena que anula la respuesta inducida por el campo incidente. Sin embargo, este efecto de anulación aparece en la antena habitualmente después del primer pico de la respuesta. Así, el campo reflejado por la tierra a menudo no tiene impacto en los valores de pico de la respuesta de las antenas situadas a una altura superior a $L/2$ sobre el suelo. Por consiguiente, se obtiene una buena estimación del peor de los casos de la respuesta de la antena despreciando completamente la reflexión del suelo y tratando la antena como si estuviera situada sobre el espacio libre. Esto está plenamente justificado ya que las antenas de este tipo se sitúan generalmente muy alejadas de la tierra para optimizar las características operacionales dentro de su banda.

Los cálculos de las DAP de las respuestas de la antena dipolo se efectúan de la misma manera que para la antena unipolar, excepto que las variaciones del ángulo ϕ deben ser tenidas en cuenta. Esto se hace suponiendo que, para una dirección fija de la antena (a lo largo del eje x), el ángulo ϕ puede tomar un valor cualquiera entre 0° y 360° con la misma probabilidad. Para estos cálculos, se han empleado en total 3 000 emplazamientos de la antena en la región afectada, con un total de 500 valores de ϕ en cada emplazamiento de la antena. Esto ha requerido el examen de un total de 1,5 millones de casos de acoplamiento con el fin de obtener las curvas de probabilidad.

C.4 Resultados calculados

El procedimiento de análisis y los modelos numéricos precedentes han servido para el cálculo de las DAP de cuatro casos de respuestas de antena a un entorno IEMN-GA inicial definido en la CEI, para los dos tipos de antena. Cuatro valores diferentes de longitud L se han empleado aquí: $L = 1$ m, 3 m, 10 m y 100 m para ambas antenas monopolo y dipolo. Los resultados se muestran en este capítulo.

Las DAP calculadas para las corrientes y tensiones de carga de la antena unipolar vertical se muestran en las figuras C.5, C.6, C.7 y C.8, para las cuatro longitudes de la antena unipolar.

De la misma manera, las DAP correspondientes a las corrientes y tensiones de carga de la antena dipolo horizontal se muestran en las figuras C.9, C.10, C.11 y C.12, para las cuatro longitudes diferentes del dipolo.

C.5 Recapitulación de los resultados

Las curvas de probabilidad de las figuras C.5 a C.12 dan una indicación significativa del comportamiento eventual de la antena sometida a una excitación del IEMN-GA. Frecuentemente, sin embargo, sólo se desean las respuestas para la probabilidad acumulada del 50%, 10% y 1%. Estas se refieren, en esta norma, como los "niveles de severidad" del 50%, 90% y 99% respectivamente, que indican el porcentaje de antenas que tienen una respuesta inferior al nivel de respuesta indicado. Estos valores pueden encontrarse en las tablas 3 a 9.

Todos estos resultados se han calculado para un parámetro de antena $\Omega_0 = 8$ correspondiente a una relación L/a de 27,3 para la unipolar y una relación L/a de 54,6 para la dipolo. Si se desea una relación diferente de la antena, las respuestas de la antena variarán. La figura C.13 presenta los factores multiplicativos de corrección, normalizados a la unidad para $\Omega_0 = 8$, que pueden aplicarse a los datos de este anexo y las tablas 4 a 9 para obtener información relativa a otras antenas.

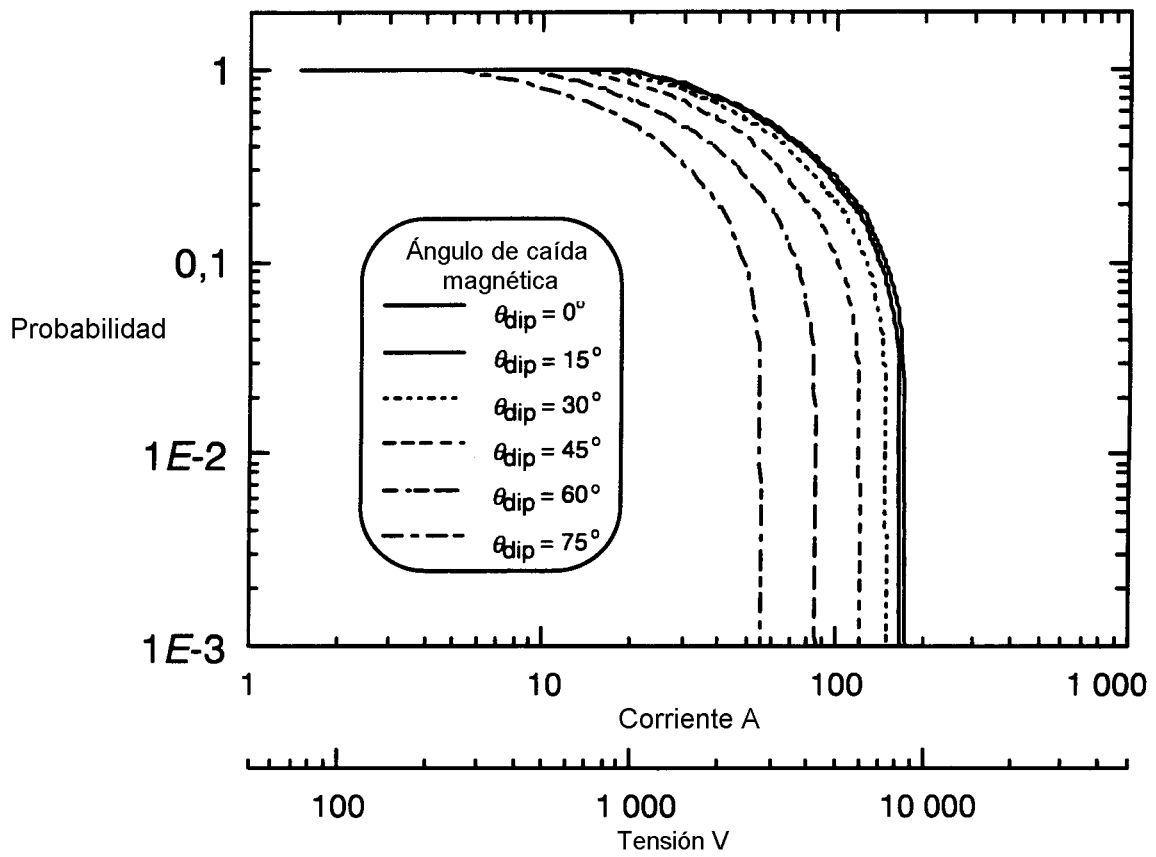


Fig. C.5 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena unipolar vertical de 1 m

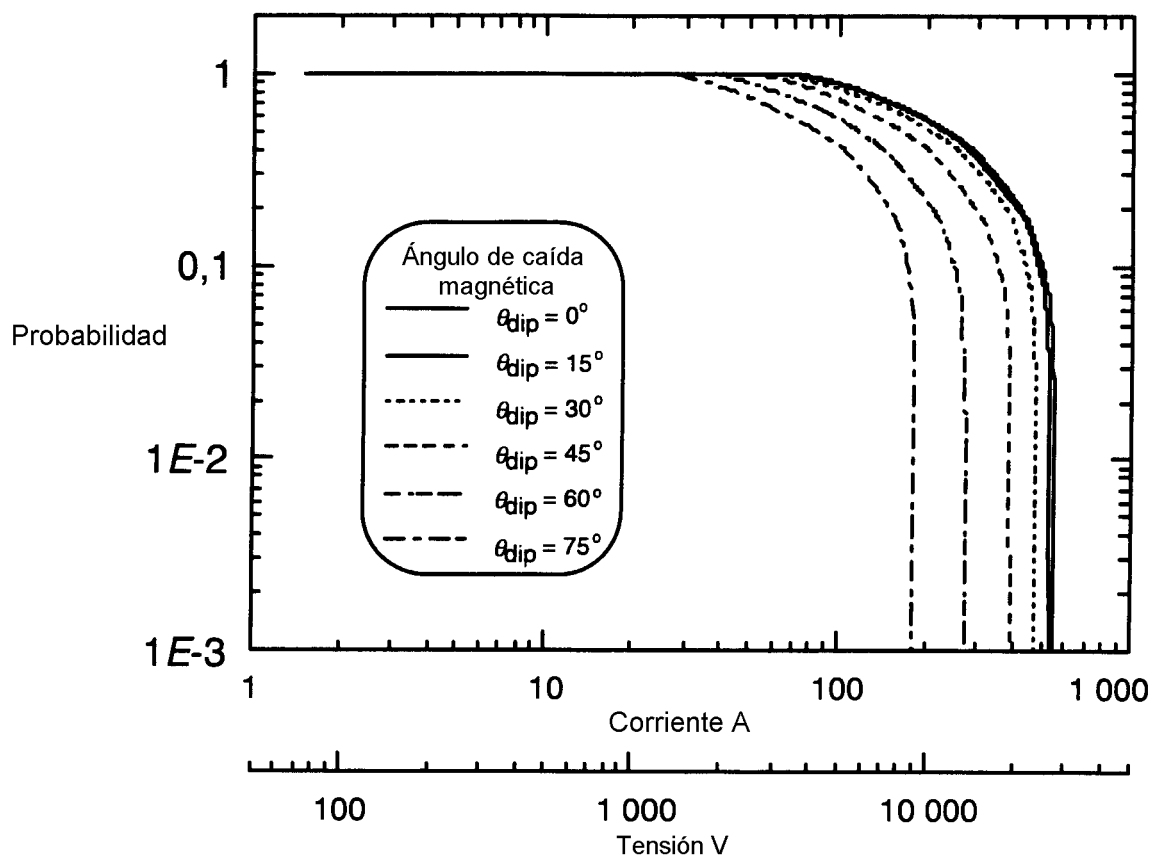


Fig. C.6 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena unipolar vertical de 3 m

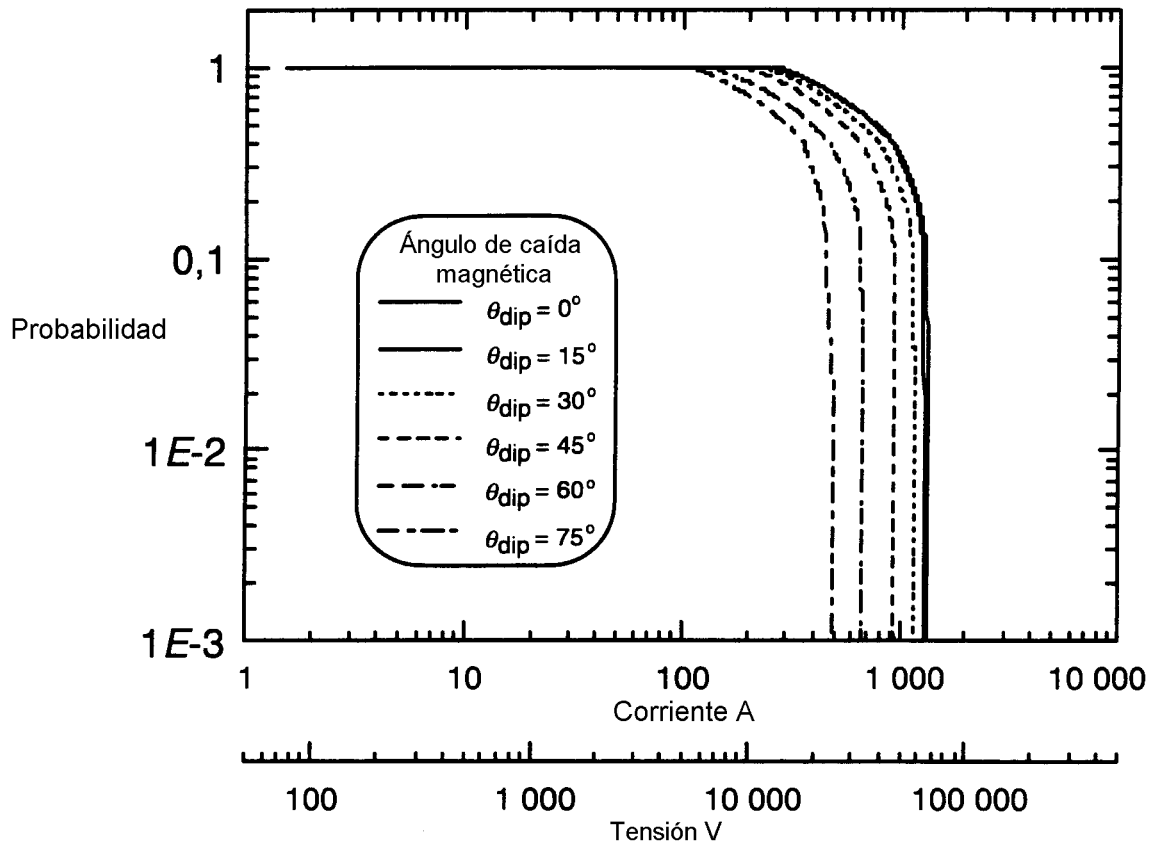


Fig. C.7 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena unipolar vertical de 10 m

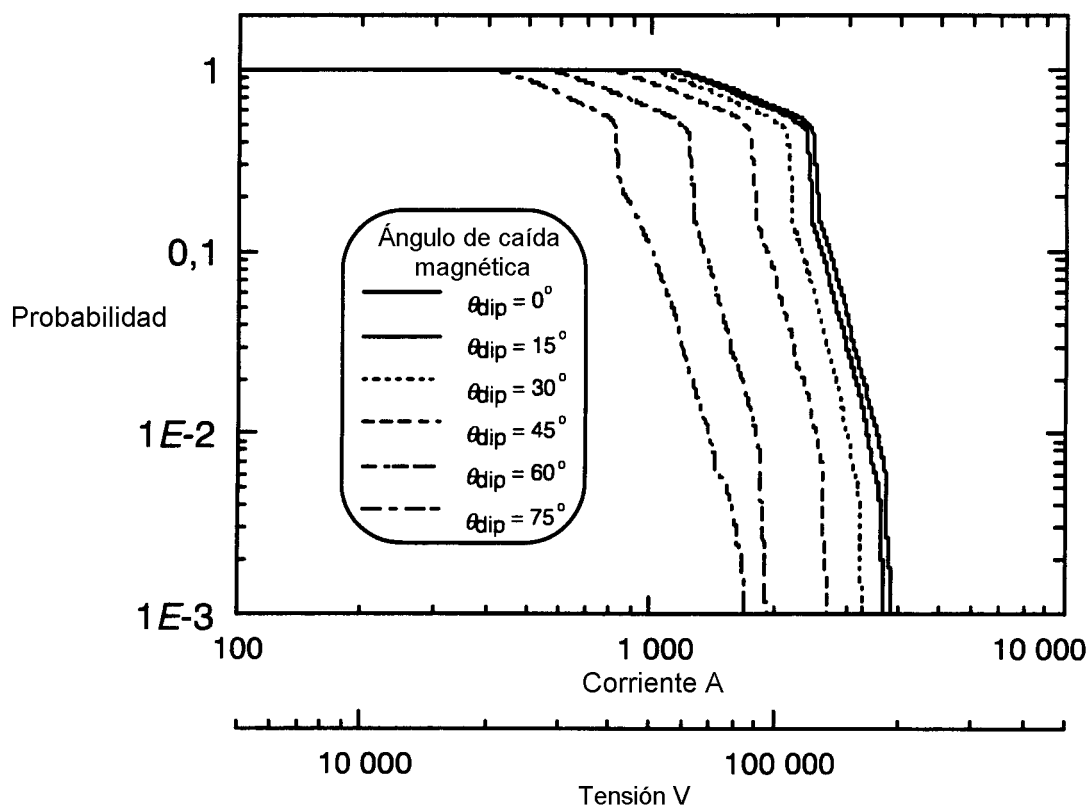


Fig. C.8 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena unipolar vertical de 100 m

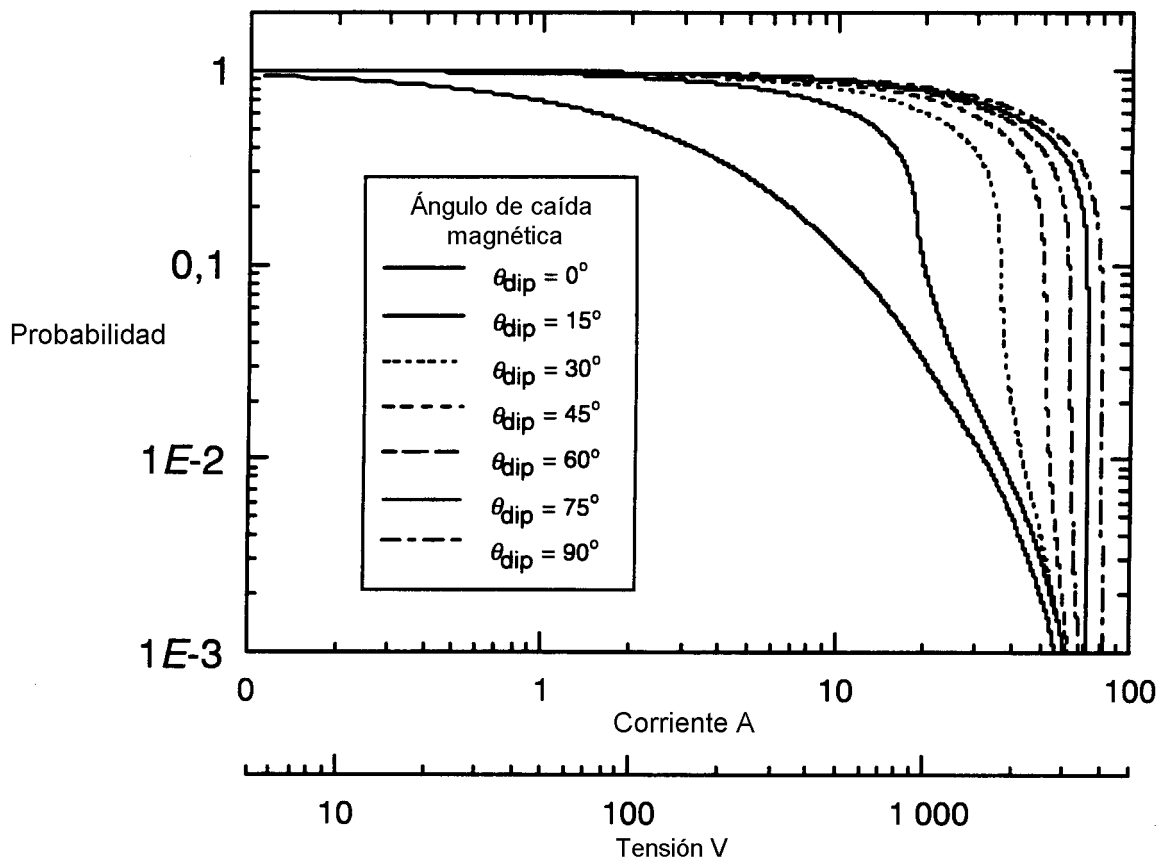


Fig. C.9 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena dipolo horizontal de 1 m

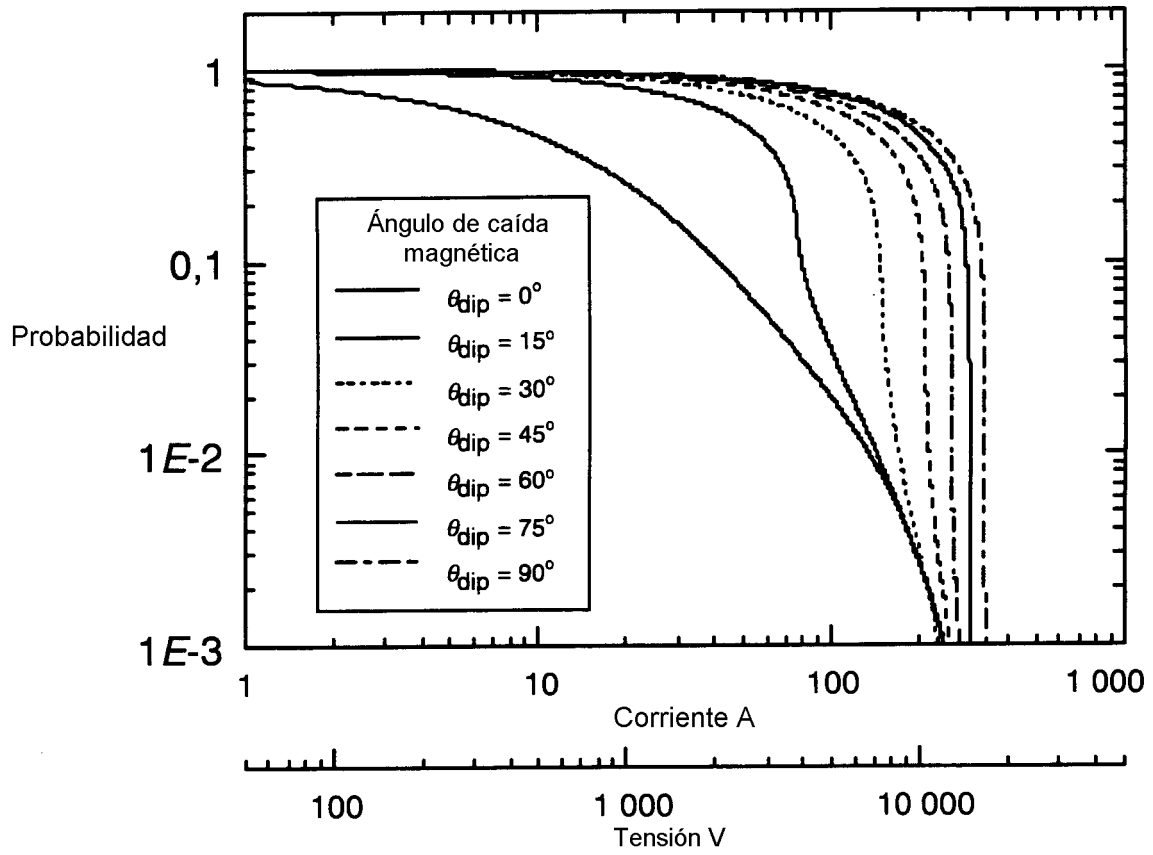


Fig. C.10 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena dipolo horizontal de 3 m

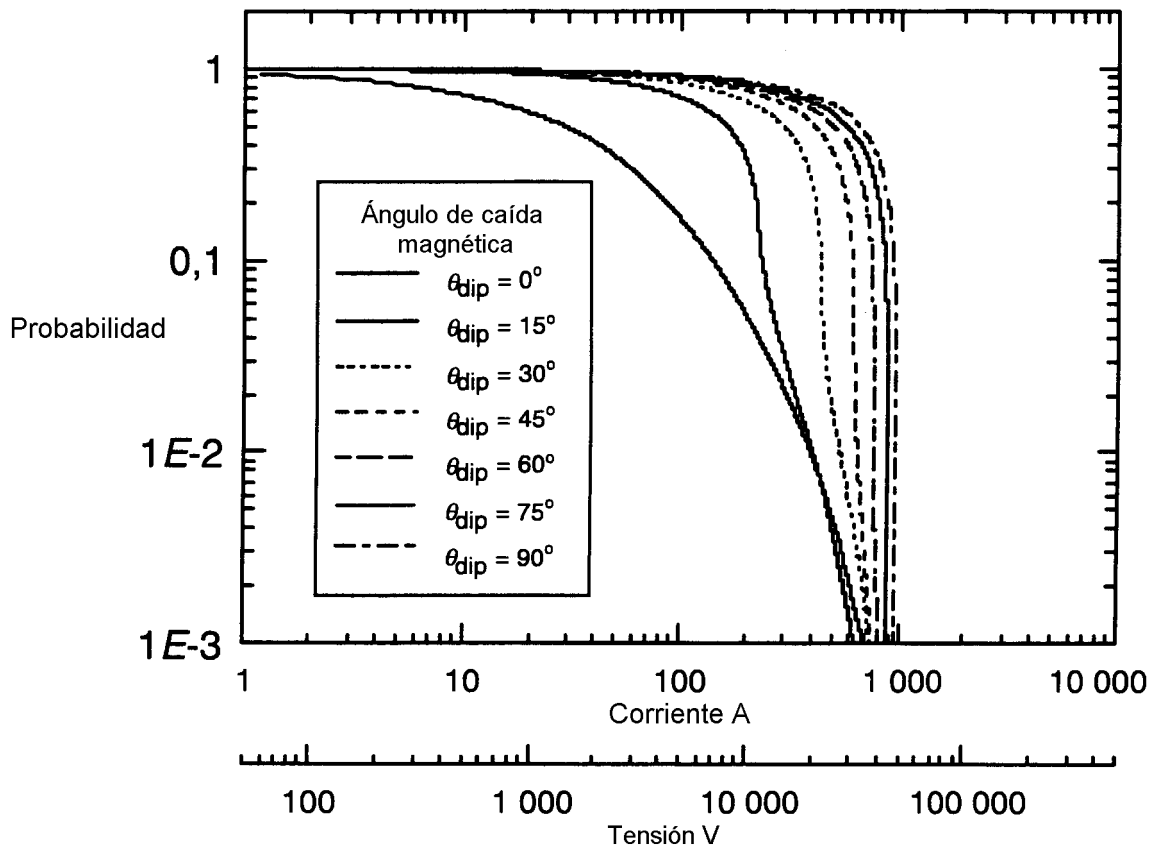


Fig. C.11 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena dipolo horizontal de 10 m

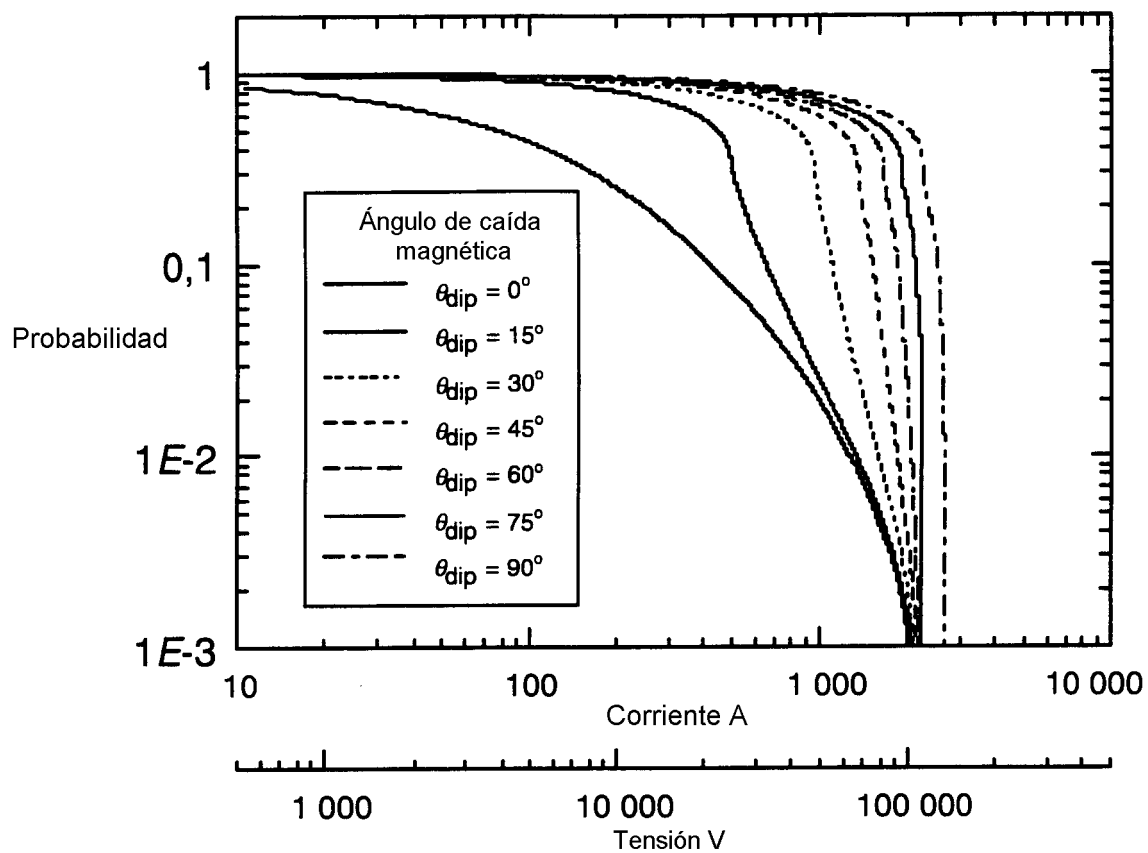


Fig. C.12 – Distribuciones acumuladas de probabilidad de las respuestas de los picos de corriente y de las tensiones de carga de una antena dipolo horizontal de 100 m

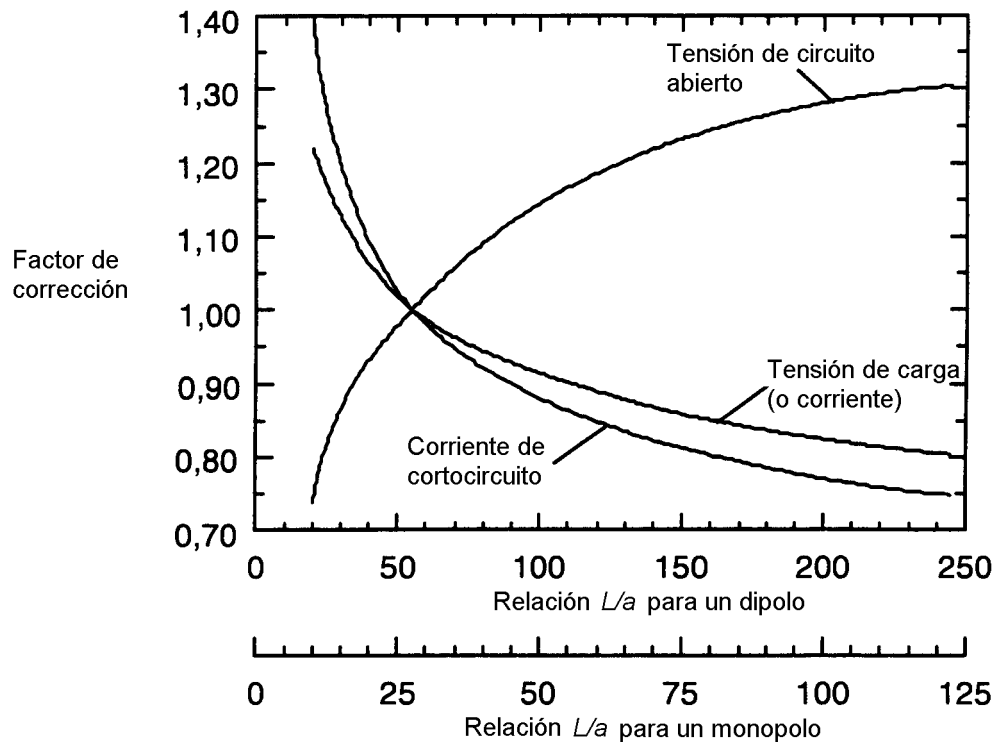


Fig. C.13 – Curva de los factores multiplicativos de corrección de los valores de V_{co} , I_{cc} , I_L y V_L para dos antenas con relaciones diferentes de L/a

C.6 Documentos de referencia

- [C.1] *EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data*, K.S.H. Lee, editor, Hemisphere Publishing Co. Nueva York, 1989.
- [C.2] Tesche, F.M., "Plane Wave Coupling to Cables" Capítulo 4 del *Handbook of Electromagnetic Compatibility*, R. Pérez, editor, Accademic Press, 1995.
- [C.3] Vance, E.F., *Coupling to Shielded Cables*, Krieger Publishing, 1987.
- [C.4] Harrington, R.F., *Field Computation by Moment Methods*, Reimpreso por el autor, Universidad de Siracusa, NY, 1968.
- [C.5] Balanis, C.A., *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1989.
- [C.6] Tesche, F.M., Ianoz, M., Karlsson, T. *EMC Analysis Methods and Calculational Models*¹⁾

1) A publicar.

ANEXO D (Informativo)

MEDIDA DE LAS CORRIENTES DE ACOPLAMIENTO EN LOS CABLES EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS DE CENTRALES TELEFÓNICAS

Al final de los años 60 y principios de los 70, los laboratorios Bell en los Estados Unidos efectuaron medidas de la onda continua (CW) de bajo nivel del acoplamiento de los campos IEMN-GA incidentes en los cables en el interior de las centrales telefónicas donde el tamaño variaba de 22 m³ a 8 700 m³. Se publicó la distribución de corrientes para tres tipos de construcciones (hormigón, metal ribeteado y hormigón armado). A pesar de que las medidas se efectuaron para una forma de onda del IEMN-GA inicial diferente a la utilizada por CEI, las amplitudes en función de la frecuencia de los dos entornos IEMN-GA son prácticamente iguales para frecuencias en la banda de 6 MHz a 50 MHz. Es por tanto de esperar que dichas corrientes puedan emplearse directamente para los propósitos de CEI. La tabla D.1 resume los resultados obtenidos por los laboratorios Bell para las corrientes pico a pico.

Tabla D.1
Corrientes pico a pico (I_{pp}) estimadas para los cables internos iluminados directamente por un IEMN-GA (extraído de [D.1])

Tipo de construcción	50%* de las corrientes (I_{pp})	95%* de las corrientes (I_{pp})	99%* de las corrientes (I_{pp})
	A	A	A
Hormigón	10	20	25
Metal ribeteado	10	20	25
Hormigón armado	3	5	7

* Porcentaje de las corrientes inferiores al valor indicado (severidad).

A partir del mismo conjunto de medidas, se resumen las características de las formas de onda de las corrientes internas inducidas por un IEMN-GA. Las formas de onda son representadas por dos sinusoides amortiguadas como las descritas en la ecuación (D.1), con las características f_c y Q dadas en la tabla D.2 e I_{pp} en la tabla D.1.

$$I_c(t) = k \left(I_{pp} / 2 \right) e^{\frac{-\pi f_c t}{Q}} \text{sen}(2\pi f_c t) \tag{D.1}$$

La constante normalizada k se define de tal forma que el valor máximo de I_c es igual a $I_{pp}/2$.

Tabla D.2
Características de la onda sinusoidal amortiguada para las corrientes sobre los cables internos (medidas) (extraído de [D.1])

Caso	Pseudo-frecuencia, f_c MHz	Coeficiente de amortiguamiento Q	
		Media	Gama de variación
Mínimo	1	20	15 - 25
Medio	7	60	40 - 100
Máximo	16	150	100 - 200

Documento de referencia

[D.1] *EMP Engineering and Desing Principles*, Laboratorios Bell, 1975

ANEXO ZA (Normativo)

OTRAS NORMAS INTERNACIONALES CITADAS EN ESTA NORMA CON LAS REFERENCIAS DE LAS NORMAS EUROPEAS CORRESPONDIENTES

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras publicaciones por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Las revisiones o modificaciones posteriores de cualquiera de las publicaciones referenciadas con fecha, sólo se aplican a esta norma europea cuando se incorporan mediante revisión o modificación. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de esa publicación.

NOTA – Cuando una norma internacional haya sido modificada por modificaciones comunes CENELEC, indicado por (mod), se aplica la EN/HD correspondiente.

Norma Internacional	Fecha	Título	EN/HD	Fecha	Norma UNE correspondiente¹⁾
CEI 60050(161)	1990	Vocabulario electrotécnico internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética	–		UNE 21302-161:1992
CEI 61000-2-9	1996	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA. Perturbaciones radiadas. Norma básica de CEM	EN 61000-2-9	1996	UNE-EN 61000-2-9:1998
CEI 61000-4-24	1997	Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 24: Métodos de ensayo para dispositivos de protección para perturbaciones conducidas de IEMN-GA. Norma básica de CEM	EN 61000-4-24	1997	UNE-EN 61000-4-24:1998

1) Esta columna se ha introducido en el anexo original de la norma europea, únicamente con carácter informativo a nivel nacional.

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