norma española

UNE-EN 62305-1

Septiembre 2007

TÍTULO

Protección contra el rayo

Parte 1: Principios generales

(IEC 62305-1:2006)

Protection against lightning. Part 1: General principles. (IEC 62305-1:2006).

Protection contre la foudre. Partie 1: Principes généraux. (CEI 62305-1:2006).

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de las Normas Europeas EN 62305-1:2006 y EN 62305-1:2006 Corr:2006, que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 62305-1:2006.

OBSERVACIONES

Esta norma, junto con las Normas UNE-EN 62305-2, UNE-EN 62305-3 y UNE-EN 62305-4, en elaboración, anulará y sustituirá a la Norma UNE 21185:1995 antes de 2009-02-01.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 207 *Transporte y Distribución de Energía Eléctrica* cuya Secretaría desempeña UNESA.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 39804:2007

© AENOR 2007
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

72 Páginas

Grupo 41

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

NORMA EUROPEA
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 62305-1

Febrero 2006

ICS 29.020; 91.120.40

Versión en español

Protección contra el rayo
Parte 1: Principios generales
(IEC 62305-1:2006)

Protection against lightning.
Part 1: General principles.
(IEC 62305-1:2006).

Protection contre la foudre.
Partie 1: Principes généraux.
(CEI 62305-1:2006).

Blitzschutz.
Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
(IEC 62305-1:2006).

Esta norma europea ha sido aprobada por CENELEC el 2006-02-01. 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, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, 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

© 2006 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CENELEC.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

PRÓLOGO

El texto del documento 81/262/FDIS, futura edición 1 de la Norma Internacional IEC 62305-1, preparado por el Comité Técnico TC 81, *Protección contra el rayo*, de IEC, fue sometido a voto paralelo IEC-CENELEC y fue aprobado por CENELEC como Norma Europea EN 62305-1 el 2006-02-01.

Se fijaron las siguientes fechas:

– Fecha límite en la que la norma europea debe adoptarse a nivel nacional por publicación de una norma nacional idéntica o por ratificación	(dop)	2006-11-01
– Fecha límite en la que deben retirarse las normas nacionales divergentes con esta norma	(dow)	2009-02-01

El anexo ZA ha sido añadido por CENELEC.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional IEC 62305-1:2006 fue aprobado por CENELEC como norma europea sin ninguna modificación.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ÍNDICE

Página

PRÓLOGO **8**

INTRODUCCIÓN **10**

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN **11**

2 NORMAS PARA CONSULTA **11**

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES **11**

4 PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO **16**

5 DAÑOS CAUSADOS POR LOS RAYOS **16**
5.1 Daños en una estructura **16**
5.2 Daños en los servicios **19**
5.3 Tipos de pérdidas **20**

6 NECESIDAD Y CONVENIENCIA ECONÓMICA DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO **23**
6.1 Necesidad de la protección contra el rayo **23**
6.2 Conveniencia económica de la protección contra el rayo **24**

7 MEDIDAS DE PROTECCIÓN **24**
7.1 Medidas de protección para reducir los daños a personas por tensiones de paso y de contacto **24**
7.2 Medidas de protección para reducir los daños físicos **24**
7.3 Medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos **25**
7.4 Elección de las medidas de protección **25**

8 CRITERIOS BÁSICOS PARA LA PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS Y DE LOS SERVICIOS **25**
8.1 Niveles de protección contra el rayo (NPR) **26**
8.2 Zonas de protección contra el rayo (ZPR) **30**
8.3 Protección de las estructuras **31**
8.4 Protección de los servicios **32**

ANEXO A (Informativo) PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO **33**

ANEXO B (Informativo) FUNCIONES TEMPORALES DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ANÁLISIS **41**

ANEXO C (Informativo) SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ENSAYO **47**

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Figura D.2 Disposición típica de los conductores de un SPCR 58

Figura D.3 Diagrama de esfuerzos para la configuración de la figura D.2 59

Figura D.4 Fuerza por unidad de longitud a lo largo del conductor horizontal de la figura D.2 59

Tabla 1 Efectos del rayo en estructuras típicas 17

Tabla 2 Efectos del rayo sobre servicios típicos 19

Tabla 3 Daños y pérdidas en una estructura en función del punto en el que impacta el rayo 22

Tabla 4 Daños y pérdidas en un servicio en función del punto en el que impacta el rayo . 22

Tabla 5 Valores máximos de los parámetros del rayo correspondientes a los NPR 27

Tabla 6 Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de la esfera ficticia asociada correspondientes a los niveles de protección 30

Tabla 7 Probabilidades de los límites de los parámetros de la corriente del rayo 30

Tabla A.1 Valores de los parámetros de la corriente del rayo según CIGRE (Electra Nº 41 o Nº 69*)[3], [4] 36

Tabla A.2 Distribución logarítmico normal de los parámetros de la corriente del rayo Valores medios μ y de dispersión σ_{log} calculados para el 95% y 5% según CIGRE (Electra Nº 41 ó Nº 69*)[3], [4] 37

Tabla B.1 Parámetros de la ecuación B.1 41

Tabla C.1 Parámetros de ensayo del primer impacto de corta duración 48

Tabla C.2 Parámetros de ensayo del impacto de larga duración 48

Tabla C.3 Parámetros de ensayo de impactos de corta duración 48

Tabla D.1 Resumen de los parámetros del rayo a considerar en el cálculo de los valores de ensayo de los diferentes componentes de los SPCR y para los diferentes niveles de protección 52

Tabla D.2 Características físicas de materiales típicos empleados en los componentes de un SPCR 55

Tabla D.3 Calentamiento de conductores de diferentes secciones en función de *W/R* 55

Tabla E.1 Valores convencionales de las impedancias de puesta a tierra Z y Z_1 en función de la resistividad del terreno 67

Tabla E.2 Ondas tipo impulso de corriente previstas debidas a descargas atmosféricas 68

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL

Protección contra el rayo
Parte 1: Principios generales

PRÓLOGO

1) IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) es una organización mundial para la normalización, que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales (Comités Nacionales de IEC). El objetivo de IEC es promover la cooperación internacional sobre todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctrico y electrónico. Para este fin y también para otras actividades, IEC publica Normas Internacionales, Especificaciones Técnicas, Informes Técnicos, Especificaciones Disponibles al Público (PAS) y Guías (de aquí en adelante "Publicaciones IEC"). Su elaboración se confía a los comités técnicos; cualquier Comité Nacional de IEC que esté interesado en el tema objeto de la norma puede participar en su elaboración. Organizaciones internacionales gubernamentales y no gubernamentales relacionadas con IEC también participan en la elaboración. IEC colabora estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO), de acuerdo con las condiciones determinadas por acuerdo entre ambas.

2) Las decisiones formales o acuerdos de IEC sobre materias técnicas, expresan en la medida de lo posible, un consenso internacional de opinión sobre los temas relativos a cada comité técnico en los que existe representación de todos los Comités Nacionales interesados.

3) Los documentos producidos tienen la forma de recomendaciones para uso internacional y se aceptan en este sentido por los Comités Nacionales mientras se hacen todos los esfuerzos razonables para asegurar que el contenido técnico de las publicaciones IEC es preciso, IEC no puede ser responsable de la manera en que se usan o de cualquier mal interpretación por parte del usuario.

4) Con el fin de promover la unificación internacional, los Comités Nacionales de IEC se comprometen a aplicar de forma transparente las Publicaciones IEC, en la medida de lo posible en sus publicaciones nacionales y regionales. Cualquier divergencia entre la Publicación IEC y la correspondiente publicación nacional o regional debe indicarse de forma clara en esta última.

5) IEC no establece ningún procedimiento de marcado para indicar su aprobación y no se le puede hacer responsable de cualquier equipo declarado conforme con una de sus publicaciones.

6) Todos los usuarios deberían asegurarse de que tienen la última edición de esta publicación.

7) No se debe adjudicar responsabilidad a IEC o sus directores, empleados, auxiliares o agentes, incluyendo expertos individuales y miembros de sus comités técnicos y comités nacionales de IEC por cualquier daño personal, daño a la propiedad u otro daño de cualquier naturaleza, directo o indirecto, o por costes (incluyendo costes legales) y gastos derivados de la publicación, uso o confianza de esta publicación IEC o cualquier otra publicación IEC.

8) Se debe prestar atención a las normas para consulta citadas en esta publicación. La utilización de las publicaciones referenciadas es indispensable para la correcta aplicación de esta publicación.

9) Se debe prestar atención a la posibilidad de que algunos de los elementos de esta Publicación IEC puedan ser objeto de derechos de patente. No se podrá hacer responsable a IEC de identificar alguno o todos esos derechos de patente.

La Norma Internacional IEC 62305-1 ha sido elaborada por el comité técnico 81 de IEC: Protección contra el rayo.

La serie de Normas IEC 62305 (partes 1 a 5), está establecida de acuerdo con el Nuevo Plan de Publicaciones, aprobado por los Comités Nacionales [81/171/RQ (2001-06-29)], que reestructura y actualiza de una forma más simple y racional las publicaciones de las series de Normas IEC 61024, IEC 61312 e IEC 61663.

El esto de esta primera edición de la Norma IEC 62305-1 está elaborada a partir de la siguiente norma, y la reemplaza:

– IEC 61024-1-1, primera edición (1993).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

El texto de esta norma se basa en los documentos siguientes:

FDIS	Informe de voto
81/262/FDIS	81/267/RVD

El informe de voto indicado en la tabla anterior ofrece toda la información sobre la votación para la aprobación de esta norma.

Esta norma ha sido elaborada, tan fielmente como sea posible, de acuerdo con las Directivas ISO/IEC, Parte 2.

La Norma IEC 62305 consta de las siguientes partes, bajo el título general *Protección contra el rayo:*

Parte 1: Principios generales.

Parte 2: Evaluación del riesgo.

Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano.

Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

Parte 5: Servicios[1)].

El comité ha decidido que el contenido de esta norma (la norma base y de sus modificaciones) permanezca vigente hasta la fecha de mantenimiento indicada en la página web de IEC "http://webstore.iec.ch" en los datos relativos a la norma específica. En esa fecha, la norma será

– confirmada;

– anulada;

– reemplazada por una edición revisada; o

– modificada.

1) A publicar.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

INTRODUCCIÓN

No existen dispositivos o métodos capaces de modificar los fenómenos atmosféricos naturales hasta el punto de impedir las descargas de rayos. Los impactos de rayo sobre las estructuras o en sus proximidades (o sobre los servicios conectados a ellas) son peligrosos para las personas, las propias estructuras, su contenido, las instalaciones y los servicios. Esta es la razón por la que son esenciales las medidas de protección contra el rayo.

La necesidad de protección, los beneficios económicos de la instalación de medidas de protección apropiadas y su elección deberían determinarse en términos de evaluación del riesgo. La evaluación de riesgos es el objeto de la Norma IEC 62305-2.

Los criterios sobre diseño, instalación y mantenimiento de las medidas de protección contra el rayo se consideran en tres partes separadas:

- una primera parte, relativa a las medidas de protección para reducir los daños físicos y los riesgos para las personas en una estructura, es el objeto de la Norma IEC 62305-3;

- una segunda parte, relativa a las medidas de protección para reducir los fallos en los sistemas eléctricos y electrónicos en una estructura, es el objeto de la Norma IEC 62305-4;

- una tercera parte, relativa a las medidas de protección para la reducción de los daños físicos y la pérdida de los servicios conectados a una estructura (principalmente las líneas de potencia y de telecomunicación), es el objeto de la Norma IEC 62305-5.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Protección contra el rayo
Parte 1: Principios generales

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta parte de la Norma IEC 62305 proporciona los principios generales a seguir para la protección contra el rayo de:

– las estructuras, incluyendo sus instalaciones y su contenido, así como las personas;

– los servicios conectados a una estructura.

Los casos siguientes están fuera del campo de aplicación de esta norma:

– ferrocarriles;

– vehículos, barcos, aviones, instalaciones en el mar;

– canalizaciones subterráneas de alta presión;

– canalizaciones, líneas de potencia y de telecomunicación no conectadas a una estructura.

NOTA Estos casos están regulados, por lo general, por reglamentos específicos emitidos por las autoridades competentes.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se indican son indispensables para la aplicación de esta norma. Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

IEC 62305-2 *Protección contra el rayo. Parte 2: Evaluación del riesgo.*

IEC 62305-3 *Protección contra el rayo. Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano.*

IEC 62305-4 *Protección contra el rayo. Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.*

IEC 62305-5[2)] *Protección contra el rayo. Parte 5: Servicios.*

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para el propósito de este documento, se aplican los siguientes términos y definiciones.

3.1 descarga a tierra:
Descarga eléctrica de origen atmosférico entre nube y tierra, consistente en uno o varios rayos.

3.2 descarga descendente:
Descarga atmosférica nube a tierra iniciada por un precursor descendente.

NOTA Una descarga descendente consiste en un primer rayo de corta duración que puede estar seguido por más rayos de corta duración. Uno o más de los rayos de corta duración pueden estar seguidos por uno de larga duración.

2) A publicar.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

3.3 descarga ascendente:
Descarga desde una estructura en tierra hacia la nube, iniciada por un precursor ascendente.

NOTA Una descarga ascendente consiste en un primer rayo de larga duración con o sin múltiples rayos superpuestos de corta duración. Uno o más de estos rayos de corta duración pueden estar seguidos por uno de larga duración.

3.4 rayo:
Descarga eléctrica simple en una descarga a tierra.

3.5 rayo de corta duración:
Parte de la descarga atmosférica que corresponde a un impulso de corriente.

NOTA Esta corriente tiene una duración T_2 hasta la mitad del valor, normalmente inferior a 2 ms (véase la figura A.1).

3.6 rayo de larga duración:
Parte de la descarga atmosférica que corresponde a una corriente continua.

NOTA La duración T_{long} (duración entre el valor 10% en el frente y el valor 10% en la cola) de esta corriente continua es normalmente superior a 2 ms e inferior a 1 s (véase la figura A.2).

3.7 rayos múltiples:
Descarga atmosférica en la que el número medio de rayos es de 3 a 4, con un intervalo típico entre ellos de 50 ms.

NOTA Se han observado fenómenos que podían tener hasta algunas docenas de rayos y para los que los intervalos de tiempo entre ellos están entre 10 ms a 250 ms.

3.8 punto de impacto:
Punto en el que una descarga impacta en el terreno o en un objeto protuberante (por ejemplo una estructura, un sistema de protección contra el rayo, servicios, un árbol, etc.).

NOTA Una descarga tipo rayo puede tener más de un punto de impacto.

3.9 corriente del rayo, *i*:
Corriente que circula en el punto de impacto.

3.10 valor de cresta, *I*:
Valor máximo de la corriente del rayo.

3.11 valor medio de la pendiente de la corriente del rayo de corta duración:
Valor medio de la variación de la corriente en un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$.

NOTA Se expresa como la diferencia $i(t_2) - i(t_1)$ de los valores de la corriente al comienzo y al final del intervalo, dividido por $t_2 - t_1$ (véase la figura A.1).

3.12 tiempo de subida de la corriente del rayo de corta duración, T_1:
Parámetro virtual definido como 1,25 veces el intervalo de tiempo entre los instantes en que se alcanzan el 10% y el 90% del valor de cresta (véase la figura A.1).

3.13 origen virtual de la corriente del rayo de corta duración, O_1:
Punto de intersección con el eje de tiempos de una línea recta trazada entre los puntos de referencia correspondientes al 10% y 90% del frente de la corriente (véase la figura A.1); precede por 0,1 T_1 al instante en el que la corriente alcanza el 10% de su valor de cresta.

3.14 tiempo hasta la mitad del valor de la corriente del rayo de corta duración, T_2:
Parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo que hay entre el origen virtual O_1 y el instante en el que la corriente ha bajado hasta la mitad del valor de la corriente de cresta (véase la figura A.1).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

3.15 duración de la descarga, *T:*
Tiempo durante el cual la corriente del rayo circula por el punto de impacto.

3.16 duración de la corriente de choque de larga duración, T_{long}:
Tiempo durante el cual la corriente del rayo de larga duración está comprendida entre el 10% del valor de cresta cuando la corriente continua aumenta, y el 10% del valor de cresta cuando la corriente disminuye (véase la figura A.2).

3.17 carga del rayo, Q_{flash}:
Integral en el tiempo de la corriente del rayo a lo largo de la duración total de la descarga.

3.18 carga del rayo de corta duración, Q_{short}:
Integral en el tiempo de la corriente del rayo a lo largo de la duración del rayo de corta duración.

3.19 carga del rayo de larga duración, Q_{long}:
Integral en el tiempo de la corriente del rayo a lo largo de la duración del rayo de larga duración.

3.20 energía específica, *W/R:*
Integral en el tiempo del cuadrado de la corriente del rayo por la duración total de la descarga.

NOTA Representa la energía disipada por la corriente del rayo en una resistencia unidad.

3.21 energía específica de la corriente de corta duración:
Integral en el tiempo del cuadrado de la corriente del rayo por la duración del rayo de corta duración.

NOTA La energía específica de una corriente de larga duración es despreciable.

3.22 objeto a proteger:
Estructura o servicio a proteger de los efectos del rayo.

3.23 estructura a proteger:
Estructura para la que se requiere una protección contra los efectos del rayo conforme con esta norma.

NOTA Una estructura a proteger puede formar parte de una estructura mayor.

3.24 servicio a proteger:
Servicio conectado a una estructura para el que se requiere una protección contra los efectos del rayo conforme con esta norma.

3.25 descarga directa sobre un objeto:
Descarga que impacta directamente sobre el objeto a proteger.

3.26 descarga próxima a un objeto:
Descarga que impacta a una distancia suficientemente próxima al objeto a proteger para producir sobretensiones peligrosas.

3.27 sistema eléctrico:
Sistema que incorpora componentes de alimentación de potencia en baja tensión.

3.28 sistema electrónico:
Sistema que incorpora componentes electrónicos sensibles tales como equipos de comunicación, ordenadores, sistemas de control e instrumentación, sistemas de radio, instalaciones electrónicas de potencia.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

3.29 sistemas internos:
Sistemas eléctricos y electrónicos situados en el interior de una estructura.

3.30 daño físico:
Daños en las estructuras (o en su contenido) o a un servicio debidos a los efectos mecánicos, térmicos, químicos y explosivos del rayo.

3.31 daños en los seres vivos:
Daños, incluida la muerte, a las personas o a los animales debidos a las tensiones de paso y de contacto producidas por el rayo.

3.32 fallo de los sistemas eléctricos y electrónicos:
Daño permanente de los sistemas eléctricos y electrónicos debidos a los efectos electromagnéticos del rayo (IEMR).

3.33 impulso electromagnético del rayo, IEMR*:*
Efectos electromagnéticos debidos a la corriente del rayo.

NOTA Incluyen tanto las ondas de choque conducidas así como los efectos del campo electromagnético radiado.

3.34 onda de choque:
Onda transitoria que aparece como una sobretensión y/o una sobreintensidad producida por el IEMR.

NOTA Las ondas de choque debidas al IEMR pueden provenir de las corrientes (parciales) del rayo, de los efectos inductivos en los bucles de la instalación y de la tensión residual, aguas abajo, de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

3.35 zona de protección contra el rayo, ZPR:
Zona en la que está definido el ambiente electromagnético.

NOTA Los límites de una ZPR no son necesariamente los límites físicos (por ejemplo las paredes, el suelo o el techo).

3.36 riesgo, *R:*
Valor de las pérdidas probables medias anuales (personas y bienes) debidas al rayo, respecto al valor total (personas y bienes) del objeto a proteger.

3.37 riesgo tolerable, R_T:
Valor máximo del riesgo que puede admitirse para el objeto a proteger.

3.38 nivel de protección contra el rayo, NPR:
Cifra relacionada con un conjunto de parámetros de la corriente del rayo y relativa a la probabilidad de que los valores máximos y mínimos de diseño asociados no se sobrepasen cuando aparezcan rayos naturales.

NOTA Se emplea un nivel de protección contra el rayo para diseñar medidas de protección de acuerdo al conjunto de parámetros relevantes de la corriente del rayo.

3.39 medidas de protección:
Medidas a tomar en el objeto a proteger con el fin de reducir el riesgo.

3.40 sistema de protección contra el rayo, SPCR:
Instalación completa destinada a reducir los daños físicos debidos a los impactos directos de los rayos en la estructura.

NOTA Está formada por sistemas externos e internos de protección contra el rayo.

3.41 sistema externo de protección contra el rayo:
Parte del SPCR formado por un dispositivo captador, los conductores de bajada y la terminación de tierra.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

3.42 sistema interno de protección contra el rayo:
Parte del SPCR formado por las conexiones equipotenciales y/o el aislamiento eléctrico del SPCR externo.

3.43 dispositivo captador:
Parte de un SPCR externo formado por elementos metálicos tales como varillas, mallas o catenarias conductoras destinados a interceptar el rayo.

3.44 conductores de bajada:
Parte de un SPCR externo cuya misión es conducir la corriente del rayo desde el dispositivo captador al sistema de puesta a tierra.

3.45 sistema de puesta a tierra:
Parte de un SPCR externo cuya misión es conducir y dispersar la corriente del rayo en el terreno.

3.46 elementos conductores exteriores:
Partes metálicas que entran o salen de la estructura a proteger, tales como tuberías, elementos metálicos de cables, conducciones metálicas, etc. que pueden conducir una parte de la corriente del rayo.

3.47 conexión equipotencial de rayo:
Interconexión de las partes metálicas separadas de un SPCR, realizada bien mediante conexiones conductoras directas o mediante dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias al objeto de reducir las diferencias de potencial producidas por la corriente del rayo.

3.48 pantalla:
Tramado metálico para reducir los daños físicos debidos a los impactos de los rayos sobre un servicio.

3.49 sistema de protección contra el IEMR :
Conjunto completo de medidas de protección contra el IEMR para los sistemas internos.

3.50 pantalla magnética:
Malla metálica cerrada o pantalla continua que rodea el objeto a proteger, o parte de él, con la finalidad de reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos.

3.51 dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias:
Dispositivo pensado para limitar las sobretensiones transitorias y evacuar la corriente de ondas tipo impulso. Contiene al menos un componente no lineal.

3.52 protección coordinada con dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias:
Conjunto de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias debidamente elegidos, coordinados y colocados para reducir los fallos en los sistemas eléctricos y electrónicos.

3.53 tensión soportada a los impulsos asignada, U_w:
Tensión soportada a los impulsos asignada por el constructor al equipo o a una parte del equipo, caracterizando la capacidad específica de su aislamiento para soportar sobretensiones.

NOTA En esta norma, sólo se considera la tensión soportada a los impulsos asignada entre conductores activos y tierra.

(IEC 60664-1:2002)[1] 3)

3.54 impedancia convencional de tierra:
Relación entre el valor de cresta de la tensión y de la corriente en la toma de tierra, que, en general, no se producen al mismo tiempo.

3) Las cifras entre corchetes hacen referencia a la bibliografía.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

4 PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO

Los parámetros de la corriente del rayo empleados en la serie de la Norma IEC 62305 se encuentran en el anexo A.

El anexo B informa sobre la función en el tiempo de la corriente del rayo para fines de análisis.

El anexo C informa sobre la simulación de la corriente del rayo con fines de ensayo.

El anexo D informa sobre los parámetros básicos a emplear en los laboratorios para simular los efectos del rayo sobre los SPCR.

El anexo E informa sobre las ondas de choque debidas a los rayos en distintos puntos de la instalación.

5 DAÑOS CAUSADOS POR LOS RAYOS

5.1 Daños en una estructura

Al impactar el rayo sobre una estructura puede producir daños en la propia estructura, en sus ocupantes y en sus bienes, incluyendo fallos de los sistemas internos. Los daños y los fallos pueden también extenderse a los alrededores de la estructura e incluso implicar al medioambiente local. El tamaño de esta extensión depende de las características de la estructura y de la descarga atmosférica.

5.1.1 Efectos del rayo en una estructura

Las características principales de las estructuras en relación con los efectos del rayo incluyen:

- los materiales de construcción (por ejemplo, madera, ladrillo, hormigón, hormigón armado, armaduras metálicas);
- la función (viviendas, oficinas, granjas, teatros, hoteles, escuelas, hospitales, museos, iglesias, prisiones, almacenes, bancos, fábricas, plantas industriales, zonas deportivas);
- los ocupantes y los bienes (personas y animales, materiales no inflamables, materiales inflamables, materiales explosivos o no explosivos, sistemas eléctricos y electrónicos de alta o baja tensión);
- los servicios conectados (líneas de potencia, líneas de telecomunicación, tuberías);
- las medidas de protección existentes o proporcionadas (por ejemplo, medidas de protección para reducir el daño físico y proteger la vida, medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas internos);
- la escala de la extensión del daño (estructura con dificultad de evacuación o estructura en la que puede producirse pánico, estructura peligrosa para los alrededores, estructura peligrosa para el medioambiente).

La tabla 1 indica los efectos del rayo en diferentes tipos de estructuras.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla 1 – Efectos del rayo en estructuras típicas

Tipo de estructura según su función y/o su contenido	Efectos del rayo
Viviendas	Perforación de las instalaciones eléctricas, fuego y daños materiales Daños limitados normalmente a los objetos expuestos al punto de impacto o al paso de la corriente del rayo Fallo de los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos instalados (por ejemplo, televisores, ordenadores, módems, teléfonos, etc.)
Granjas	Riesgo primario de incendio y de tensiones de paso peligrosas, así como daños materiales Riesgo secundario debido a la pérdida de la alimentación eléctrica, y de peligro de muerte del ganado por fallo del control electrónico de la ventilación y de los sistemas de distribución de la alimentación, etc.
Teatros Hoteles Escuelas Almacenes Zonas deportivas	Daños en las instalaciones eléctricas (por ejemplo, la iluminación) susceptibles de provocar el pánico Fallo en las alarmas de incendio y retraso en las medidas contra incendios
Bancos Compañías de seguros Compañías comerciales, etc.	Como en el apartado anterior, además de problemas por pérdida de las comunicaciones, fallo de los ordenadores y pérdidas de datos
Hospitales Centros de salud Prisiones	Como en el apartado anterior, además de problemas de personas en cuidados intensivos, y dificultades de rescate de personas inmovilizadas
Industria	Efectos complementarios en función del contenido de las fábricas, en un rango que va desde daño menor hasta daño inaceptable y pérdida de la producción
Museos y lugares arqueológicos Iglesias	Pérdidas irreparables de patrimonio cultural
Telecomunicaciones Centrales de potencia	Pérdidas inaceptables de servicios para el público
Fábricas pirotécnicas Municiones	Consecuencias del incendio y la explosión de la planta y sus alrededores
Fábrica química Refinería Planta nuclear Plantas y laboratorios bioquímicos	Incendio y mal funcionamiento de la planta con consecuencias perjudiciales para el medioambiente local y global

5.1.2 Fuentes y tipos de daños en una estructura

La corriente del rayo es la causa del daño. Las situaciones siguientes deben tomarse en consideración, según la situación del punto de impacto respecto a la estructura considerada:

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

– S1: descargas que impactan directamente sobre la estructura;

– S2: descargas que impactan en el suelo en las proximidades de la estructura;

– S3: descargas que impactan directamente en los servicios conectados a la estructura;

– S4: descargas que impactan directamente en el suelo en las proximidades de los servicios conectados a la estructura.

Las descargas que impactan directamente en la estructura pueden provocar:

– daños mecánicos directos, fuego y/o explosión causados por el propio arco de plasma caliente del rayo, por la corriente que produce un calentamiento óhmico de los conductores (conductores sobrecalentados), o por la carga eléctrica que produce erosión de arco (fusión del metal);

– fuego y/o explosiones por chispas producidas por sobretensiones resultantes de acoplamientos resistivos e inductivos y por el paso de parte de las corrientes de los rayos;

– daños en las personas por tensiones de paso y de contacto resultantes de acoplamientos resistivos e inductivos;

– fallos o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos al IEMR.

Las descargas que impactan en las proximidades de la estructura pueden provocar:

– fallos o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos al IEMR.

Las descargas que impactan en los servicios conectados a la estructura pueden provocar:

– fuego y/o explosiones por chispas producidas por sobretensiones y corrientes de rayo transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura;

– daños en las personas por tensiones de contacto en el interior de la estructura producidas por corrientes de rayo transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura;

– fallos o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos a sobretensiones transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura.

Las descargas que impactan en las proximidades de los servicios conectados a la estructura pueden provocar:

– fallos o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos a sobretensiones transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura.

NOTA 1 La protección contra el mal funcionamiento de los sistemas internos no está cubierta por la serie de Normas IEC 62305. Debería hacerse referencia a la Norma IEC 61000-4-5[2].

NOTA 2 Solamente se consideran como capaces de causar de un incendio las chispas producidas por la corriente del rayo (parcial o total).

NOTA 3 Las descargas directas o en las proximidades de las tuberías entrantes no producen daños en la estructura si las tuberías están conectadas a la barra equipotencial de la estructura (véase la Norma IEC 62305-3).

En conclusión, el rayo puede producir tres tipos de daños esenciales:

– D1: daños en seres vivos por tensiones de paso y de contacto;

– D2: daños físicos (fuego, explosión, destrucción mecánica, emanación química) producidos por los efectos de la corriente del rayo, incluyendo las chispas;

– D3: fallo de los sistemas internos debido al IEMR.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

5.2 Daños en los servicios

Cuando el rayo afecta a un servicio puede producir daños en el propio medio físico (línea o conducto) utilizado para proporcionar el servicio, así como en los equipos eléctricos y electrónicos conectados.

NOTA Los servicios a tener en cuenta son las conexiones físicas entre:

- el edificio de telecomunicación y el de los usuarios o entre dos edificios de telecomunicación o dos edificios de usuarios, para las líneas de telecomunicación,
- el edificio de telecomunicación o el edificio de los usuarios y un nudo de distribución o entre dos nudos de distribución para las líneas de telecomunicación,
- el centro de transformación de alta tensión y el edificio del usuario, para las líneas de potencia,
- el centro de distribución principal y el edificio del usuario, para los conductos.

El tamaño de la zona afectada depende de las características del servicio, del tipo y de la extensión de los sistemas eléctricos y electrónicos, así como de las características de la descarga atmosférica.

5.2.1 Efectos del rayo en un servicio

Las características principales de un servicio en relación con los efectos del rayo incluyen:

- la construcción (línea: aérea, subterránea, apantallada o no apantallada, fibra óptica; tubería: sobre el suelo, enterrada, metálica, plástica);
- la función (líneas de telecomunicación, líneas de potencia, tuberías);
- la estructura suministrada (construcción, contenido, dimensiones, situación);
- las medidas de protección existentes o previstas (por ejemplo, cables de apantallado, dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias, caminos redundantes, sistemas de almacenamiento de fluidos, grupos generadores, sistemas de alimentación ininterrumpida);

La tabla 2 indica los efectos del rayo en diferentes tipos de servicios.

Tabla 2 – Efectos del rayo sobre servicios típicos

Tipo de servicio	Efectos del rayo
Línea de telecomunicación	Daños mecánicos en la línea, fusión de las pantallas y de los conductores, ruptura del aislamiento del cable y del equipo produciendo un fallo primario con pérdida inmediata de servicio. Fallos secundarios en los cables de fibra óptica con daño del cable pero sin pérdida de servicio
Líneas de potencia	Daños en los aisladores de las líneas aéreas de baja tensión, perforación del aislamiento de los cables de línea, fallo del aislamiento de los equipos de línea y de los transformadores, con la consiguiente pérdida de servicio
Tuberías de agua	Daños en los equipos eléctricos y electrónicos de control con posibilidad de producir pérdidas de servicio
Tuberías de gas	Perforación de las juntas en bridas no metálicas con posibilidad de producir un incendio y/o una explosión
Tuberías de combustible	Daños en los equipos eléctricos y electrónicos de control con posibilidad de producir pérdidas de servicio

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

5.2.2 Fuentes y tipos de daños en un servicio

La corriente del rayo es la fuente del daño. En relación con la situación del impacto sobre el servicio considerado deben tenerse en cuenta las siguientes situaciones.

– S1: descargas que impactan directamente sobre la estructura suministrada;

– S3: descargas que impactan directamente sobre los servicios conectados a la estructura;

– S4: descargas que impactan en las proximidades de los servicios conectados a la estructura.

Las descargas que impactan directamente sobre la estructura abastecida pueden producir:

– fusión de los conductores metálicos y de las pantallas de las líneas por la circulación de partes de la corriente del rayo en el servicio (debido a calentamiento resistivo);

– ruptura de los aislamientos de las líneas y de los equipos conectados (debido a acoplamientos resistivos);

– perforación de las juntas no metálicas situadas entre las bridas de las tuberías, así como las juntas de uniones aislantes.

NOTA 1 Los cables de fibra óptica sin conductores metálicos no son sensibles al impacto del rayo en las estructura a la que alimentan.

Las descargas que impactan directamente sobre los servicios conectados a la estructura pueden producir:

– daños mecánicos inmediatos en los cables metálicos o en las tuberías por esfuerzos electrodinámicos o por calentamientos producidos por la corriente del rayo (ruptura y/o fusión de los cables metálicos, de las pantallas o de las tuberías) y debido al calor del propio arco de plasma del rayo (perforación de la envoltura plástica de protección);

– daños eléctricos inmediatos en las líneas (ruptura del aislamiento) y en los equipos conectados;

– perforación de las tuberías aéreas de poco espesor y de las juntas no metálicas situadas entre bridas, pudiendo producirse fuego y explosión en función de la naturaleza del fluido que circule.

Las descargas que impactan en las proximidades de los servicios conectados a la estructura pueden producir:

– ruptura del aislamiento de las líneas y de los equipos conectados debido a acoplamientos inductivos (sobretensiones inducidas);

NOTA 2 Los cables de fibra óptica sin conductores metálicos no son sensibles al impacto del rayo en el suelo.

En conclusión, el rayo puede dar lugar a dos tipos fundamentales de daños:

– D2: daños físicos (fuego, explosión, destrucción mecánica, emanación química) debidos a los efectos térmicos de la corriente del rayo;

– D3: fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos debidos a las sobretensiones.

5.3 Tipos de pérdidas

Cada tipo de daño, solo o en combinación con otros, puede dar lugar a pérdidas diferentes en el objeto a proteger. El tipo de pérdidas que puede aparecer depende de las características del propio objeto.

Para el propósito de esta norma se consideran los siguientes tipos de pérdidas:

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

– L1: pérdida de vida humana;

– L2: pérdida de servicio al público;

– L3: pérdida de patrimonio cultural;

– L4: pérdida de valor económico (estructura y su contenido, servicios y pérdida de actividad).

Las pérdidas L1, L2 y L3 pueden considerarse como pérdidas de valor social, mientras que la L4 se puede considerar como pérdida puramente económica.

Las pérdidas que pueden aparecer en una estructura son las siguientes:

– L1: pérdida de vida humana;

– L2: pérdida de servicio al público;

– L3: pérdida de patrimonio cultural;

– L4: pérdida de valor económico (estructura y su contenido).

Las pérdidas que pueden aparecer en un servicio son las siguientes:

– L2: pérdida de servicio al público;

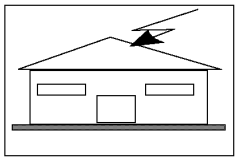
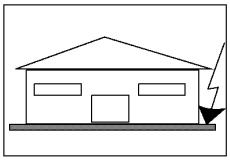
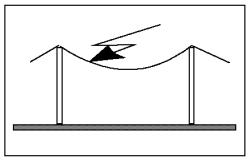
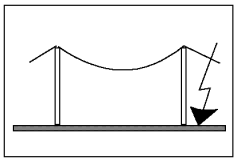
– L4: pérdida de valor económico (servicios y pérdida de actividad).

NOTA En esta norma no se considera la pérdida de vida humana en un servicio.

La relación entre las fuentes de los daños, los tipos de daños y las pérdidas se indica en la tabla 3 para las estructuras y en la tabla 4 para los servicios.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla 3 – Daños y pérdidas en una estructura en función del punto en el que impacta el rayo

Punto de impacto		Fuente del daño	Tipo de daño	Tipo de pérdida
En la estructura		S1	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Cerca de la estructura		S2	D3	L1*, L2, L4
Servicio conectado a la estructura		S3	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Cerca del servicio		S4	D3	L1*, L2, L4

* Solamente para estructuras con riesgo de explosión y para hospitales o estructuras análogas en las que el fallo de los sistemas internos pone en peligro la vida humana inmediatamente.

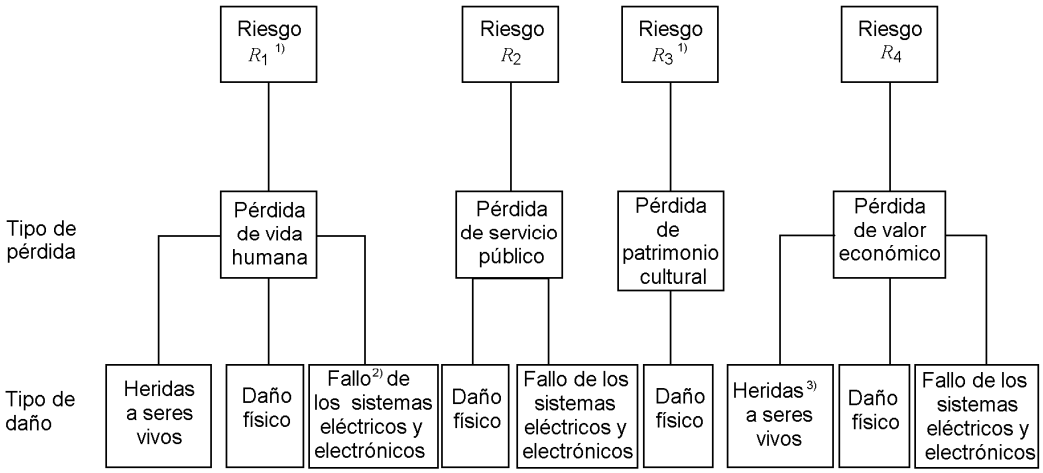
** Solamente en el caso de pérdida de animales.

Tabla 4 – Daños y pérdidas en un servicio en función del punto en el que impacta el rayo

Punto de impacto	Fuente del daño	Tipo de daño	Tipo de pérdida
En el servicio	S3	D2 D3	L2, L4
Cerca del servicio	S4	D3	
Sobre la estructura que alimenta	S1	D2 D3	

Los tipos de pérdidas en función de los tipos de daños y riesgos correspondientes se indican en la figura 1.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos



1) Solamente para las estructuras.

2) Solamente para los hospitales o estructuras análogas en las que un fallo de los sistemas internos pone en peligro la vida humana inmediatamente.

3) Solamente en el caso de pérdidas de animales.

Figura 1 – Tipos de pérdidas y riesgos asociados debidos a diferentes tipos de daños

6 NECESIDAD Y CONVENIENCIA ECONÓMICA DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO

6.1 Necesidad de la protección contra el rayo

La necesidad de la protección contra el rayo para una estructura o un servicio debe valorarse con el fin de reducir los valores sociales L1, L2 y L3.

Con el fin de determinar la necesidad o no de la protección contra el rayo debe llevarse a cabo una evaluación del riesgo, de acuerdo a la metodología indicada en la Norma IEC 62305-2. Los siguientes tipos de riesgo deben tenerse en cuenta, en función de los tipos de pérdidas definidos en el apartado 5.3:

– R_1: riesgo de pérdida de vida humana;

– R_2: riesgo de pérdida de servicio al público;

– R_3: riesgo de pérdida de patrimonio cultural.

Es necesaria la protección contra el rayo si el riesgo R (R_1 a R_3) es superior al riesgo tolerable R_T.

$$R > R_T$$

En este caso deben aplicarse medidas de protección con el fin de reducir el riesgo R (R_1 a R_3) al valor de riesgo tolerable R_T.

$$R \leq R_T$$

Si el objeto a proteger puede aparecer más de un tipo de pérdida, la condición $R \leq R_T$ debe cumplirse para cada tipo de pérdida (L1, L2 y L3).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Los valores del riesgo tolerable R_T, correspondientes a las pérdidas de valor social, son responsabilidad de los organismos nacionales competentes.

NOTA 1 Una autoridad competente puede especificar la necesidad de protección contra el rayo en aplicaciones específicas sin necesidad de tener que realizar una evaluación del riesgo. En este caso los niveles de protección serán especificados por esta autoridad. A veces, una evaluación del riesgo puede llevarse a cabo como una técnica que permite la justificación de estas exigencias.

NOTA 2 En la Norma IEC 62305-2 se da información más detallada sobre la evaluación del riesgo y cómo proceder para seleccionar las medidas de protección.

6.2 Conveniencia económica de la protección contra el rayo

Además de la valoración de la necesidad de la protección contra el rayo del objeto a proteger, puede ser útil la valoración de los beneficios económicos que producen las medidas de protección que tienen como fin reducir las pérdidas económicas L4.

En este caso conviene evaluar el riesgo R_4 de pérdidas de valor económico. La evaluación del riesgo R_4 permite el cálculo de las pérdidas económicas con y sin las medidas de protección.

La protección del rayo es eficaz si la suma del coste C_{RL} de las pérdidas residuales con medidas de protección y el coste C_{PM} de las medidas de protección es inferior al coste total C_L de las pérdidas sin medidas de protección.

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

NOTA En la Norma IEC 62305-2 se da información más detallada sobre la valoración de la conveniencia económica de la protección contra el rayo.

7 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Pueden tomarse medidas de protección para reducir el riesgo conforme al tipo de daño.

7.1 Medidas de protección para reducir los daños a personas por tensiones de paso y de contacto

Las medidas de protección posibles comprenden:

– aislamiento adecuado de las partes conductoras accesibles;

– equipotencialización por medio de un sistema de puesta a tierra mallado;

– restricciones físicas y carteles de advertencia.

NOTA 1 La equipotencialización no es eficaz contra las tensiones de contacto.

NOTA 2 El riesgo de muerte puede reducirse mediante un aumento de la resistividad de la superficie del suelo, tanto en el interior como en el exterior de la estructura (véase el capítulo 8 de la Norma IEC 62305-3).

7.2 Medidas de protección para reducir los daños físicos

Las medidas de protección posibles comprenden:

a) para las estructuras

– sistemas de protección contra el rayo (SPCR)

NOTA 1 Cuando se instala un SPCR, la equipotencialización es una medida muy importante para reducir los riesgos de fuego, explosión y muerte. Para más detalles véase la Norma IEC 62305-3.

NOTA 2 Los dispositivos que limitan el desarrollo y la propagación de un incendio tales como compartimentos estancos, extintores, hidrantes, instalaciones de detección y extinción de incendio, pueden reducir los daños físicos.

NOTA 3 Las rutas de escape protegidas aseguran la protección de las personas.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

b) para los servicios

– apantallamientos

NOTA 4 Se realiza una protección muy eficaz en los cables enterrados, mediante el uso de conductos metálicos.

7.3 Medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos

Las posibles medidas de protección comprenden:

a) para las estructuras

– sistemas de protección contra el IEMR formado por las siguientes medidas adoptadas bien solas o en combinación:

• puesta a tierra y equipotencialidad;

• pantalla magnética;

• trazado de la línea;

• "protección coordinada con dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias".

b) para los servicios

– dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias colocados en diferentes lugares a lo largo del recorrido de la línea y en la terminación de la línea;

– apantallamiento magnético de los cables.

NOTA 1 Se realiza una protección muy eficaz en los cables enterrados por medio de conductos metálicos de espesor apropiado.

NOTA 2 La redundancia de recorridos, de equipos, los grupos generadores de potencia autónomos, los sistemas de alimentación ininterrumpidos, los sistemas de almacenamiento de fluidos y los sistemas automáticos de detección de faltas son medidas eficaces para reducir la pérdida de actividad de los servicios.

NOTA 3 Una medida de protección eficaz contra los fallos debidos a las sobretensiones, consiste en aumentar la tensión soportada del aislamiento de los equipos y cables.

7.4 Elección de las medidas de protección

La elección de las medidas de protección más adecuadas debe llevarse a cabo entre el diseñador y el propietario, teniendo en cuenta el tipo y el coste de cada tipo de daño y los aspectos técnicos y económicos de las diferentes medidas de protección.

En la Norma IEC 62305-2 se dan los criterios para evaluar el riesgo y para la elección de las medidas de protección más apropiadas.

Las medidas de protección son eficaces si cumplen con los requisitos de las normas que les son aplicables y son aptas para soportar los esfuerzos esperados en el lugar de emplazamiento.

8 CRITERIOS BÁSICOS PARA LA PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS Y DE LOS SERVICIOS

Una protección ideal para las estructuras y los servicios sería envolver el objeto a proteger con una pantalla perfectamente conductora continua, de espesor conveniente puesta a tierra y realizar, en el punto de entrada de los servicios a la estructura, una conexión equipotencial adecuada a la pantalla.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

De esta manera sería posible impedir la penetración en el objeto a proteger de la corriente del rayo y del campo electromagnético asociado, evitando los peligrosos efectos térmicos y electrodinámicos de la corriente, así como las chispas y las sobretensiones peligrosas para los sistemas internos.

En la práctica frecuentemente no es posible ni fácil, a coste reducido, obtener dimensiones tales que aseguren esta protección máxima.

La discontinuidad de la pantalla y/o su inadecuado espesor permite que la corriente del rayo penetre produciendo:

– daños físicos y riesgos de muerte;

– fallos de los sistemas internos;

– fallo de los servicios y de los sistemas conectados.

Las medidas de protección adoptadas para reducir estos daños y las pérdidas consiguientes deben diseñarse en función del conjunto de parámetros de la corriente del rayo prevista para la que se requiere protección (nivel de protección contra el rayo).

8.1 Niveles de protección contra el rayo (NPR)

Para el objeto de esta norma, se consideran cuatro niveles de protección contra el rayo (I a IV). Para cada NPR se fijan un conjunto de parámetros de corriente del rayo máximos y mínimos.

NOTA 1 No es objeto de esta norma aquella protección contra el rayo en la que se sobrepasan los valores máximos y mínimos de los parámetros de la corriente del rayo que corresponde al NPR I.

NOTA 2 La probabilidad de que aparezca un rayo cuyos parámetros máximos o mínimos de corriente sobrepasen a los que corresponden al NPR I es inferior al 2%.

Para el NPR I los valores máximos de los parámetros de corriente no serán sobrepasados con una probabilidad del 99%. De acuerdo con la relación de polaridad considerada (véase el capítulo A.2) los valores tomados para las descargas positivas tendrán probabilidades inferiores al 10% mientras que los de las descargas negativas permanecerán inferiores al 1% (véase el capítulo A.3).

Los valores máximos de los parámetros de la corriente del rayo correspondiente al NPR I se reducen al 75% para el NPR II y al 50% para los NPR III y IV (lineales para I, Q y di/dt, cuadráticos para W/R). Los parámetros de tiempo no cambian.

Los valores máximos de los parámetros de la corriente del rayo para los diferentes niveles de protección contra el rayo se indican en la tabla 5 y se emplean para el diseño de los componentes de protección contra el rayo (por ejemplo, sección de los conductores, espesor de las hojas metálicas, capacidad de corriente de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias, distancias de separación contra chispas peligrosas), y para definir los parámetros de ensayo que simulen en estos componentes los efectos del rayo (véase el anexo D).

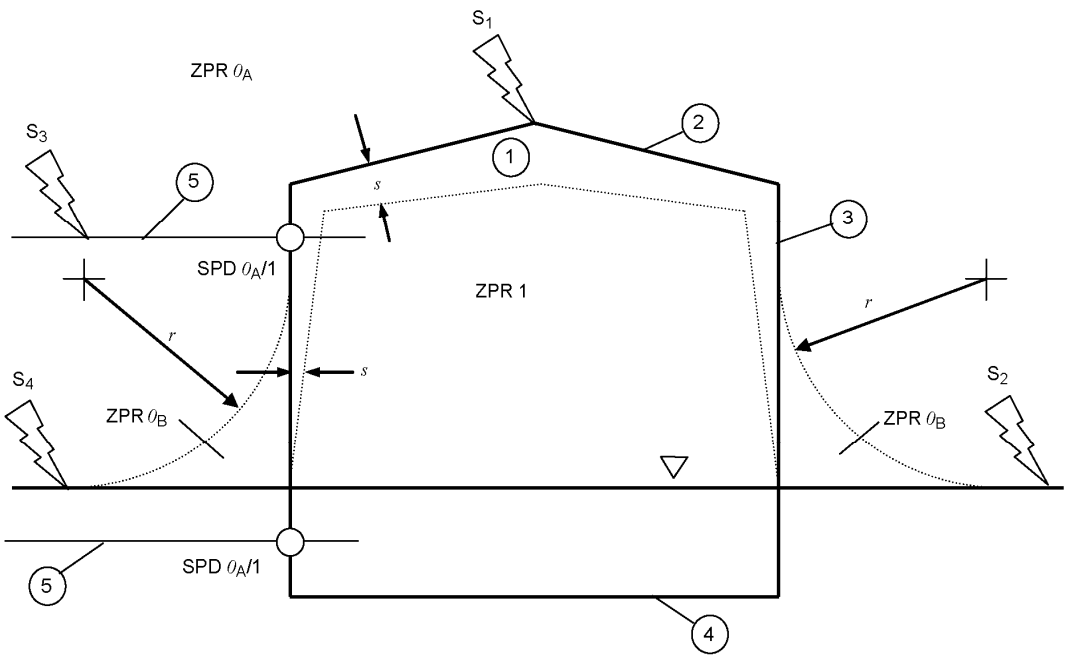
Los valores mínimos de la corriente del rayo se emplean, en los diferentes NPR, para calcular el radio de la esfera ficticia (véase el capítulo A.4) con el fin de definir la zona de protección ZPR 0_B que no pueden ser alcanzada por el rayo directamente (véase el apartado 8.2 y las figuras 2 y 3). Los valores mínimos de los parámetros de la corriente del rayo asociados al radio de la esfera ficticia están indicados en la tabla 6. Se emplean para determinar el emplazamiento de los dispositivos captadores y para definir la zona de protección ZPR 0_B (véase el apartado 8.2).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla 5 – Valores máximos de los parámetros del rayo correspondientes a los NPR

Primer impulso corto			**Niveles de protección**			
Parámetros de corriente	**Símbolo**	**Unidad**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Valor de cresta de la corriente	I	kA	200	150	100	
Carga del impulso corto	Q_{short}	C	100	75	50	
Energía específica	W/R	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Parámetros de tiempo	T_1/T_2	µs/ µs	10 / 350			
Impulso corto posterior			**Niveles de protección**			
Parámetros de corriente	**Símbolo**	**Unidad**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Valor de cresta de la corriente	I	kA	50	37,5	25	
Pendiente media	di/ dt	kA/ µs	200	150	100	
Parámetros de tiempo	T_1/T_2	µs/ µs	0,25 / 100			
Impulso largo			**Niveles de protección**			
Parámetros de corriente	**Símbolo**	**Unidad**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Carga del impulso largo	Q_{long}	C	200	150	100	
Parámetros de tiempo	T_{long}	s	0,5			
Descarga			**Niveles de protección**			
Parámetros de corriente	**Símbolo**	**Unidad**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Carga de la descarga	Q_{flash}	C	300	225	150	

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos



1 Estructura
2 Dispositivo captador
3 Conductores de bajada
4 Toma de tierra
5 Servicios entrantes

S1 Impacto sobre la estructura
S2 Impacto cerca de la estructura
S3 Impacto sobre un servicio conectado a la estructura
S4 Impacto cerca de un servicio conectado a la estructura
r radio de la esfera ficticia
s distancia de separación para evitar chispas peligrosas

▽ Nivel del suelo

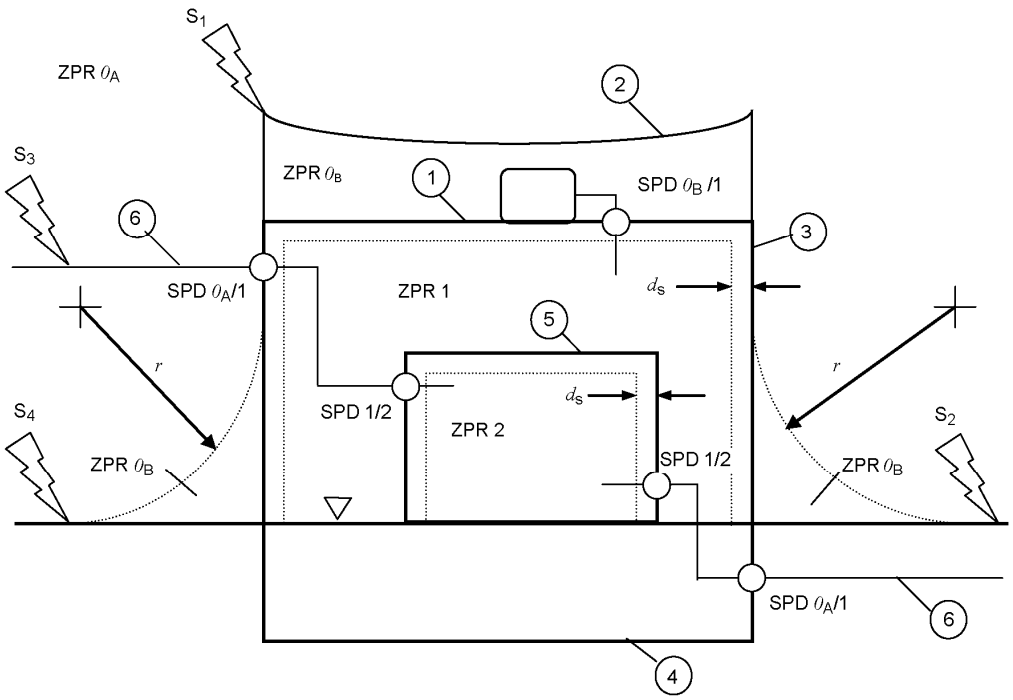
○ Conexión equipotencial por medio de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias

Descargas directas, corriente del rayo total

ZPR 0_A Descargas directas, corriente del rayo total
ZPR 0_B Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida
ZPR 1 Descargas no directas, corriente del rayo limitada o corriente inducida
El volumen protegido en el interior de ZPR 1 debe respetar la distancia de separación *s*

Figura 2 – Zonas de protección contra el rayo (ZPR) definidas para un SPCR (IEC 62305-3)

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos



1	Estructura (pantalla de ZPR 1)	S1	Impacto sobre la estructura
2	Dispositivo captador	S2	Impacto cerca de la estructura
3	Conductores de bajada	S3	Impacto sobre un servicio conectado a la estructura
4	Toma de tierra	S4	Impacto cerca de un servicio conectado a la estructura
5	Servicios entrantes (pantalla de ZPR 2)	r	radio de la esfera ficticia
6	Servicios conectados a la estructura	d_s	distancia de seguridad contra campos magnéticos muy altos

▽ Nivel del suelo

○ Conexión equipotencial por medio de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias

ZPR 0_A	Descargas directas, corriente del rayo total, campo magnético total
ZPR 0_B	Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida, campo magnético total
ZPR 1	Descargas no directas, corriente del rayo limitada o corriente inducida, campo magnético atenuado
ZPR 2	Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida
	Los volúmenes protegidos en el interior de las ZPR1 y ZPR2 deben respetar la distancia de seguridad d_s

Figura 3 – ZPR definidas para las medidas de protección contra el IEMR (IEC 62305-4)

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla 6 – Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de la esfera ficticia asociada correspondientes a los niveles de protección

Criterios de intercepción			Niveles de protección			
	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor de cresta mínimo de la corriente	*I*	kA	3	5	10	16
Radio de la esfera ficticia	*r*	m	20	30	45	60

A partir de las distribuciones estadística dadas en la figura A.5, una probabilidad ponderada puede indicar los parámetros de la corriente del rayo que son inferiores a los valores máximos y, respectivamente, superiores a los valores mínimos definidos para cada nivel de protección (véase la tabla 7).

Tabla 7 – Probabilidades de los límites de los parámetros de la corriente del rayo

Probabilidad para que los parámetros del rayo sean	Niveles de protección			
	I	II	III	IV
Inferiores a los valores máximos definidos en la tabla 5	0,99	0,98	0,97	0,97
Superiores a los valores mínimos definidos en la tabla 6	0,99	0,97	0,91	0,84

Las medidas de protección especificadas en las Normas IEC 62305-3, IEC 62305-4 e IEC 62305-5 son eficaces contra los rayos si los parámetros de la corriente del rayo están en el rango definido para el nivel de protección asumido por el diseño. Por eso es por lo que la eficacia de un nivel de protección se considera igual a la probabilidad de que los parámetros del rayo estén dentro de tal rango.

8.2 Zonas de protección contra el rayo (ZPR)

Las medidas de protección tales como SPCR, apantallamiento de cables, pantallas magnéticas, y dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias determinan las zonas de protección contra el rayo (ZPR).

Las ZPR aguas abajo de la medida de protección se caracterizan por una reducción significativa de los impulsos electromagnéticos del rayo en comparación con las ZPR situadas aguas arriba.

En relación con la amenaza de rayo, se definen las siguientes ZPR (véanse las figuras 2 y 3):

ZPR 0_A zona expuesta a las descargas directas y a los campos electromagnéticos del rayo. Los sistemas internos pueden estar sometidos a la corriente total o parcial del rayo;

ZPR 0_B zona protegida de las descargas directas pero en la que el riesgo viene de los campos electromagnéticos del rayo. Los sistemas internos pueden estar sometidos a corrientes parciales del rayo;

ZPR 1 zona en la que la onda de corriente tipo impulso está limitada por la distribución de la corriente y por los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias colocados en la frontera entre zonas. El apantallemiento espacial puede atenuar el campo electromagnético del rayo;

ZPR 2, ..., n zona en la que la onda de corriente tipo impulso puede limitarse más aún por medio de la distribución de la corriente y por la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias en la frontera entre zonas. Pueden utilizarse apantallamientos espaciales adicionales para atenuar más el campo electromagnético del rayo.

NOTA 1 En general, cuanto mayor es el número de una zona individual, menores son los parámetros electromagnéticos ambientales.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Como regla general de protección, el objeto a proteger debe estar en una ZPR en la que las características electromagnéticas sean compatibles con la capacidad del objeto para soportar los esfuerzos, dando lugar a la disminución de los daños (daños físicos, fallo de los sistemas eléctricos y electrónicos por sobretensiones).

NOTA 2 Para la mayor parte de los sistemas y aparatos eléctricos y electrónicos la información sobre el nivel de aislamiento puede suministrarla el fabricante.

8.3 Protección de las estructuras

8.3.1 Protección contra el daño físico y el peligro de muerte

La estructura a proteger debe estar en el interior de una ZPR 0_B o superior. Esto se realiza con un sistema de protección contra el rayo (SPCR).

Un SPCR está formado por un sistema de protección contra el rayo exterior y otro interior (véase la figura 2).

Las funciones del SPCR exterior son:

– interceptar una descarga directa sobre la estructura (por medio de un dispositivo captador);

– conducir la corriente de manera segura hasta tierra (por medio de conductores de bajada);

– dispersarla en tierra (con un sistema de puesta a tierra).

La función del SPCR interior es la de impedir cualquier chispa peligrosa en la estructura empleando bien conexiones equipotenciales o bien distancias de separación, *s,* (por tanto aislamiento eléctrico) entre los elementos del SPCR y otros elementos conductores eléctricamente interiores a la estructura.

Se definen cuatro tipos de SPCR (I, II, III, IV) como un conjunto de normas de construcción, en base a los correspondientes niveles de protección. Cada conjunto incluye normas de construcción dependientes (por ejemplo, radio de la esfera ficticia, ancho de la malla, etc.) e independientes del nivel (por ejemplo, secciones, materiales, etc.).

En los lugares en los que la resistividad del terreno, en el exterior, y la del suelo, en el interior de la estructura, no es suficientemente alta, el peligro de muerte debido a las tensiones de paso y de contacto puede reducirse:

– en el exterior de la estructura, por aislamiento de las partes activas conductoras por equipotencialización del suelo mediante una red de tierra mallada, por letreros y por restricciones físicas;

– en el interior de la estructura, por una conexión equipotencial de los servicios en el punto de entrada a la estructura.

Los SPCR deben cumplir con los requisitos de la Norma IEC 62305-3.

8.3.2 Protección contra los fallos de los sistemas internos

La protección contra el IEMR para reducir el riesgo de fallo de los sistemas internos debe limitar:

– las sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas en la estructura producidas por acoplamientos resistivos e inductivos;

– las sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas en las proximidades de la estructura producidas por acoplamientos capacitivos;

– las sobretensiones transmitidas por las líneas conectadas a la estructura debidas a descargas atmosféricas en o en la proximidades de la estructura;

– el acoplamiento directo del campo magnético con los sistemas internos.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

NOTA Los fallos de los aparatos por campos magnéticos radiados directamente en el interior del equipamiento son despreciables siempre y cuando los aparatos cumplan con los ensayos de emisión radiada en radiofrecuencia y de inmunidad definidos en las normas CEM de producto (véanse las Normas IEC 62305-2 e IEC 62305-4).

Los sistemas a proteger deben estar colocados en una ZPR 1 o superior. Se consigue la protección por medio de apantallamientos que atenúen el campo magnético inducido y/o mediante el trazado apropiado del cableado reduciendo los bucles de inducción. Se deben prever conexiones equipotenciales en las fronteras de la ZPR para las partes metálicas y los sistemas que crucen las fronteras. Estas conexiones se pueden llevar a cabo mediante conductores o, en caso de ser necesario, mediante dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias .

Las medidas de protección para las ZPR deben cumplir con la Norma IEC 62305-4.

Una protección eficaz contra las sobretensiones, causantes de los fallos en los sistemas internos, puede realizarse también mediante una "coordinación de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias" que limite las sobretensiones a valores inferiores de los que corresponden a la tensión soportada a los impulsos asignada del sistema a proteger.

Los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias deben elegirse e instalarse conforme a los requisitos de la Norma IEC 62305-4.

8.4 Protección de los servicios

El servicio a proteger debe estar:

- en una zona ZPR 0_B o superior para reducir los daños físicos. Esto se consigue mediante la elección de un trazado subterráneo en vez de aéreo o empleando cables de guarda adecuadamente colocados, de acuerdo con las características de las líneas o, en el caso de tuberías, aumentando el espesor de las paredes hasta un valor adecuado y asegurando su continuidad metálica;

- en una zona ZPR 1 o superior para protegerlo contra las sobretensiones causantes de los fallos del servicio. Esto se consigue reduciendo el nivel de las sobretensiones inducidas por el rayo mediante el adecuado apantallamiento magnético de los cables, distribución de la corriente y el empleo de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias limitadores de tensión.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO A (Informativo)

PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO

A.1 Descargas a tierra

Existen dos tipos básicos de descargas:

– las descargas descendentes, iniciadas por un precursor descendente desde la nube hacia tierra; y

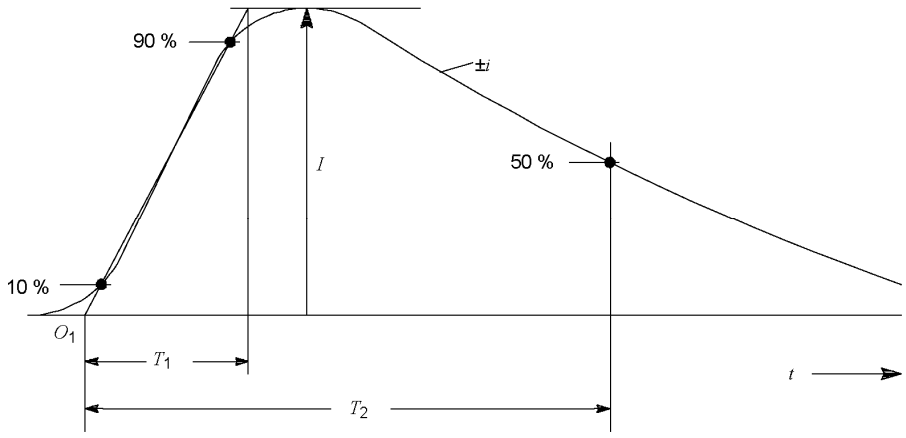
– las descargas ascendentes, iniciadas por un precursor ascendente desde una estructura en tierra hacia la nube.

Las descargas descendentes aparecen principalmente en terrenos llanos y a estructuras poco elevadas, mientras que las ascendentes son dominantes en estructuras expuestas y/o elevadas. La probabilidad de impacto directo aumenta con la altura de las estructuras (véase la Norma IEC 62305-2, anexo A) y con el cambio de las condiciones físicas.

Una corriente del rayo está formada por uno o más impactos diferentes:

– impactos cortos de duración menor a 2 ms (figura A.1);

– impactos largos de duración superior a 2 ms (figura A.2).

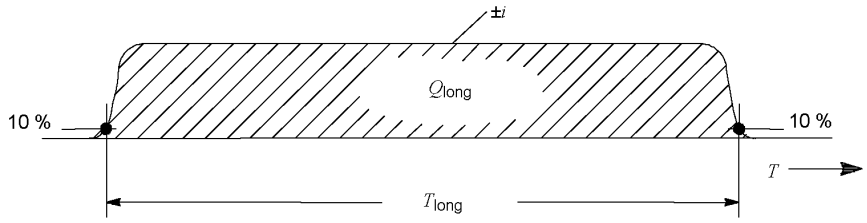


Leyenda

O_1 origen virtual
I valor de cresta de la corriente
T_1 tiempo del frente
T_2 tiempo hasta la mitad del valor

Figura A.1 – Definiciones de los parámetros de un impacto corto (normalmente T_2 < 2 ms)

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos



Leyenda

T_{long} duración
Q_{long} carga de un impacto largo

Figura A.2 – Definiciones de los parámetros de un impacto largo (normalmente 2 ms < T_{long} < 1 s)

Una diferenciación complementaria de los impactos viene dada por su polaridad (positiva o negativa) y por su situación durante la descarga (primero, subsiguiente, superpuesto). Las posibles componentes para las descargas descendentes se muestran en la figura A.3 y para las descargas ascendentes en la figura A.4.

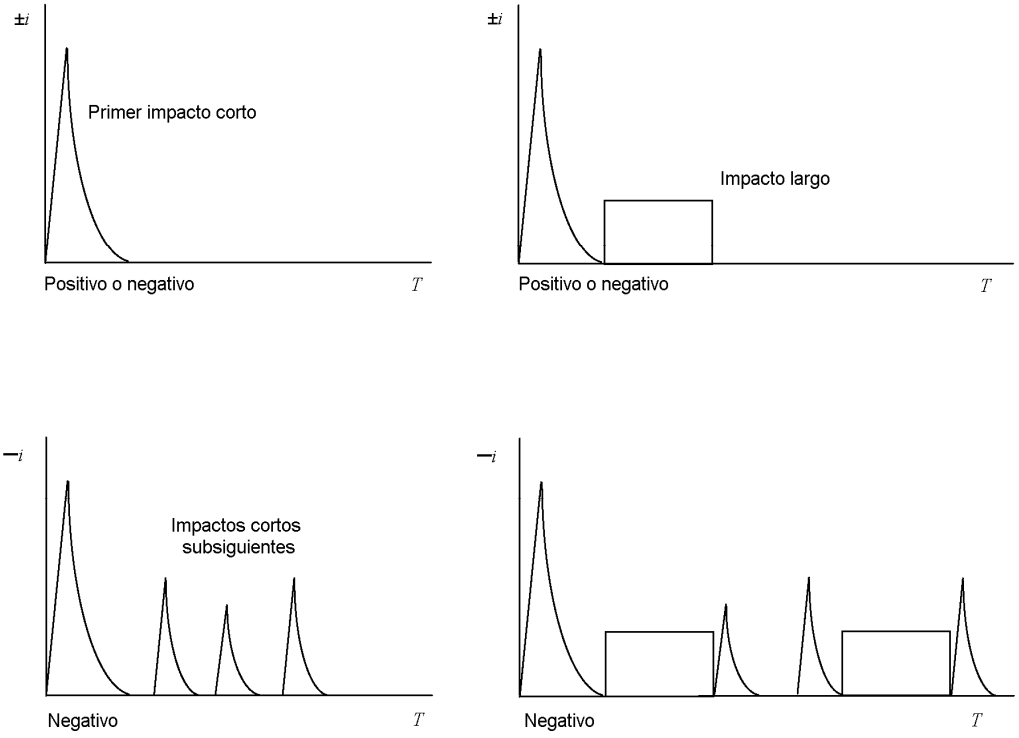


Figura A.3 – Posibles componentes de las descargas descendentes (típicas en terreno llano y en estructuras de poca altura)

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

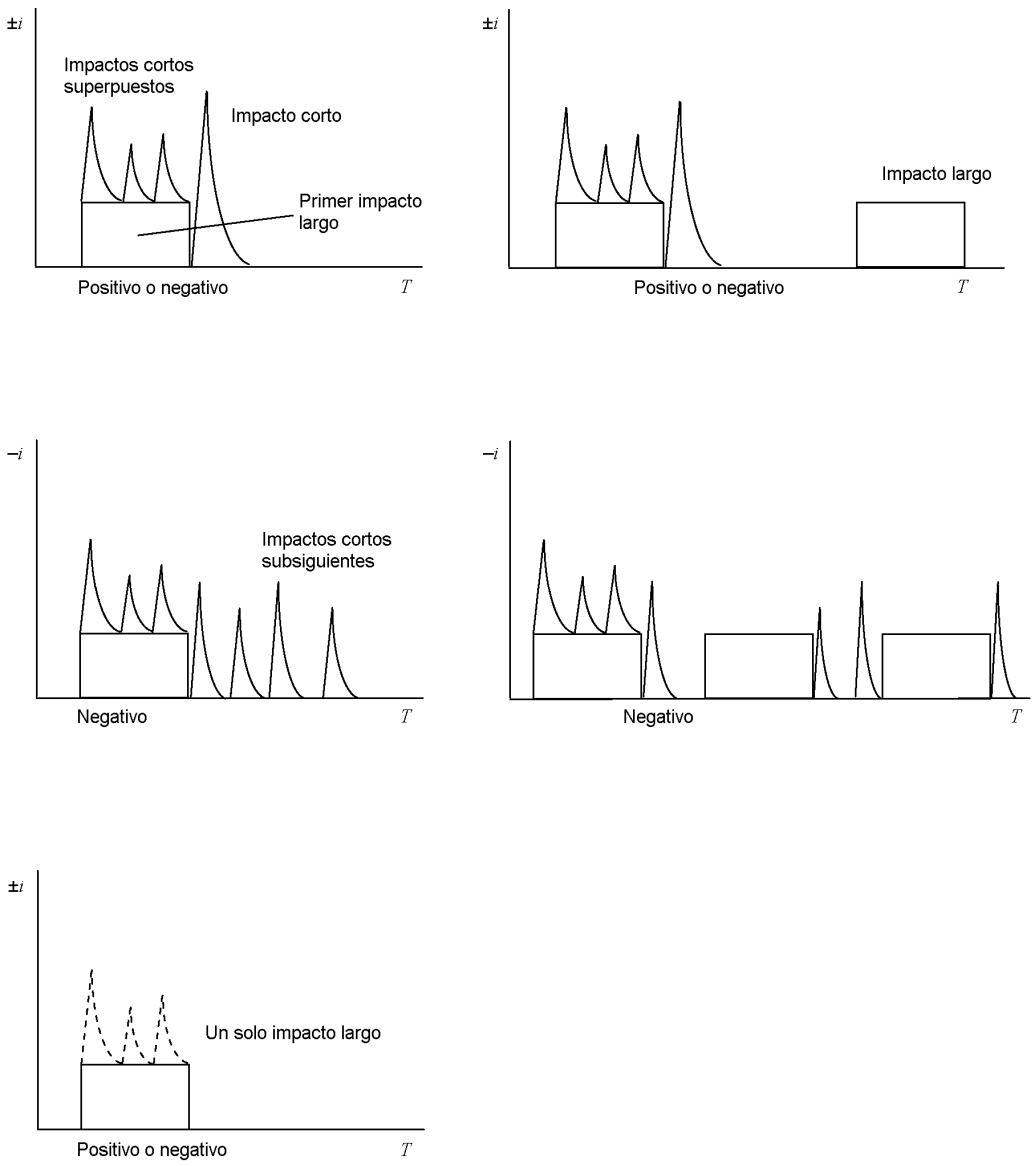


Figura A.4 – Componentes posibles de las descargas ascendentes (típicas en estructuras expuestas y/o elevadas)

El componente adicional en las descargas ascendentes es el primer impacto largo con o sin impactos cortos superpuestos (del orden de una decena). Todos los parámetros de los impactos cortos correspondientes a las descargas ascendentes son menores que los de las descargas descendentes. No se ha confirmado aún la existencia de una carga mayor en un impacto de larga duración de descargas ascendentes. Por ello, se considera que los parámetros de la corriente del rayo de las descargas ascendentes están cubiertos por los valores máximos de los de las descargas descendentes. Actualmente está en estudio una valoración más precisa de los parámetros del rayo en función de la altura, tanto para las descargas descendentes como ascendentes.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

A.2 Parámetros de la corriente del rayo

Los parámetros de la corriente del rayo, dados en la tabla A.1 de esta norma están basados en los resultados del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE). Su distribución estadística puede considerarse como una distribución logarítmica normal. El valor medio μ y la dispersión σ_{log} correspondientes figuran en la tabla A.2 y la función distribución se muestra en la figura A.5. Sobre esta base puede calcularse la probabilidad de que se produzca cualquier valor de cada parámetro.

Se considera una relación de polaridad del 10% para las descargas positivas y 90% para las descargas negativas. La relación entre polaridades depende de los territorios. Se recomienda emplear la relación anterior en el caso de no disponer de información local más precisa.

Tabla A.1 – Valores de los parámetros de la corriente del rayo según CIGRE (Electra Nº 41 o Nº 69*)[3], [4]

Parámetro	Valor fijado para el nivel I	Valores			Tipo de impacto	Línea de la figura A.5
		95%	50%	5%		
I (kA)		4(98%)	20(80%)	90	*Primer corto negativo	1A + 1B
	50	4,9	11,8	28,6	*Subsiguiente corto negativo	2
	200	4,6	35	250	Primer corto positivo (solo)	3
Q_{flash} (C)		1,3	7,5	40	Descarga negativa	4
	300	20	80	350	Descarga positiva	5
Q_{short} (C)		1,1	4,5	20	Primer corto negativo	6
		0,22	0,95	4	Subsiguiente corto negativo	7
	100	2	16	150	Primer corto positivo (solo)	8
W/R (kJ/Ω)		6	55	550	Primer corto negativo	9
		0,55	6	52	Subsiguiente corto negativo	10
	10 000	25	650	15 000	Primer corto positivo	11
$di/dt_{máx.}$ (kA/µs)		9,1	24,3	65	*Primer corto negativo	12
		9,9	39,9	161,5	*Subsiguiente corto negativo	13
	20	0,2	2,4	32	Primer corto positivo	14
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/µs)	200	4,1	20,1	98,5	*Subsiguiente corto negativo	15
Q_{long} (C)	200				Largo	
t_{long} (s)	0,5				Largo	
Duración del frente (µs)		1,8	5,5	18	Primer corto negativo	
		0,22	1,1	4,5	Subsiguiente corto negativo	
		3,5	22	200	Primer corto positivo (solo)	
Duración del impacto (µs)		30	75	200	Primer corto negativo	
		6,5	32	140	Subsiguiente corto negativo	
		25	230	2 000	Primer corto positivo (solo)	
Intervalo de tiempo (ms)		7	33	150	Impactos negativos múltiples	
Duración total de la descarga (ms)		0,15	13	1 100	Descarga negativa (todas)	
		31	180	900	Descarga negativa (sin simple)	
		14	85	500	Descarga positiva	

NOTA Los valores I = 4 kA e I = 20 kA corresponden a las probabilidades de 98% y 80% respectivamente.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla A.2 – Distribución logarítmica normal de los parámetros de la corriente del rayo – Valores medios μ y de dispersión σ_{log} calculados para el 95% y 5% según CIGRE (Electra Nº 41 o Nº 69*)[3], [4]

Parámetro	Media (μ)	Dispersión σ_{log}	Tipo de impacto	Línea de la figura A.5
I (kA)	(61,1)	0,576	*Primer corto negativo (80%)	1A
	33,3	0,263	*Primer corto negativo (80%)	1B
	11,8	0,233	*Subsiguiente corto negativo	2
	33,9	0,527	Primer corto positivo (solo)	3
Q_{flash} (C)	7,21	0,452	Descarga negativa	4
	83,7	0,378	Descarga positiva	5
Q_{short} (C)	4,69	0,383	Primer corto negativo	6
	0,938	0,383	Subsiguiente corto negativo	7
	17,3	0,570	Primer corto positivo (solo)	8
W/R (kJ/Ω)	57,4	0,596	Primer corto negativo	9
	5,35	0,600	Subsiguiente corto negativo	10
	612	0,844	Primer corto positivo	11
$di/dt_{máx.}$ (kA/µs)	24,3	0,260	*Primer corto negativo	12
	40,0	0,369	*Subsiguiente corto negativo	13
	2,53	0,670	Primer corto positivo	14
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/µs)	20,1	0,420	*Subsiguiente corto negativo	15
Q_{long} (C)	200		Largo	
t_{long} (s)	0,5		Largo	
Duración del frente (µs)	5,69	0,304	Primer corto negativo	
	0,995	0,398	Subsiguiente corto negativo	
	26,5	0,534	Primer corto positivo (solo)	
Duración del impacto (µs)	77,5	0,250	Primer corto negativo	
	30,2	0,405	Subsiguiente corto negativo	
	224	0,578	Primer corto positivo (solo)	
Intervalo de tiempo (ms)	32,4	0,405	Múltiples impactos negativos	
Duración total de la descarga (ms)	12,8	1,175	Descargas negativas (todas)	
	167	0,445	Descarga negativa (sin simple)	
	83,7	0,472	Descarga positiva	

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

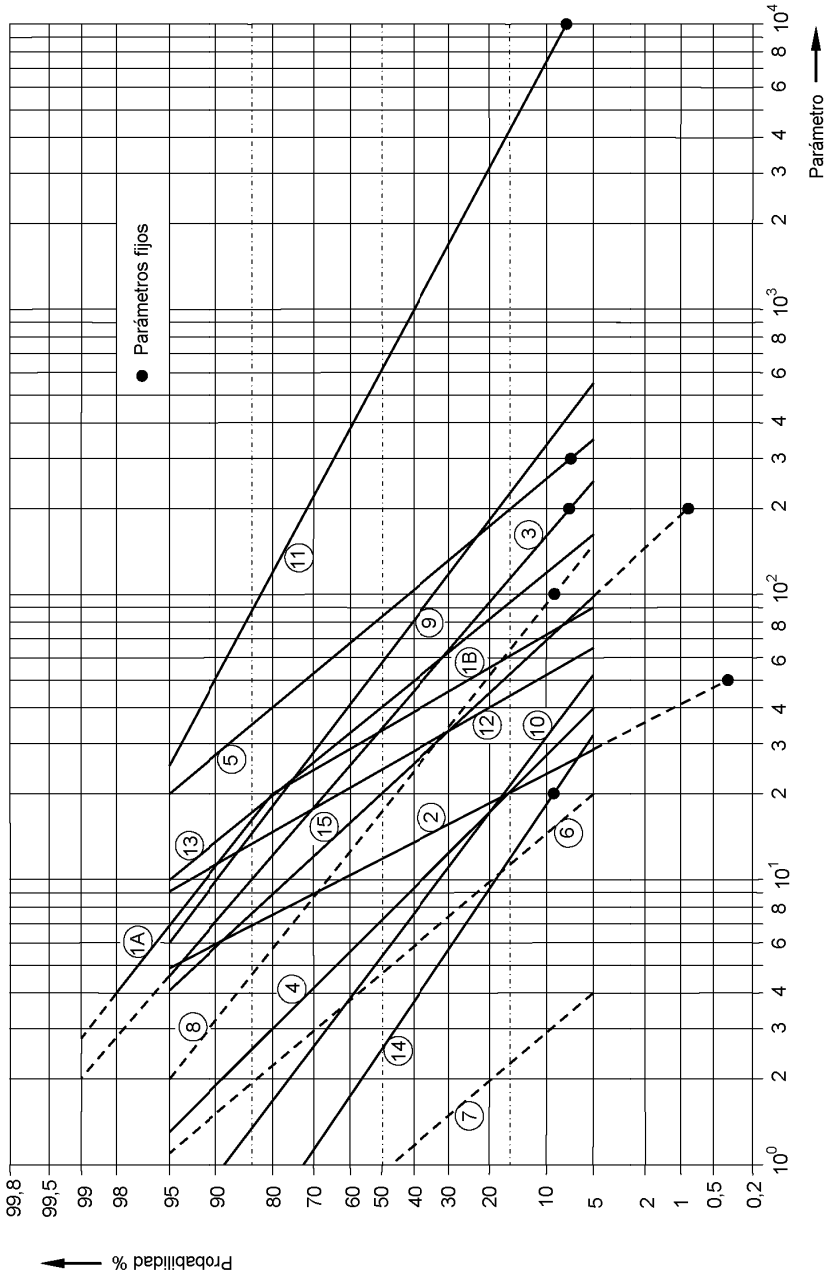


Figura A.5 – Frecuencia de distribución acumulativa de los parámetros de la corriente del rayo (valores de 95% a 5%)

NOTA Véanse las tablas A.1 y A.2 para la numeración de las curvas.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Todos los valores dados en esta norma y fijados para un nivel de protección se refieren tanto a las descargas ascendentes como a las descendentes.

NOTA Los parámetros del rayo se obtienen, normalmente, por medidas llevadas a cabo en objetos de altura. La distribución estadística de los valores de cresta de la corriente que no considera el efecto de los objetos de altura pueden obtenerse de los sistemas locales de localización de rayos.

A.3 Determinación de los valores máximos de la corriente del rayo para un NPR I

Los efectos mecánicos del rayo están relacionados con el valor de cresta de la corriente (I) y con la energía específica (W/R). Los efectos térmicos están relacionados con la energía específica (W/R) cuando tienen lugar acoplamientos resistivos y con la carga (Q) cuando se producen arcos en las instalaciones. Las sobretensiones y las chispas peligrosas, producidas por acoplamientos inductivos, están relacionadas con la pendiente media ($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$) del frente de la corriente del rayo.

Cada uno de los parámetros (I, Q, W/R, $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$) tiende a predominar en cada uno de los mecanismos de fallo. Esto debe tenerse en cuenta cuando se establezcan los procedimientos de ensayo.

A.3.1 Primer impacto corto y largo

Los valores de I, Q y W/R, relacionados con los efectos térmicos y mecánicos, se determinan a partir de las descargas positivas (ya que el 10% de sus valores son mucho más elevados que los valores correspondientes al 1% de las descargas negativas). De la figura A.5 (líneas 3, 5, 8, 11 y 14) pueden obtenerse los siguientes valores con probabilidades inferiores al 10%:

I = 200 kA

Q_{flash} = 300 C

Q_{short} = 100 C

W/R = 10 MJ/Ω

$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ = 20 kA/μs

Para un primer impacto corto, según la figura A.1, estos valores dan una primera aproximación para la duración del frente:

$T_1 = I / (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 10$ μs (T_1 presenta poco interés)

Para un impacto con amortiguación exponencial, se emplean las siguientes fórmulas para determinar de manera aproximada los valores de la carga y de la energía ($T_1 << T_2$):

$Q_{\mathrm{short}} = (1/0{,}7) \cdot I \cdot T_2$

$W/R = (1/2) \cdot (1/0{,}7) \cdot I^2 \cdot T_2$

Estas expresiones, junto con los valores indicados anteriormente, llevan a un valor aproximado de la duración hasta la mitad del valor

$T_2 = 350$ μs

Para un impacto largo, el valor aproximado de la carga puede calcularse a partir de:

$Q_{\mathrm{long}} = Q_{\mathrm{flash}} - Q_{\mathrm{short}} = 200$ C

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Su duración puede calcularse, de acuerdo con la figura A.2, a partir de la duración de la descarga:

T_{long} = 0,5 s

A.3.2 Impacto corto subsiguiente

El valor máximo de la pendiente media di/dt, relacionado con generación de chispas peligrosas producidas por acoplamientos inductivos, se determina a partir de los impactos cortos subsiguientes de las descargas negativas (ya que el 1% de los valores son muy superiores al 1% de los valores de los primeros impactos negativos o al 10% correspondiente de los valores de las descargas positivas). A partir de la figura A.5 (líneas 2 y 15) se pueden tomar los siguientes valores con probabilidades inferiores al 1%:

I = 50 kA

di/dt = 200 kA/µs

Para un impacto corto subsiguiente, de acuerdo con la figura A.1, estos valores dan una primera aproximación para el tiempo del frente de:

$T_1 = I / (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)$ = 0,25 µs

El tiempo hasta la mitad del valor puede estimarse a partir de la duración de los impactos cortos subsiguientes negativos:

T_2 = 100 µs (T_2 presenta poco interés)

A.4 Determinación de los valores mínimos de la corriente del rayo

La eficiencia de captación de un SPCR depende de los valores mínimos de la corriente del rayo y del radio de la esfera ficticia correspondiente. Mediante el método de la esfera ficticia pueden determinarse los límites geométricos de las zonas protegidas contra las descargas directas.

Siguiendo el modelo electrogeométrico, el radio de la esfera ficticia r (distancia que corresponde al salto final) está correlacionado con el valor de cresta de corriente del primer impacto corto. En el informe[5] de un grupo de trabajo de la IEEE se da la relación como

$$r = 10 \cdot I^{0,65} \qquad \text{(A.1)}$$

donde

r es el radio de la esfera ficticia (m);

I es el valor de cresta de la corriente (kA).

Puede suponerse que para un radio determinado r de la esfera ficticia, todas las descargas con valores de cresta de corriente superiores al correspondiente valor mínimo I serán interceptados por los dispositivos captadores, tanto si son naturales como si se han colocado expresamente para ese fin. Por ello, la probabilidad de los valores de cresta de los primeros impactos positivos y negativos de la figura A.5 (líneas 1A y 3) se consideran como la probabilidad de intercepción. La probabilidad total de intercepción puede calcularse (véase la tabla 7) teniendo en cuenta la relación de polaridad de las descargas positivas (10%) y de las descargas negativas (90%).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO B (Informativo)

FUNCIONES TEMPORALES DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ANÁLISIS

Las formas de ondas de la corriente:

– del primer impacto de corta duración 10/350 µs

– de los subsiguientes impactos de corta duración 0,25/100 µs

pueden definirse mediante:

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \cdot \exp(-t/\tau_2) \qquad \text{(B.1)}$$

donde

I es el valor de cresta de la corriente;

k es el factor corrector de la corriente de cresta;

t es el tiempo;

τ_1 es la constante de tiempo del frente;

τ_2 es la constante de tiempo de la cola.

Los parámetros indicados en la tabla B.1 son aplicables a las formas de onda de las corrientes del primero y subsiguientes impactos cortos para todos los niveles de protección. Las curvas analíticas están representadas en las figuras B.1 a B.4.

Tabla B.1 – Parámetros de la ecuación B.1

Parámetro	Primer impacto corto			Impacto corto subsiguiente		
	Nivel de protección			Nivel de protección		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	50	37,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,993	0,993	0,993
τ_1 (µs)	19	19	19	0,454	0,454	0,454
τ_2 (µs)	485	485	485	143	143	143

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

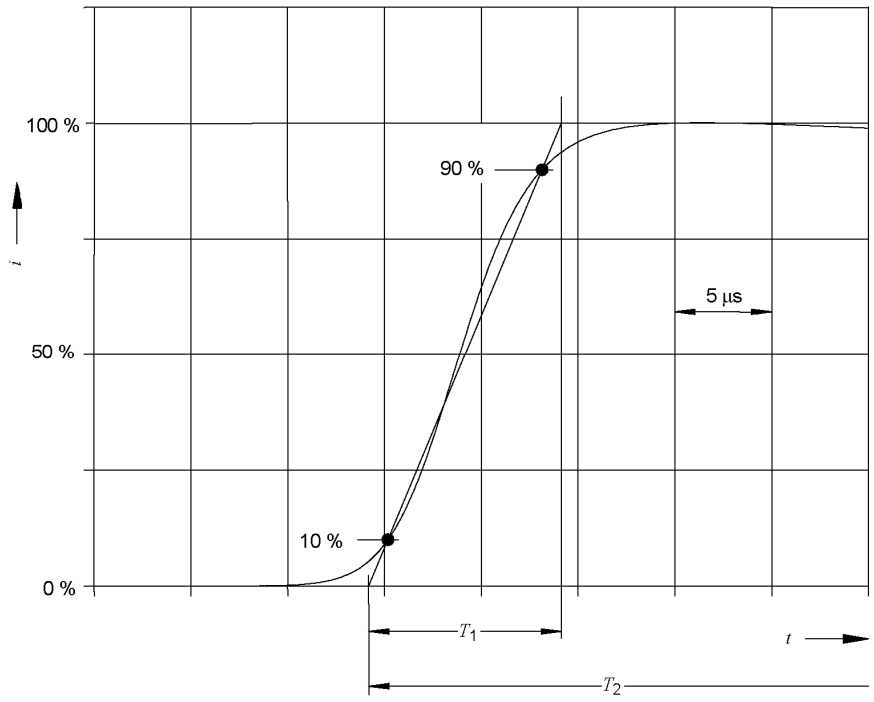


Figura B.1 – Forma de onda del frente de la corriente del primer impacto corto

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

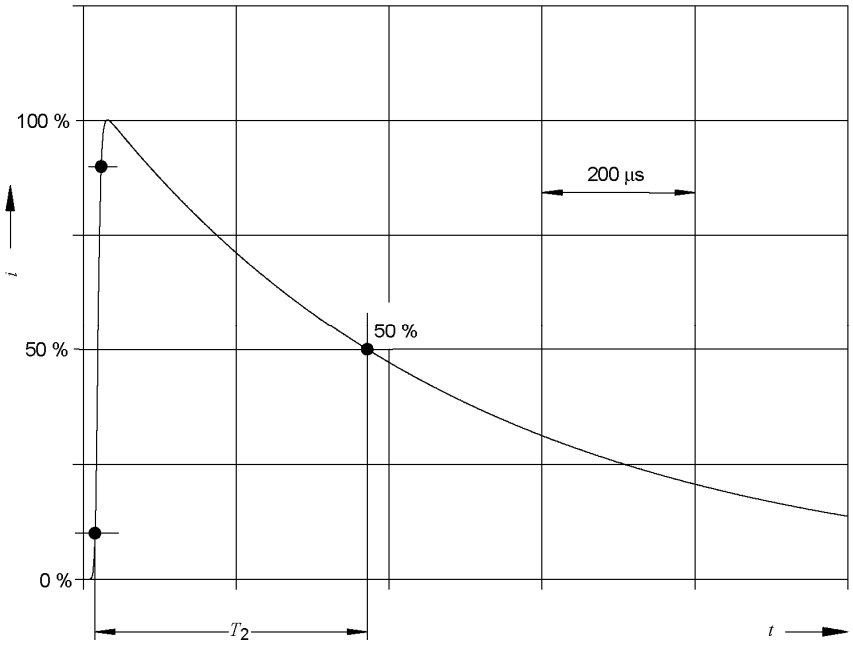


Figura B.2 – Forma de onda de la cola de la corriente del primer impacto corto

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

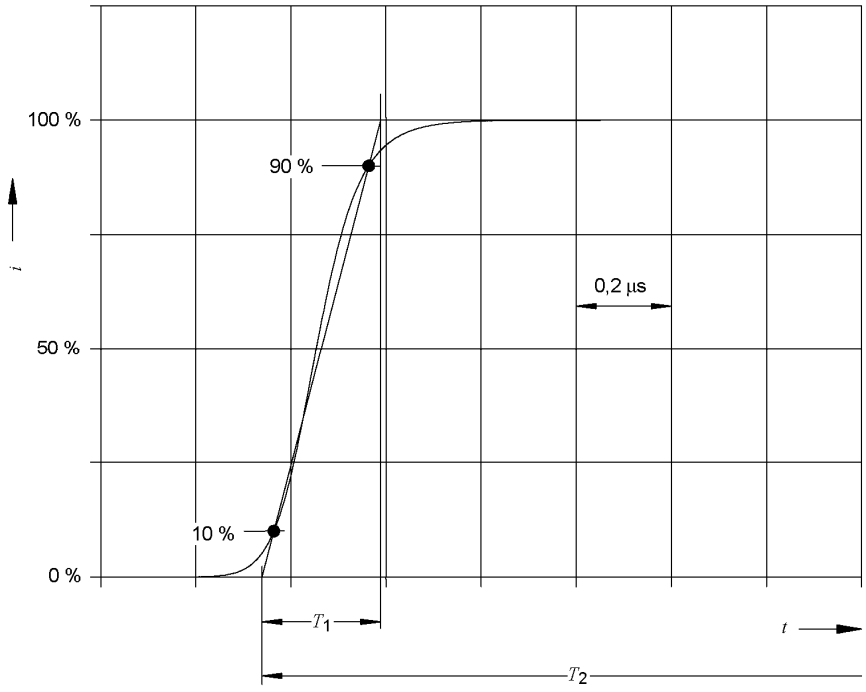


Figura B.3 – Forma de onda del frente de la corriente de los impactos cortos subsiguientes

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

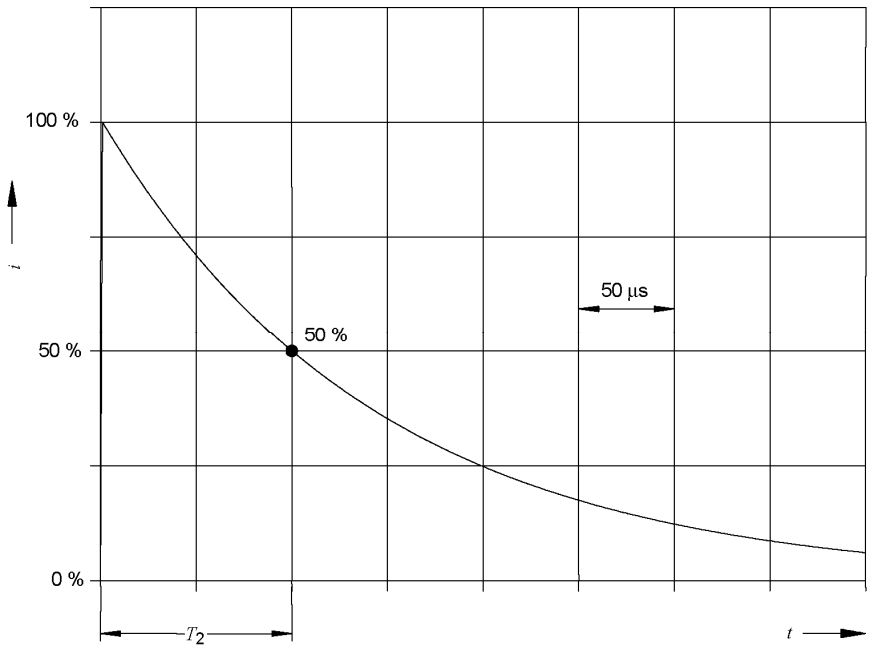
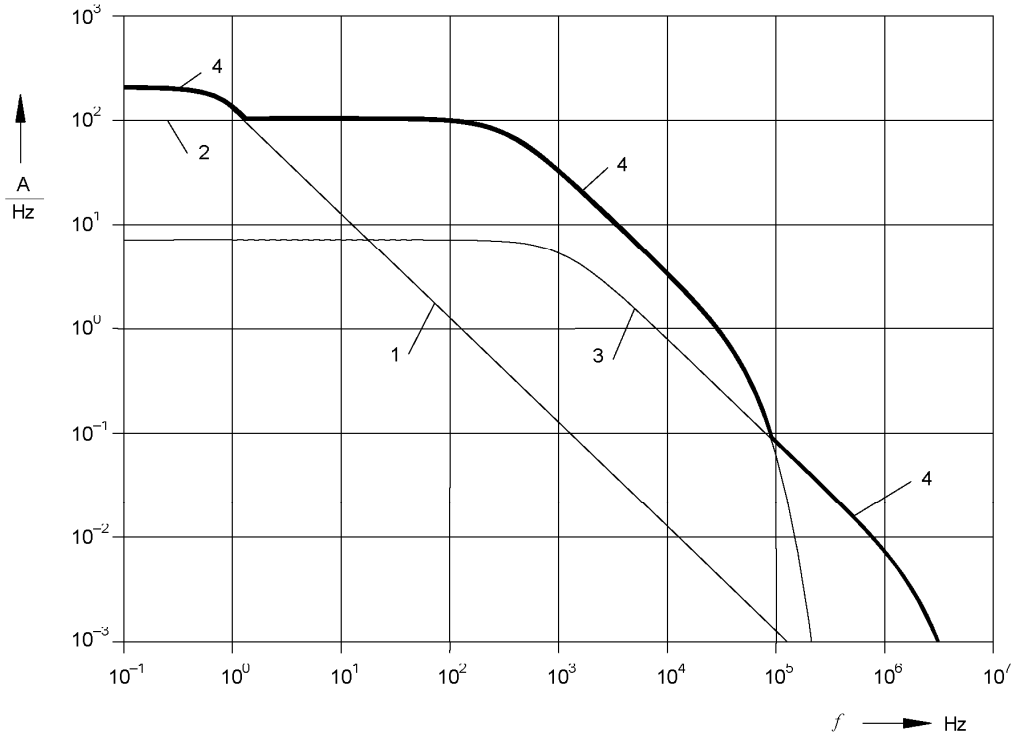


Figura B.4 – Forma de onda de la cola de la corriente de los impactos cortos subsiguientes

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

El impacto largo puede describirse mediante una onda rectangular de valor medio el de la corriente I y con una duración T_{long} de acuerdo con la tabla 5.

Los valores de la densidad de la corriente del rayo pueden deducirse a partir de las curvas analíticas (figura B.5).



1	Impacto largo	400 A	0,5 s
2	Primer impacto corto	200 kA	10/350 µs
3	Impacto corto subsiguiente	50 kA	0,25/100 µs
4	Curva envolvente		

Figura B.5 – Densidad de corriente del rayo para el nivel de protección I

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO C (Informativo)

SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ENSAYO

C.1 Generalidades

Si un rayo impacta en un objeto, la corriente del rayo se distribuye por el objeto. Este fenómeno debe tenerse en cuenta, cuando se realizan ensayos de medida de componentes de protección individuales, mediante la elección de los parámetros de ensayo adecuados para cada componente. Con este fin debe realizarse un análisis del sistema.

C.2 Simulación de la energía específica del primer impacto corto y de la carga del impacto largo

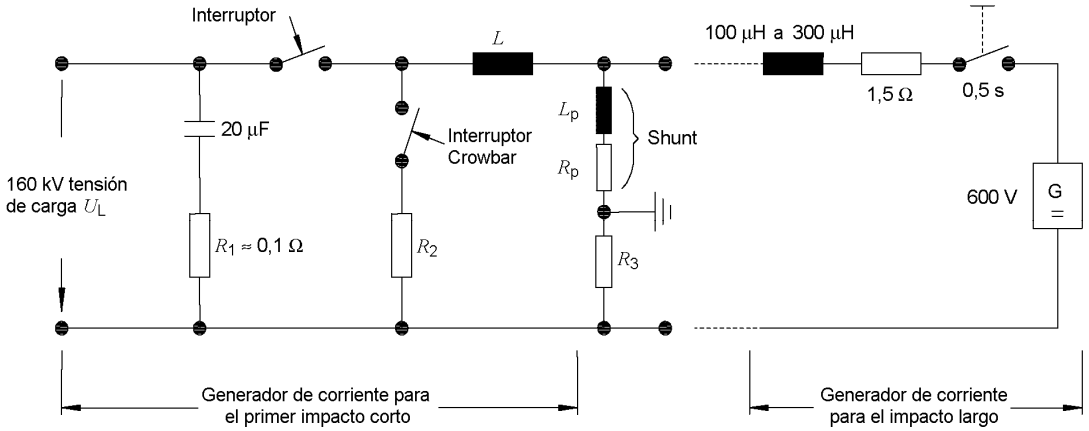
Los parámetros de ensayo están definidos en las tablas C.1 y C.2, y en la figura C.1 se muestra un ejemplo del generador de ensayo. Este generador puede emplearse para simular la energía específica del primer impacto corto combinada con la carga del impacto largo.

Los ensayos pueden utilizarse para valorar la integridad mecánica, la ausencia de calentamientos indeseables y los efectos debidos a las fusiones.

Los parámetros de ensayo relevantes para la simulación del primer impacto corto de rayo (valor de cresta de la corriente I, energía específica W/R y carga Q_s) están indicados en la tabla C.1. Estos parámetros deben obtenerse del mismo impulso. Esto puede conseguirse empleando una corriente aproximadamente exponencial decreciente con una T_2 en el rango de los 350 µs.

Los parámetros de ensayo para la simulación del impacto de larga duración (carga Q_l y duración T) están indicados en la tabla C.2.

Dependiendo del tipo de ensayo y de los mecanismos de daño previstos, los ensayos del primer impacto corto o del impacto largo pueden aplicarse de manera individual o combinada, realizándose el ensayo del impacto de larga duración inmediatamente después del de corta duración. Los ensayos de fusión por arco deben realizarse empleando ambas polaridades.



NOTA Los valores son aplicables a un nivel de protección I.

Figura C.1 – Ejemplo de un generador de ensayo para la simulación de la energía específica del primer impacto de corta duración y para la carga del impacto de larga duración

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla C.1 – Parámetros de ensayo del primer impacto de corta duración

Parámetros de ensayo		Niveles de protección			Tolerancia
		I	II	III – IV	%
Valor de cresta de la corriente I	(kA)	200	150	100	±10
Carga Q_s	(C)	100	75	50	±20
Energía específica W/R	(MJ/Ω)	10	5,6	2,5	±35

Tabla C.2 – Parámetros de ensayo del impacto de larga duración

Parámetros de ensayo		Niveles de protección			Tolerancia
		I	II	III – IV	%
Carga Q_{long}	(C)	200	150	100	±20
Duración T	(s)	0,5	0,5	0,5	±10

C.3 Simulación de la pendiente del frente de los impactos cortos

La pendiente de la corriente determina las tensiones inducidas magnéticamente en los bucles que se encuentran instalados en las proximidades de los conductores por los que circula la corriente del rayo.

La pendiente de un impacto corto se define como el aumento de corriente Δi que se produce en el intervalo de tiempo Δt (figura C.2). En la tabla C.3 se indican los parámetros de ensayo para la simulación de la pendiente. En las figuras C.3 y C.4 se dan ejemplos de generadores (que pueden emplearse para simular la pendiente del frente de una corriente del rayo asociada a un impacto directo). La simulación puede hacerse para un primer impacto directo y un impacto corto subsiguiente.

NOTA Esta simulación cubre la pendiente del frente de los impactos cortos. La cola de la corriente no tiene influencia en este tipo de simulación.

La simulación conforme al capítulo C.3 puede aplicarse independientemente o en combinación con la simulación descrita en el capítulo C.2.

Para más información referente a los parámetros del rayo que simulan los efectos del rayo sobre los componentes de un SPCR, véase el anexo D.

Tabla C.3 – Parámetros de ensayo de impactos de corta duración

Parámetros de ensayo		Niveles de protección			Tolerancia
		I	II	III - IV	%
Primer impacto corto					
Δi	(kA)	200	150	100	±10
Δt	(µs)	10	10	10	±20
Impacto corto subsiguiente					
Δi	(kA)	50	37,5	25	±10
Δt	(µs)	0,25	0,25	0,25	±20

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

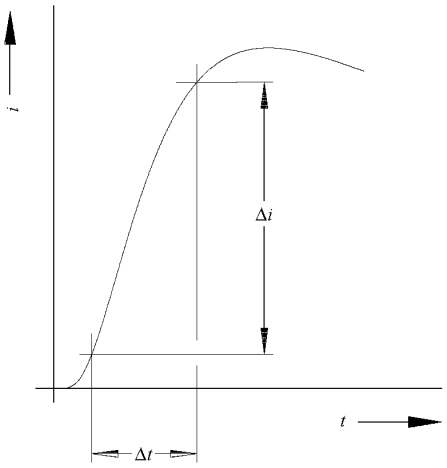
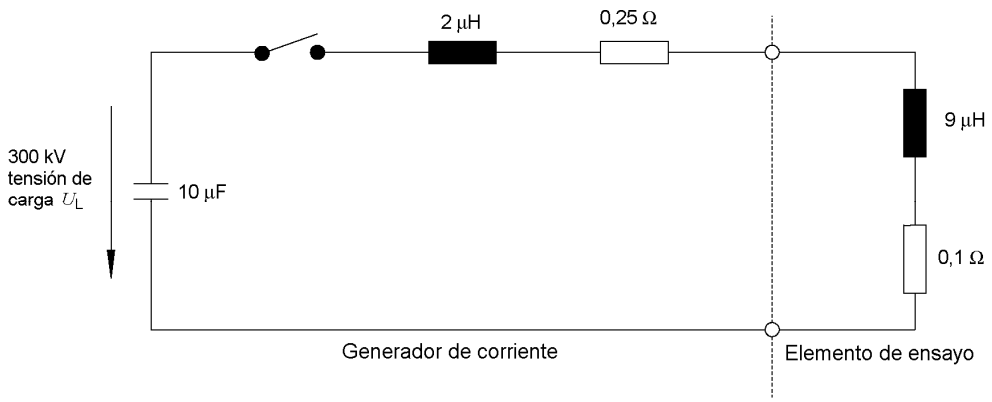


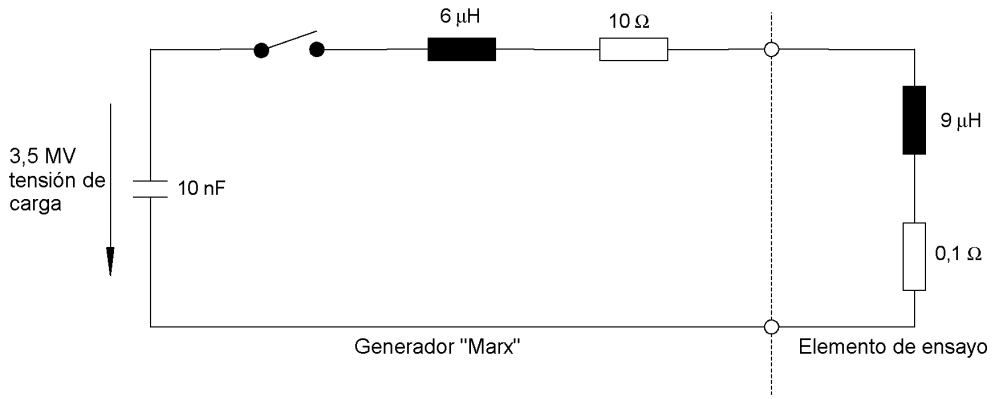
Figura C.2 – Definición de la pendiente de la corriente de acuerdo con la tabla C.3



NOTA Estos valores se aplican al nivel de protección I.

Figura C.3 – Ejemplo de generador de ensayo para la simulación de la pendiente del primer impacto corto para grandes elementos de ensayo

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos



NOTA Estos valores se aplican al nivel de protección I.

Figura C.4 – Ejemplo de generador de ensayo para la simulación de la pendiente de los impactos cortos subsiguientes para grandes elementos de ensayo

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO D (Informativo)

PARÁMETROS DE ENSAYO QUE SIMULAN LOS EFECTOS DEL RAYO EN LOS COMPONENTES DE UN SPCR

D.1 Generalidades

Este anexo contiene los parámetros básicos a emplear en los laboratorios para simular los efectos del rayo. Este anexo cubre todos los componentes de un SPCR sometido a toda o a la mayor parte de la corriente del rayo y debe emplearse junto con las normas que especifican los requisitos y los ensayos de cada componente específico.

NOTA Los parámetros relativos a los sistemas (por ejemplo, la coordinación de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias) no se consideran en este anexo.

D.2 Parámetros de la corriente relativos al punto de impacto

Los parámetros de la corriente del rayo que afectan a la integridad física de un sistema de protección contra el rayo son en general, la corriente de cresta I, la carga Q, la energía específica W/R, la duración T y la pendiente media de la corriente di/dt. Cada parámetro tiende a dominar un mecanismo diferente de fallo como se analiza en detalle a continuación. Los parámetros de corriente a tener en cuenta en los ensayos son combinaciones de estos valores, elegidos para simular en el laboratorio el mecanismo de fallo real de la parte del SPCR a ensayar. Los criterios para seleccionar los valores representativos están indicados en el capítulo D.5.

La tabla D.1 muestra, en función de los niveles de protección requeridos, los valores máximos de I, Q, W/R, T, y di/dt a tener en cuenta durante los ensayos.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Tabla D.1 – Resumen de los parámetros del rayo a considerar en el cálculo de los valores de ensayo de los diferentes componentes de los SPCR y para los diferentes niveles de protección

Componente	Aspectos principales	Parámetros del rayo					Notas
Dispositivo captador	Erosión en el punto de impacto (por ejemplo revestimientos finos)	NPR	Q_{long} C	T			
		I II III-IV	200 150 100	< 1 s (aplicar Q_{long} en un impacto solo)			
Dispositivo captador y conductores de bajada	Calentamiento óhmico	NPR	W/R kJ/Ω	T			El dimensionamiento según la Norma IEC 62305-3 hace superfluos los ensayos
		I II III-IV	10 000 5 600 2 500	Aplicar W/R en configuración adiabática			
	Efectos mecánicos	NPR	I kA	W/R kJ/Ω			
		I II III-IV	200 150 100	10 000 5 600 2 500			
Componentes de conexión	Efectos combinados (térmicos, mecánicos y arcos)	NPR	I kA	W/R kJ/Ω	T		
		I II III-IV	200 150 100	10 000 5 600 2 500	<2 s (para I y W/R en un impulso solo)		
Tomas de tierra	Erosión en el punto de impacto	NPR	Q_{long} C	T			Dimensionamiento determinado por los aspectos mecánicos y químicos (corrosión, etc.)
		I II III-IV	200 150 100	<1s (aplicar Q_{long} en un impacto solo)			
Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias con explosores	Efectos combinados (térmicos, mecánicos y arcos)	NPR	I kA	Q_{short} C	W/R kJ/Ω	di/dt kA/μs	Aplicar I, Q_{short} y W/R en un impulso solo (duración $T < 2$ ms), aplicar $\Delta i/\Delta t$ en un impulso separado
		I II III-IV	200 150 100	100 75 50	10 000 5 600 2 500	200 150 100	
Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias con varistores	Efectos energéticos (sobrecargas)	NPR	Q_{short} C				Deben verificarse ambos aspectos
		I II III-IV	100 75 50				
	Efectos dieléctricos (cebados/perforaciones)	NPR	I kA	T			Pueden considerarse ensayos por separado
		I II III-IV	200 150 100	< 2 ms (aplicar I en un impulso solo)			

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

D.3 Reparto de corriente

Los parámetros dados en la tabla D.3 son relevantes para la corriente del rayo en el punto de impacto. De hecho, la corriente circula a tierra por más de un camino, ya que en un sistema externo de protección contra el rayo normalmente hay diferentes conductores de bajada y conductores naturales. Además, en la estructura protegida normalmente entran diferentes tipos de servicios (tuberías de gas y de agua, líneas de telecomunicación y potencia, etc.). Para determinar los parámetros de la corriente real que circula por los componentes de un SPCR debe tenerse en cuenta el reparto de la corriente. Preferentemente debería evaluarse la amplitud y la forma de onda de la corriente a través de un componente colocado en un sitio específico. Cuando no es posible llevar a cabo una estimación individual, los parámetros de la corriente pueden valorarse por los siguientes métodos.

Para la evaluación del reparto de la corriente en la instalación exterior de protección puede adoptarse el factor de configuración k_c (véase el anexo C de la Norma IEC 62305-3). Este factor da una estimación del reparto de la corriente que circula por los conductores de bajada en las condiciones más desfavorables.

Para la evaluación del reparto de corriente en presencia de elementos conductores externos y de líneas de potencia y telecomunicación conectadas a la estructura protegida, pueden adoptarse los valores aproximados de k_e y k'_e dados en el anexo E.

La aproximación anteriormente descrita es aplicable a la evaluación del valor de cresta de la corriente que fluye a tierra por un camino particular. El cálculo de los otros parámetros de la corriente se realiza de la siguiente manera:

$$I_p = kI \tag{D.1}$$

$$Q_p = kQ \tag{D.2}$$

$$(W/R)_p = k^2(W/R) \tag{D.3}$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_p = k\left(\frac{di}{dt}\right) \tag{D.4}$$

donde

x_p es el valor de la cantidad considerada [corriente de cresta I_p, carga Q_p, energía específica $(W/R)_p$, pendiente de la corriente $(di/dt)_p$] aplicable a un camino particular a tierra "p";

x es el valor de la cantidad considerada [corriente I, carga Q, energía específica (W/R), pendiente de la corriente (di/dt)] aplicable a la corriente total del rayo;

k es el factor de reparto de corriente:

- k_c es el factor de reparto de corriente para un sistema de protección exterior (véase el anexo C de la Norma IEC 62305-3);
- k_e, k'_e son los factores de reparto de la corriente en presencia de elementos conductores externos y de líneas de potencia y telecomunicación que entran en la estructura protegida (véase el anexo E).

D.4 Efectos de la corriente del rayo que dan lugar a posibles daños

D.4.1 Efectos térmicos

Los efectos térmicos asociados a la corriente del rayo son relevantes para un calentamiento resistivo debido a la circulación de la corriente eléctrica a través de la resistencia de un conductor o de un sistema de protección. También son importantes los efectos térmicos para el calor generado por los arcos eléctricos producidos en el punto de impacto y en todas las partes aisladas del SPCR implicadas en el desarrollo del arco (por ejemplo explosores).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

D.4.1.1 Calentamiento resistivo

Un calentamiento resistivo tiene lugar en cualquier componente de un SPCR por el que circule una parte significativa de la corriente del rayo. La sección mínima de los conductores debe ser suficiente para que no se produzca un sobrecalentamiento de los conductores hasta un nivel que represente un riesgo de incendio en los alrededores. Además de los aspectos técnicos considerados en el apartado D.4.1, la resistencia mecánica y el criterio de durabilidad deben tenerse en cuenta para las partes expuestas a las condiciones atmosféricas y/o a la corrosión. La evaluación del calentamiento de un conductor por el paso de la corriente es necesaria en algunas ocasiones, como cuando pueden producirse riesgos de daños para las personas, de incendio o de explosión.

A continuación se da la guía para evaluar el calentamiento de los conductores debido al paso de la corriente del rayo.

Se presenta a continuación una aproximación analítica:

La potencia instantánea disipada como calor en un conductor debido al paso de la corriente eléctrica viene dada por:

$$P(\mathrm{t}) = i^2 R \tag{D.5}$$

La energía térmica generada por el impulso completo del rayo en el componente del sistema de protección considerado, es igual a la resistencia óhmica del canal del rayo, multiplicada por la energía específica del impulso. Esta energía se expresa en Julios (J) o en vatios/segundo (W·s).

$$W = R \cdot \int i^2 \cdot \mathrm{d}t \tag{D.6}$$

Las fases de alta energía específica de las descargas atmosféricas tienen una duración tan corta que no producen un calentamiento significativo de la estructura. El fenómeno se considera, por tanto, como adiabático.

La temperatura de los conductores de un SPCR puede evaluarse mediante:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha}\left[\exp\frac{\frac{W}{R}\cdot\alpha\cdot\rho_0}{q^2\cdot\gamma\cdot C_\mathrm{w}} - 1\right] \tag{D.7}$$

donde

$\theta - \theta_0$ es el calentamiento de los conductores (K);

α es el coeficiente de temperatura de la resistencia (1/K);

W/R es la energía específica del impulso de corriente (J/Ω);

ρ_0 es la resistencia óhmica específica del conductor a temperatura ambiente (Ωm);

q es la sección del conductor (m^2);

γ es la densidad del material (kg/m^3);

C_w es la capacidad térmica (J/kgK);

θ_s es la temperatura de fusión (ºC).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Los valores característicos de los parámetros físicos de la ecuación (D.7), para los diferentes materiales empleados en un SPCR están indicados en la tabla D.2. La tabla D.3 indica, como ejemplo de aplicación de esta ecuación, el calentamiento de conductores de diferentes materiales en función de la *W/R* y de la sección del conductor.

Un impacto típico de rayo se caracteriza por un impacto de corta duración (tiempo hasta la mitad del orden de algunos 100 μs) y un valor de cresta de corriente elevada. En estas condiciones debería tenerse en cuenta el efecto pelicular. Sin embargo, en la mayoría de los casos prácticos en los que intervienen componentes del SPCR, las características de los materiales (permeabilidad magnética de los conductores del SPCR) y las configuraciones geométricas (sección de los conductores del SPCR) reducen la contribución del efecto pelicular al calentamiento de los conductores a niveles despreciables.

El componente más relevante de la descarga en el proceso de calentamiento es el primer impacto de retorno.

Tabla D.2 – Características físicas de materiales típicos empleados en los componentes de un SPCR

Característica	Material			
	Aluminio	Acero dulce	Cobre	Acero inoxidable*
ρ_0 (Ωm)	$29\ 10^{-9}$	$120\ 10^{-9}$	$17{,}8\ 10^{-9}$	$0{,}7\ 10^{-6}$
α (1/K)	$4{,}0\ 10^{-3}$	$6{,}5\ 10^{-3}$	$3{,}92\ 10^{-3}$	$0{,}8\ 10^{-3}$
γ (kg/m^3)	2 700	7 700	8 920	810^3
θ_s (ºC)	658	1 530	1 080	1 500
C_s (J/kg)	$397\ 10^3$	$272\ 10^3$	$209\ 10^3$	–
C_w (J/kgK)	908	469	385	500
* Austenítico no magnético.				

Tabla D.3 – Calentamiento de conductores de diferentes secciones en función de *W/R*

Sección (mm^2)	Material											
	Aluminio			Acero dulce			Cobre			Acero inoxidable*		
	W/R (MJ/Ω)			*W/R* (MJ/Ω)			*W/R* (MJ/Ω)			*W/R* (MJ/Ω)		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	564	–	–	–	–	–	169	542	–	–	–	–
16	146	454	–	1 120	–	–	56	143	309	–	–	–
25	52	132	283	211	913	–	22	51	98	940	–	–
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190
* Austenítico no magnético.												

D.4.1.2 Daño térmico en el punto de impacto

El daño térmico en el punto de impacto puede observarse en todos los componentes de un SPCR en los que puede desarrollarse un arco, por ejemplo, dispositivos captadores, explosores, etc.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

En el punto de impacto puede producirse fusión y erosión de los materiales. De hecho, en la zona donde se genera el arco se produce una cantidad de calor importante, así como un calentamiento óhmico fuerte debido a las altas densidades de corriente. La mayor parte de la energía térmica se genera en la superficie o en las proximidades de la superficie del metal. Al exceder el calor generado en la zona próxima al punto en el que se produce el arco al calor que puede absorber el metal por conducción, el exceso de calor se pierde bien por radiación, bien por fusión o por evaporación del metal. La severidad del proceso está relacionada con la amplitud de la corriente y con su duración.

D.4.1.2.1 Generalidades

Para el cálculo de los efectos térmicos en la superficie de los metales en el punto de impacto del canal del rayo se han desarrollado numerosos modelos teóricos. Esta norma, por razones de simplicidad, no tratará nada más que del modelo de caída de tensión ánodo-cátodo. La aplicación de este modelo es particularmente efectiva para espesores metálicos pequeños. En todos los casos proporciona resultados conservadores al suponer que toda la energía inyectada en el punto de impacto se emplea en fundir o volatilizar el material conductor despreciando la difusión del calor en el metal. Otros modelos introducen la dependencia del daño en el punto de impacto con la duración del impulso de corriente.

D.4.1.2.2 Modelo de caída de tensión ánodo-cátodo

La energía que entra W en el punto donde se genera el arco se supone igual a la caída de tensión ánodo/cátodo $u_{a,c}$, multiplicada por la carga Q de la corriente del rayo:

$$W = \int u_{a,c}\ i dt = u_{a,c} \int i dt = u_{a,c} \cdot Q \tag{D.8}$$

Como $u_{a,c}$, en el rango de corriente que aquí se considera, es prácticamente constante, la principal responsable de la conversión de la energía en el punto donde se genera el arco es la carga (Q) de la corriente del rayo.

El valor de la caída de tensión ánodo/cátodo $u_{a,c}$ es del orden de algunas decenas de voltios.

Considerando en primera aproximación que toda la energía desarrollada en el punto donde se genera el arco se emplea en la fusión del material, se puede calcular la cantidad de material fundido mediante la ecuación D.9.

$$V = \frac{u_{a,c}\, Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{C_w (\theta_s - \theta_u) + c_s} \tag{D.9}$$

donde

V es el volumen del metal fundido (m^3);

$u_{a,c}$ es la caída de tensión ánodo/cátodo (considerada constante) (V);

Q es la carga de la corriente del rayo (C);

γ es la densidad del material (kg/m^3);

C_w es la capacidad térmica (J/kgK);

θ_s es la temperatura de fusión (ºC);

θ_u es la temperatura ambiente (ºC);

c_s es el calor específico de fusión (J/kg);

Los valores característicos de los parámetros físicos de esta ecuación para los diferentes materiales empleados en un SPCR están indicados en la tabla D.2.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Básicamente, la carga considerada es la suma de la carga del impacto de retorno y la de la corriente continua del rayo. Numerosos ensayos en laboratorios indican que los efectos de la carga del impacto de retorno son de menor importancia que los debidos a la carga de la corriente continua.

D.4.2 Efectos mecánicos

Los efectos mecánicos producidos por la corriente del rayo dependen de la amplitud y de la duración de la corriente, así como de las características elásticas de la estructura mecánica afectada. Los efectos mecánicos también dependen de los esfuerzos de rozamiento que hay entre las diferentes partes en contacto de un SPCR.

D.4.2.1 Interacción magnética

Las fuerzas magnéticas se producen entre dos conductores recorridos por corrientes eléctricas o cuando, en el caso de solo un conductor, éste forma un bucle o una esquina.

Cuando una corriente circula por un circuito, la amplitud de las fuerzas electrodinámicas producidas en los diferentes puntos del circuito depende de la amplitud de la corriente del rayo y de la configuración geométrica del circuito. El efecto mecánico de estas fuerzas depende no solamente de su amplitud, sino también de la forma general de la corriente, de su duración, y de la configuración geométrica de la instalación.

D.4.2.1.1 Fuerzas electrodinámicas

Las fuerzas electrodinámicas producidas por una corriente, i, que circula por un conductor formado por dos ramas largas en paralelo de longitud l y separadas por una distancia d (bucle largo y estrecho), como muestra la figura D.1, pueden calcularse de manera aproximada mediante la ecuación:

$$F(t) = \frac{\mu_o}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} i^2(t) \frac{l}{d} \qquad \text{(D.10)}$$

donde

$F(t)$ es la fuerza electrodinámica (N);

i es la corriente (A);

μ_o es la permeabilidad magnética del espacio libre (vacío) ($4\pi 10^{-7}$ H/m);

l es la longitud de los conductores (m);

d es la distancia entre las ramas en paralelo del conductor (m).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

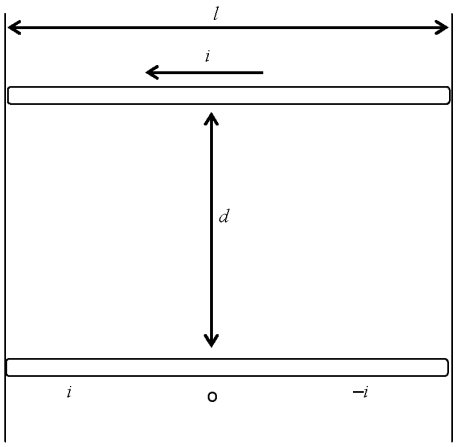


Figura D.1 – Disposición general de dos conductores para el cálculo de las fuerzas electrodinámicas

Un ejemplo típico en un SPCR es el dado por la disposición en esquina simétrica de los conductores formando un ángulo de 90º con una fijación en las proximidades del ángulo, como se indica en la figura D.2. El diagrama de esfuerzos para esta configuración se indica en la figura D.3. La fuerza axial sobre el conductor horizontal tiende a sacar el conductor de su fijación. Para un valor de cresta de la corriente de 100 kA y una longitud vertical del conductor de 0,5 m, el valor de la fuerza a lo largo de un conductor horizontal está indicado en la figura D.4.

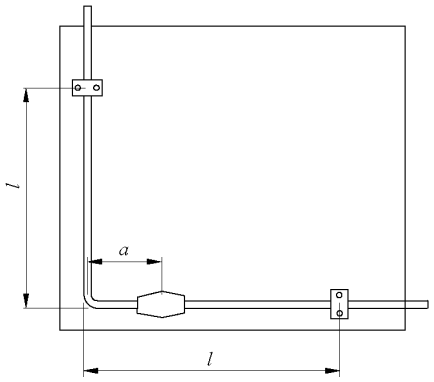


Figura D.2 – Disposición típica de los conductores de un SPCR

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

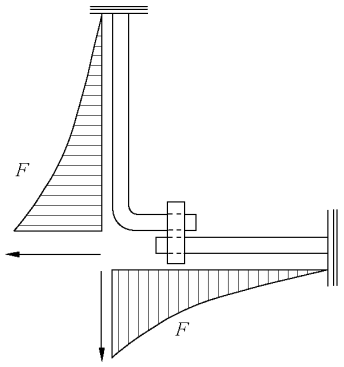
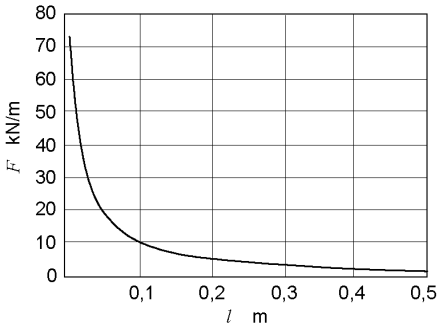


Figura D.3 – Diagrama de esfuerzos para la configuración de la figura D.2



NOTA Valor de cresta de la corriente 100 kA y longitud del conductor vertical 0,5 m.

Figura D.4 – Fuerza por unidad de longitud a lo largo del conductor horizontal de la figura D.2

D.4.2.1.2 Efectos de las fuerzas electrodinámicas

En términos de amplitud de la fuerza aplicada, el valor instantáneo de la fuerza electrodinámica $F(t)$ es proporcional al cuadrado de la corriente instantánea $I(t)^2$. En términos de esfuerzos desarrollados en la estructura mecánica del SPCR, expresados como el producto de la deformación elástica $\delta(t)$ por la constante elástica k de la estructura del SPCR, deberían considerarse dos efectos. Los parámetros más importantes son la frecuencia mecánica natural (relacionada con el comportamiento elástico de la estructura del SPCR) y la deformación permanente de la estructura del SPCR (relacionada con su comportamiento plástico). Además, en muchos casos, el efecto de las fuerzas de rozamiento en la estructura tienen también una importancia significativa.

La amplitud de las vibraciones de la estructura elástica del SPCR debidas a las fuerzas electrodinámicas desarrolladas por la corriente del rayo pueden calcularse mediante ecuaciones diferenciales de segundo orden; el factor esencial es la relación entre la duración del impulso de corriente y el período de la oscilación mecánica natural de la estructura. La condición típica encontrada para los SPCR es un período natural de oscilación de la estructura mucho mayor que el de la fuerza aplicada (duración del impulso de corriente aplicado). En este caso, aparece el esfuerzo mecánico máximo después del cese del impulso de corriente y presenta un valor de cresta inferior a la fuerza aplicada. En la mayoría de los casos puede despreciarse el esfuerzo mecánico máximo.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Las deformaciones plásticas aparecen cuando el esfuerzo de tensión es superior al límite elástico del material. Si los materiales que forman el SPCR son blandos, por ejemplo aluminio o cobre templado, las fuerzas electrodinámicas pueden deformar los conductores en las esquinas y en los bucles. Los componentes del SPCR deberían diseñarse de manera tal que puedan soportar estas fuerzas mostrando, básicamente, un comportamiento elástico.

El esfuerzo mecánico total aplicado a la estructura del SPCR depende de la integral en el tiempo de la fuerza aplicada, por tanto de la energía específica asociada al impulso de corriente. También depende de la forma de onda del impulso de corriente y de su duración (comparado con el período natural de oscilación de la estructura), por lo que todos estos parámetros deben tenerse en cuenta durante los ensayos.

D.4.2.2 Daños debidos a la onda de choque acústica

Cuando una corriente del rayo circula en un arco se produce una onda de choque. La severidad del choque depende del valor de cresta y de la pendiente de la corriente.

En general, los daños sobre las partes metálicas del SPCR debidos a la onda acústica de choque son insignificantes, aunque pueden causar daños en los elementos que le rodean.

D.4.2.3 Efectos combinados

En la práctica, los efectos térmicos y mecánicos aparecen simultáneamente. Si el calentamiento de los materiales de los componentes (barras, fijaciones, etc.) es suficiente para ablandar los materiales, pueden aparecer daños más importantes que los sólo debidos a esfuerzos mecánicos. En caso extremo, el conductor podría fundir de manera explosiva y producir daños importantes en la estructura que le rodea. Si la sección del material es suficiente para soportar de manera segura estos fenómenos, sólo debe comprobarse la integridad mecánica.

D.4.3 Chispas

De manera general, las chispas sólo son importantes en un ambiente inflamable. En la mayor parte de los casos prácticos las chispas no lo son para los componentes de un SPCR.

Pueden aparecer dos tipos de chispas, es decir, la chispa térmica y la chispa eléctrica por tensión. La chispa térmica ocurre cuando una alta corriente atraviesa una junta entre dos materiales conductores. La mayor parte de las chispas térmicas ocurren en los bordes interiores de la junta si la presión entre los lados de la junta es demasiado baja; debido, fundamentalmente, a la alta densidad de corriente y a la inadecuada presión entre los lados de la junta. La intensidad de la chispa térmica depende de la energía específica y, por tanto, está relacionada con la fase más crítica del rayo, el primer impacto de retorno. Las chispas eléctricas ocurren cuando el circuito eléctrico presenta bucles, por ejemplo, en el caso de una junta se puede producir la chispa si la tensión inducida en el bucle que forma el circuito es superior a la rigidez dieléctrica existente entre las partes metálicas de las bridas. La tensión inducida es proporcional a la autoinducción propia multiplicada por la pendiente de la corriente del rayo. El componente de la corriente del rayo más crítico para la chispa eléctrica es, por tanto, el subsiguiente impacto negativo.

D.5 Componentes de los SPCR, problemas relevantes y parámetros de ensayo

Los sistemas de protección contra el rayo están constituidos por diferentes elementos, teniendo cada uno una misión específica en el conjunto. La naturaleza de los elementos y los esfuerzos específicos a que están sometidos, requieren consideraciones especiales cuando se llevan a cabo ensayos para verificar su comportamiento.

D.5.1 Dispositivo captador

Los efectos de los esfuerzos debidos al rayo sobre los dispositivos captadores son tanto efectos mecánicos como térmicos (como se indica a continuación en el apartado D.5.2, considerando que un alto porcentaje de la corriente del rayo circula por el dispositivo captador impactado) y también, en algunos casos, efectos debidos a la erosión, en particular en los componentes naturales del SPCR como pueden ser los techos metálicos de pequeño espesor (aparición de perforaciones y de elevaciones importantes de la temperatura) y los conductores suspendidos.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Para los efectos de la erosión producidos por los arcos deberían considerarse dos parámetros de ensayo esenciales: la carga de la corriente de larga duración y su duración.

La carga determina la energía producida en el punto donde se produce el arco. En particular, los impactos de larga duración son los más severos para estos efectos, mientras que los impactos de corta duración pueden despreciarse.

La duración de la corriente juega un papel importante en el fenómeno de transferencia de calor en el interior del material. La duración de la corriente aplicada en el ensayo debe ser comparable con la de los impactos de larga duración (0,5 s a 1 s).

D.5.2 Conductores de bajada

Los efectos de los esfuerzos debidos al rayo sobre los conductores de bajada pueden clasificarse en dos grandes categorías:

– efectos térmicos por calentamiento resistivo;

– efectos mecánicos por interacciones magnéticas en los casos en los que la corriente del rayo se reparte entre conductores próximos o cuando la corriente cambia de dirección (curvas o conexiones entre conductores que forman ángulo entre sí).

En la mayor parte de los casos, estos dos efectos actúan independientemente uno del otro pudiéndose realizar ensayos por separado al objeto de verificar cada uno de estos efectos. Esta aproximación puede adoptarse en el caso en que el calor desarrollado por el paso de la corriente del rayo no modifique substancialmente las características mecánicas.

D.5.2.1 Calentamiento resistivo

Cálculos y medidas del calentamiento de los conductores de diferentes secciones y materiales debido al paso de la corriente del rayo a lo largo de los conductores han sido publicados por muchos autores. Los resultados más importantes, en forma de gráficos y fórmulas, están indicados en el apartado D.4.1.1. Por tanto, para verificar el comportamiento del conductor frente al calentamiento, en general, no es necesario ningún tipo de ensayo.

En todos los casos en los que se requiera un ensayo de laboratorio se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones.

Los principales parámetros de ensayo a tener en cuenta son la energía específica y la duración del impulso de corriente.

La energía específica determina el calentamiento por efecto Joule debido al paso de la corriente del rayo. Los valores numéricos a tener en cuenta son los que corresponden al primer impacto. Si se consideran los impactos positivos se obtienen valores conservadores.

La duración del impulso de corriente tiene una influencia decisiva en el proceso de transferencia de calor en relación con las condiciones medioambientales que rodean al conductor. En la mayor parte de los casos, la duración del impulso de corriente es tan corta que puede considerarse el proceso de calentamiento como adiabático.

D.5.2.2 Efectos mecánicos

Como se indicó en el apartado D.4.2.1 las interacciones mecánicas se desarrollan entre conductores que transportan corriente del rayo. La fuerza es directamente proporcional al producto de las corrientes que circulan por los conductores (o al cuadrado de la corriente en el caso que se considere un solo conductor curvado) e inversamente proporcional a la distancia entre los conductores.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

La situación típica en la que puede presentarse un efecto visible es en la que el conductor forma un bucle o una curva. Cuando una corriente del rayo circula por el conductor, está sometido a una fuerza mecánica que tiende a aumentar el bucle y a hacer la curvatura del cable menor. La magnitud de esta fuerza es proporcional al cuadrado de la amplitud de la corriente. Sin embargo, debería hacerse una clara distinción entre la fuerza electrodinámica, que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la corriente, y el esfuerzo correspondiente que depende de la característica elástica de la estructura del SPCR. Para estructuras de SPCR de frecuencias naturales relativamente bajas, el esfuerzo desarrollado en el SPCR será considerablemente más pequeño que la fuerza electrodinámica. En este caso, no son necesarios ensayos de laboratorio para comprobar el comportamiento mecánico de un conductor curvado en ángulo recto siempre y cuando se cumpla con los requisitos para las secciones de esta norma.

En todos los casos en que sea necesario un ensayo (especialmente en materiales blandos), se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones. Deben considerarse tres parámetros del primer impacto de retorno: la duración, la energía específica del impulso de corriente y, en el caso de sistemas rígidos, la amplitud de la corriente.

La duración del impulso de corriente, en relación con el período de la oscilación natural mecánica de la estructura del SPCR, determina la respuesta mecánica del sistema en términos de desplazamientos.

– Si la duración del impulso es mucho menor que el período de la oscilación natural mecánica de la estructura del SPCR (situación normal en estructuras de SPCR sometidas a esfuerzos por los impulsos del rayo), la masa y la elasticidad del sistema le impiden desplazarse de manera apreciable y el esfuerzo mecánico está relacionado esencialmente con la energía específica del impulso de corriente. El valor de cresta del impulso de corriente tiene un efecto limitado.

– Si la duración del impulso es comparable o mayor que el período de la oscilación natural mecánica de la estructura, el desplazamiento del sistema es más sensible a la forma de onda del esfuerzo aplicado. En este caso, el valor de cresta del impulso de corriente y su energía específica necesitan ser reproducidos durante el ensayo.

La energía específica del impulso de corriente determina el esfuerzo que produce las deformaciones elásticas y plásticas de la estructura del SPCR. Los valores numéricos a tener en cuenta son los relativos al primer impacto.

Los valores máximos del impulso de corriente determinan, en el caso de sistemas rígidos con frecuencias de oscilaciones naturales altas, el valor del desplazamiento máximo de la estructura del SPCR. Los valores numéricos a tener en cuenta son los relativos al primer impacto.

D.5.3 Componentes de conexión

Los componentes de conexión entre conductores adyacentes en un SPCR son posibles puntos débiles, tanto desde el punto de vista mecánico como térmico, cuando se producen esfuerzos grandes.

En el caso de que un conector esté colocado de manera tal que el conductor forme un ángulo recto, los efectos principales de los esfuerzos son debidos a las fuerzas mecánicas que tienden a enderezar el conductor y a las fuerzas de rozamiento entre el componente de conexión y el conductor. Es posible el desarrollo de arcos en los puntos de contacto de las diferentes partes. Además, el calentamiento producido por la concentración de corriente en las superficies pequeñas de contacto no es despreciable.

Los ensayos de laboratorio han demostrado que es difícil separar los efectos cuando se produce una sinergia compleja. Las fusiones locales en la zona de contacto afectan al esfuerzo mecánico. El desplazamiento relativo entre las partes de los componentes de conexión da lugar al desarrollo de arcos y a la consiguiente generación intensa de calor.

En ausencia de un modelo aplicable, los ensayos de laboratorio deberían hacerse de modo que representen, de la manera más ajustada posible, los parámetros del rayo en las situaciones más críticas, es decir, los parámetros de la corriente del rayo deben aplicarse por medio de un único ensayo eléctrico.

En este caso, deben tenerse en cuenta tres parámetros: el valor de cresta de la corriente, la energía específica y la duración del impulso de corriente.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

Los valores máximos del impulso de corriente determinan la fuerza máxima, o cuando la fuerza de tracción electrodinámica sobrepasa la fuerza de rozamiento, el máximo desplazamiento de la estructura del SPCR. Los valores numéricos a considerar son los relativos al primer impacto. Considerando impactos positivos se obtienen datos conservadores.

La energía específica del impulso de corriente determina el calentamiento de las superficies de contacto en aquellas zonas en las que la corriente se concentra en pequeñas superficies. Los valores numéricos a considerar son los relativos al primer impacto. Considerando impactos positivos se obtienen datos conservadores.

La duración del impulso de corriente determina el máximo desplazamiento de la estructura cuando las fuerzas de rozamiento se sobrepasan y tiene un papel importante en el fenómeno de transferencia de calor en el material.

D.5.4 Toma de tierra

El verdadero problema de las tomas de tierra está relacionado con la corrosión química y con los daños mecánicos producidos por otras fuerzas distintas que las fuerzas electrodinámicas. En la práctica, la erosión de los electrodos por arco es de menor importancia. Debe considerarse que al contrario que el dispositivo captador, un SPCR tiene varios terminales de tierra. Por tanto, la corriente del rayo se distribuirá entre los diferentes electrodos, haciendo menos importantes los efectos del arco.

En este caso deben considerarse dos parámetros importantes: la carga y la duración del impulso de corriente de larga duración.

La carga determina la energía producida en el punto de generación del arco. En particular, la contribución del primer impacto puede despreciarse ya que los impactos de larga duración son los más severos para este componente.

La duración del impulso de corriente juega un papel importante en el fenómeno de transferencia de calor en el material. La duración de los impulsos de corriente aplicados en los ensayos debe ser comparable con la de los impactos de larga duración (0,5 s a 1 s).

D.6 Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias

Los efectos de los esfuerzos del rayo en los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias dependen del tipo de pararrayo, con especial referencia a la presencia o no de explosores.

D.6.1 Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias con explosores

Los esfuerzos ejercidos por el rayo sobre los explosores pueden clasificarse en dos grandes categorías:

– erosión de los electrodos de los electrodos de los explosores por calentamiento, fusión o evaporación del material;

– esfuerzos mecánicos debidos a la onda de choque de la descarga.

Es muy difícil investigar separadamente estos efectos porque ambos están relacionados con los principales parámetros de la corriente del rayo por medio de funciones complejas.

Para los explosores, los ensayos en los laboratorios deben realizarse de manera tal que representen de la manera más ajustada posible los parámetros del rayo en las situaciones más críticas, es decir los parámetros de la corriente del rayo deben aplicarse por medio de un único ensayo eléctrico.

En este caso deben considerarse cinco parámetros: el valor de cresta de la corriente, la carga, la duración, la energía específica y la pendiente del impulso de corriente.

El valor de cresta de la corriente determina la severidad de la onda de choque. Los valores numéricos a considerar son los correspondientes al primer impacto. Considerando impactos positivos se obtienen datos conservadores.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

La carga determina la energía producida en el punto de generación del arco. Esta energía calienta, funde y posiblemente evapora parte del material del electrodo en el punto de contacto con el arco. Los valores numéricos a considerar son los relativos a la descarga completa. Sin embargo, en muchos casos y en función de la configuración del sistema de alimentación (TN, TT o IT) puede despreciarse la carga de la corriente de larga duración.

La duración del impulso de corriente determina el fenómeno de transferencia de calor en la masa del electrodo y en consecuencia la propagación del frente de fusión.

La energía específica del impulso de corriente determina la compresión automagnética del arco y la física del chorro de plasma del electrodo desarrollado en la interfase entre la superficie del electrodo y el arco (que puede vaporizar una parte importante del material fundido). Los valores numéricos a considerar son los relativos al primer impacto. Considerando impactos positivos se obtienen datos conservadores.

NOTA Para los explosores empleados en los sistemas de potencia, la frecuencia de la corriente siguiente al cebado constituye un importante factor que debe tomarse en consideración.

D.6.2 Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias con varistores de óxido metálico

Los esfuerzos producidos por el rayo en los varistores de óxidos metálicos pueden dividirse en dos categorías principales: las sobrecargas y los cebados. Cada categoría se caracteriza por su modo de fallo, producido por fenómenos diferentes y debido a diferentes parámetros. El fallo de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias de óxidos metálicos está unido a su característica más débil, por lo que es improbable que se produzca una sinergia entre los diferentes esfuerzos fatales. Parece, por tanto, aceptable realizar ensayos por separado para comprobar el comportamiento para cada condición de fallo.

Las sobrecargas se deben a que el dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias ha absorbido una cantidad de energía superior a su capacidad. Este exceso de energía está relacionado con la propia acción del rayo. Sin embargo, en los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias instalados en los sistemas de alimentación se considera que la corriente, inyectada por el sistema de alimentación, que circula una vez desaparecida la acción del rayo puede jugar un papel importante en la destrucción de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias. Finalmente, un dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias puede dañarse definitivamente, al estar sometido a tensión, por inestabilidad térmica, inestabilidad que está relacionada con el coeficiente negativo de temperatura de la característica voltios/amperios de las resistencias. Para la simulación de la sobrecarga en los varistores de óxidos metálicos, el principal parámetro a considerar es la carga.

La carga determina la energía producida en el bloque del varistor, considerando como constante la tensión residual del varistor. Los valores numéricos a tener en cuenta son los relativos a la descarga total.

Los cebados y las perforaciones se producen por la amplitud de los impulsos de corriente que exceden la capacidad de las resistencias. El modo de fallo se pone en evidencia, generalmente, por un cebado externo a lo largo del collar, penetrando, en algunas ocasiones, en el bloque de las resistencias produciendo una grieta o un orificio perpendicular al collar. Los fallos están relacionados principalmente con el fallo dieléctrico del collar del bloque de resistencias.

Para la simulación de este fenómeno debido al rayo, se consideran fundamentalmente dos parámetros: el valor de cresta de la corriente y la duración del impulso de corriente.

El valor máximo de la corriente de impulso determina, para el nivel de tensión residual correspondiente, si se sobrepasa la rigidez dieléctrica del collar de las resistencias. Los valores numéricos a considerar son los de primer impacto. Se obtienen valores conservadores si se consideran impactos positivos.

La duración de la corriente de impulso determina el tiempo de aplicación del esfuerzo dieléctrico en el collar de las resistencias.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

D.7 Resumen de los parámetros de ensayo a adoptar en los ensayos de los componentes de un SPCR

La tabla D.1 resume los aspectos más críticos de cada componente de un SPCR en su funcionamiento e indica los parámetros de la corriente del rayo que deben reproducirse en los ensayos de laboratorio.

Los valores numéricos indicados en la tabla D.1 son los correspondientes a los parámetros relevantes en el punto de impacto de la corriente del rayo.

Los valores de ensayo se calculan considerando el reparto de corriente tenido en cuenta mediante el factor de distribución de corriente, como se indicó en el capítulo D.3.

Los valores numéricos de los parámetros a emplear en los ensayos pueden calcularse en base a los datos de la tabla D.1, aplicando los factores de reducción debido al reparto de corriente, tal como se indica en las fórmulas del capítulo D.3.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO E (Informativo)

ONDAS TIPO IMPULSO PRODUCIDAS POR EL RAYO EN DIFERENTES PUNTOS DE LA INSTALACIÓN

Introducción

Para dimensionar los conductores, los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias y los materiales, debe conocerse la amenaza que representan las ondas tipo impulso en punto determinados de la instalación. Las ondas tipo impulso pueden originarse por las corrientes del rayo (parcial) o por inducciones en los bucles existentes en la instalación. La amenaza de estas ondas tipo impulso debe ser inferior a la capacidad de los componentes para soportar los impulsos del rayo (definida mediante los ensayos pertinentes, en caso de ser necesarios).

E.1 Ondas tipo impulso debidas a descargas en la estructura (fuente de daño S1)

E.1.1 Ondas tipo impulso a través de las partes conductoras externas y de las líneas conectadas a la estructura

Cuando la corriente del rayo se conduce a tierra, se divide entre la instalación de puesta a tierra, y las partes conductoras externas y las líneas, bien directamente o bien a través de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias conectados.

Si $$I_f = k_e I \quad \text{(E.1)}$$

es la parte de la corriente del rayo que circula por cada parte conductora o línea exterior, en ese caso el coeficiente k_e depende:

- del número de caminos paralelos;
- de la impedancia convencional de puesta a tierra para las partes enterradas, o de la resistencia de puesta a tierra donde los elementos aéreos exteriores se conectan a tierra;
- de la impedancia convencional de tierra del sistema de puesta a tierra.

  - para las instalaciones enterradas $$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z(n_1 + n_2 \frac{Z_1}{Z_2})} \quad \text{(E.2)}$$

  - para las instalaciones exteriores $$k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z(n_2 + n_1 \frac{Z_2}{Z_1})} \quad \text{(E.3)}$$

donde

Z es la impedancia convencional de tierra del sistema de puesta a tierra;

Z_1 es la impedancia convencional de puesta a tierra de los elementos conductores externos o líneas subterráneas (tabla E.1);

Z_2 es la resistencia de tierra de las instalaciones que conectan la línea aérea a tierra. Si el valor de la resistencia de puesta a tierra no se conoce, pueden emplearse, en función de la resistividad del terreno, los valores de Z_1 indicados en la tabla E.1.

NOTA En la fórmula anterior se considera que este valor es el mismo en cada punto de conexión a tierra. Si ese no es el caso, deben emplearse ecuaciones más complejas.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

n_1 es el número total de elementos conductores externos o de líneas exteriores enterradas;

n_2 es el número total de elementos conductores externos o de líneas exteriores aéreas;

I es la corriente del rayo que corresponde al nivel de protección seleccionado.

Suponiendo en primera aproximación que la mitad de la corriente del rayo circula por los terminales de puesta a tierra y que $Z_2 = Z_1$, el valor de k_e puede evaluarse para un elemento conductor externo mediante la expresión:

$$k_e = 0{,}5 / (n_1 + n_2) \quad \text{(E.4)}$$

Si las líneas que entran (por ejemplo, líneas eléctricas y de telecomunicación) no están apantalladas o no están instaladas en conductos metálicos, cada uno de los n' conductores de la línea transporta una parte igual de la corriente del rayo

$$k'_e = k_e / n' \quad \text{(E.5)}$$

siendo n' el número total de conductores

Para redes apantalladas conectadas a la entrada, los valores de k'_e para cada uno de los n' conductores de un servicio apantallado vienen dados por:

$$k'_e = k_e \cdot R_s / (n' \cdot R_s + R_c) \quad \text{(E.6)}$$

donde

R_s es la resistencia óhmica por unidad de longitud de la pantalla;

R_c es la resistencia óhmica por unidad de longitud del conductor interior;

NOTA Esta fórmula puede subestimar el papel de la pantalla en el reparto de la corriente del rayo debido a la inductancia mutua entre la pantalla y el conductor interior.

Tabla E.1 – Valores convencionales de las impedancias de puesta a tierra Z y Z_1 en función de la resistividad del terreno

ρ Ωm	Z_1 Ω	Valores convencionales de las impedancias de puesta a tierra para las diferentes clases de SPCR Z Ω		
		I	II	III – IV
≤ 100	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1 000	22	10	15	20
2 000	28	10	15	40
3 000	35	10	15	60

NOTA Los valores indicados en la tabla corresponden a la impedancia convencional de tierra de un conductor enterrado sometido a las condiciones de un impulso normalizado (10/350 µs).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

E.1.2 Factores que intervienen en el reparto de corriente en las líneas de potencia

En los cálculos detallados de las ondas tipo impulso, numerosos factores pueden modificar la forma de onda y la amplitud de estas ondas.

- la longitud del cable puede influir en el reparto de la corriente y en las características de la forma de onda, debido a la relación L/R;

- la diferentes valores de las impedancias de los conductores de fase y del neutro pueden influir en el reparto de la corriente entre los conductores de línea;

  NOTA Por ejemplo, si el conductor del neutro (N) está puesto a tierra en diferentes puntos, la impedancia de este conductor N, más baja en relación con las de las fases L_1, L_2 y L_3, puede dar lugar a que el 50% de la corriente circule por el conductor neutro N y el otro 50% se reparta entre los tres conductores de fase (17%). Si N, L_1, L_2 y L_3 tienen la misma impedancia, cada conductor transportará, aproximadamente, el 25% de la corriente.

- las diferentes impedancias de los transformadores pueden influir en el reparto de la corriente (este efecto es despreciable si el transformador está protegido con dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias puenteando sus impedancias);

- la relación entre las resistencias convencionales de tierra de los transformadores con las de las cargas que alimentan pueden influir en el reparto de la corriente (cuanto menor sea la impedancia del transformador, mayor es la onda de corriente que circula por el sistema de baja tensión);

- las cargas en paralelo producen una disminución de la impedancia efectiva en el sistema de baja tensión, dando lugar a un aumento de la corriente parcial del rayo que puede circular por este sistema.

E.2 Ondas tipo impulso en los sistemas conectados a la estructura

E.2.1 Ondas tipo impulso producidas por descargas en los servicios (fuente de daño S3)

En el caso de impactos directos en los servicios conectados a la estructura, debe tenerse en cuenta el reparto de la corriente en ambas direcciones del servicio, así como la rigidez dieléctrica del aislamiento.

La selección del valor de la I_{imp} puede basarse en los datos de la tabla E.2, en la que los valores preferenciales de I_{imp} están dados en función del nivel de protección contra el rayo (NPR).

Tabla E.2 – Ondas tipo impulso de corriente previstas debidas a descargas atmosféricas

NPR	Sistemas de baja tensión			Líneas de telecomunicación		
	Descarga en el servicio	**Descarga cerca del servicio**	**Cerca de, o en la estructura**	**Descarga en el servicio**	**Descarga cerca del servicio**	**Cerca de, o en la estructura**
	Fuente de daño S3 (descarga directa) Forma de onda: 10/350 µs (kA)	Fuente de daño S4 (descarga indirecta) Forma de onda: 8/20 µs (kA)	Fuente de daño S1 o S2 (corriente inducida solamente por S1) Forma de onda: 8/20 µs (kA)	Fuente de daño S3 (descarga directa) Forma de onda: 10/350 µs (kA)	Fuente de daño S4 (descarga indirecta) medida: 5/300 µs estimada: 8/20 µs (kA)	Fuente de daño S2 (corriente inducida) Forma de onda: 8/20 µs (kA)
III – IV	5	2,5	0,1	1	0,01 (0,05)	0,05
I – II	10	5	0,2	2	0,02 (0,1)	0,1

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

En las líneas apantalladas, los valores de las sobreintensidades dados en la tabla E.2 pueden reducirse por un factor de 0,5.

NOTA Se considera que la resistencia de la pantalla es aproximadamente igual a la resistencia de todos los conductores del servicio puestos en paralelo.

E.2.2 Ondas tipo impulso producidas por descargas próximas a los servicios (fuente de daño S4)

Las ondas tipo impulso producidas por las descargas próximas a los servicios tienen menor energía que la que producen las descargas en los servicios (fuente de daño S3).

Las sobreintensidades previstas y asociadas con los niveles de protección contra el rayo (NPR) son dados en la tabla E.2.

En las líneas apantalladas, los valores de las ondas tipo impulso dados en la tabla E.2 pueden reducirse por un factor de 0,5.

E.3 Ondas tipo impulso producidas por efectos inductivos (fuente de daño S1 o S2)

Las sobretensiones debidas a los efectos inductivos de los campos magnéticos, creados bien por descargas próximas (fuente S2) o por la circulación de la corriente en la parte externa del SPCR o por la pantalla espacial de ZPR 1 (fuente S1) tienen una forma onda típica 8/20 μs. Estas sobretensiones deben considerarse en las proximidades o en los terminales de los aparatos situados en ZPR 1 y en la frontera ZPR 1/2.

E.3.1 Ondas tipo impulso en el interior de una ZPR 1 sin apantallar

En el interior de una ZPR 1 sin apantallar (por ejemplo, protegida solamente por un SPCR exterior, conforme a la Norma IEC 62305-3 con mallas de anchos superiores a 5 m) pueden producirse sobretensiones relativamente altas por efectos inductivos originados por campos magnéticos no amortiguados.

Las sobreintensidades previstas, en función de los niveles de protección, son las dadas en la tabla E.2.

E.3.2 Ondas tipo impulso en el interior de una ZPR apantallada

En el interior de una ZPR apantallada eficazmente (se requieren mallas de dimensiones inferiores a 5 m, de acuerdo con el anexo A de la Norma IEC 62305-4), la aparición de sobretensiones por efectos inductivos originados por los campos magnéticos se reduce fuertemente. En tales casos las sobretensiones son muy inferiores a las indicadas en el apartado E.3.1.

En el interior de la ZPR 1 los efectos inductivos son inferiores debidos al efecto de amortiguación de la pantalla espacial.

En el interior de la ZPR 2 los efectos inductivos son más reducidos debidos al efecto cascada del apantallamiento espacial de las zonas ZPR 1 y ZPR 2.

E.4 Información relativa a los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias

El uso de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias depende de su capacidad para soportar los impulsos, de acuerdo con la Norma IEC 61643-1[6] para los sistemas de potencia y con la Norma IEC 61643-21 para los sistemas de telecomunicación.

La colocación de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias en la instalación es como sigue:

a) A la entrada de la línea en la estructura (en la frontera de la ZPR 1, por ejemplo en el cuadro principal de distribución):

   - dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con I_{imp} (forma de onda típica 10/350, por ejemplo, dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados de acuerdo a la Clase I);

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

- dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con I_n (forma de onda típica 8/20, por ejemplo, dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados de acuerdo a la Clase II).

b) Próximo al aparato a proteger (en la frontera de la ZPR 2 o superior, por ejemplo en un cuadro secundario de distribución, o en tomas de corriente):

- dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con I_n (forma de onda típica 8/20, por ejemplo, por dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados de acuerdo a la Clase II);

- dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con una onda combinada (forma de onda de corriente típica 8/20, dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados de acuerdo a la Clase III).

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

BIBLIOGRAFÍA

[1] IEC 60664-1:1992 *Coordinación de aislamiento de los equipos en los sistemas (redes) de baja tensión. Parte 1: Principios, requisitos y ensayos.*

[2] IEC 61000-4-5:1995 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y medida. Sección 5: Ensayos de inmunidad a las ondas de choque.*

[3] Berger K., Anderson R.B., Kröninger H., *Parameters of lightning flashes.* CIGRE Electra No 41 (1975), p. 23 – 37.

[4] Anderson R.B., Eriksson A.J., *Lightning parameters for engineering application.* CIGRE Electra No 69(1980), p. 65 – 102.

[5] IEEE working group report, *Estimating lightning performance of transmission lines II*, 1992.

[6] IEC 61643-1:2005 *Pararrayos de baja tensión. Parte 1: Pararrayos conectados a sistemas eléctricos de baja tensión. Requisitos y ensayos.*

[7] IEC 61643-12:2002 *Pararrayos de baja tensión. Parte 12: Pararrayos conectados a sistemas eléctricos de baja tensión. Selección y principios de aplicación.*

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

ANEXO ZA (Normativo)

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

Las normas que a continuación se indican son indispensables para la aplicación de esta norma. Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

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 correspondiente[1)]
IEC 62305-2	–[2)]	Protección contra el rayo. Parte 2: Evaluación del riesgo.	EN 62305-2	2006[3)]	–
IEC 62305-3 (mod)	–[2)]	Protección contra el rayo. Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano.	EN 62305-3	2006[3)]	–
IEC 62305-4	–[2)]	Protección contra el rayo. Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.	EN 62305-4	2006[3)]	–
IEC 62305-5	–[4)]	Protección contra el rayo. Parte 5: Servicios	–	–	–

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

2) Referencia sin fecha.

3) Edición válida en la fecha de publicación.

4) A publicar.

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos

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 INVENCIO NOVES TECNOLOGIES AR SL
Licencia para un usuario - Copia y uso en red prohibidos