

Protección contra el rayo. Parte 1: Principios generales

Protection against lightning - Part 1: General principles

(EQV. IEC 62305-1 ed 2.0 (2010-12) Protection against lightning - Part 1: General principles)

2015-12-11
1ª Edición

R.N°011-2015-INACAL/DN. Publicada el 2015-12-25

Precio basado en 91 páginas

I.C.S.: 29.020; 91.120.40

ESTA NORMA ES RECOMENDABLE

Descriptores: Instalación eléctrica, protección para asegurar la seguridad, protección contra efectos térmicos, seguridad

© IEC 2010

Todos los derechos son reservados. A menos que se especifique lo contrario, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia o publicándolo en el Internet o intranet, sin permiso por escrito del INACAL, único representante de la IEC en territorio peruano.

© INACAL 2015

Todos los derechos son reservados. A menos que se especifique lo contrario, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia o publicándolo en el internet o intranet, sin permiso por escrito del INACAL.

INACAL

Calle Las Camelias 815, San Isidro
Lima- Perú
Tel.: +51 1 640-8820
administracion@inacal.gob.pe
www.inacal.gob.pe

ÍNDICE

	página
ÍNDICE	ii
PREFACIO	iii
PRÓLOGO (IEC)	v
INTRODUCCIÓN	vi
1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	1
2. REFERENCIAS NORMATIVAS	1
3. TÉRMINOS Y DEFINICIONES	2
4. PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO	12
5. DAÑOS CAUSADOS POR LOS RAYOS	13
6. NECESIDAD Y JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO	19
7. MEDIDAS DE PROTECCIÓN	21
8. CRITERIOS BÁSICOS PARA LA PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	24
ANEXO A (INFORMATIVO) – Parámetros de la corriente del rayo	34
ANEXO B (INFORMATIVO) – Funciones de tiempo de la corriente del rayo con fines de análisis	47
ANEXO C (INFORMATIVO) – Simulación de la corriente del rayo con fines de ensayo	53
ANEXO D (INFORMATIVO) – Parámetros de ensayo que simulan los efectos del rayo en los componentes de UN SPCR	58
ANEXO E (INFORMATIVO) – Ondas transitorias producidas por el rayo en diferentes puntos de la instalacion	82
BIBLIOGRAFÍA	91

PREFACIO

A. RESEÑA HISTÓRICA

A.1 La presente Norma Técnica Peruana ha sido elaborada por el Comité Técnico de Seguridad eléctrica, Sub Comité Técnico de Normalización de Protección contra el rayo, mediante el Sistema 1 o de Adopción, durante los meses de marzo a abril de 2015, utilizando como antecedente a la Norma IEC 62305-1 ed 2.0 (2010-12) Protection against lightning - Part 1: General principles.

A.2 El Comité Técnico de Normalización de Seguridad eléctrica, Sub Comité Técnico de Normalización de Protección contra el rayo presentó a la Dirección de Normalización –DN-, con fecha 2015-10-20, el PNTP-IEC 62305-1:2015, para su revisión y aprobación, siendo sometido a la etapa de discusión pública el 2015-11-06. No habiéndose presentado observaciones fue oficializada como Norma Técnica Peruana **NTP-IEC 62305-1:2015 Protección contra el rayo. Parte 1: Principios generales**, 1ª Edición, el 25 de diciembre de 2015.

A.3 Esta Norma Técnica Peruana es una adopción de la Norma IEC 62305-1:2010 ed 2.0. La Presente Norma Técnica Peruana presenta cambios editoriales referidos principalmente a terminología propia del idioma español y ha sido estructurada de acuerdo a las Guías Peruanas GP 001:1995 y GP 002:1995.

B. INSTITUCIONES QUE PARTICIPARON EN LA ELABORACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA PERUANA

Secretaría

DIRECCIÓN GENERAL DE
ELECTRICIDAD DEL
MINISTERIO DE ENERGÍA Y
MINAS

Secretario

Orlando Chávez Chacaltana

Coordinador

Luis Alberto Arellán Yanac

ENTIDAD**REPRESENTANTES**

Ministerio de Vivienda Construcción y
Saneamiento

Roberto Prieto Sánchez
Yessenia Lugo Chávez

Asociación Electrotécnica Peruana

Justo Yanque Montufar

Pontificia Universidad Católica del Perú

Raúl Del Rosario Quinteros
Oscar Melgarejo

PARA RAYOS S.A.C.

Flavio Tito Fuentes
Jorge Hurtado Quispe

PROMELSA

Richard Verástegui Vilcahuamán

Corporación Selectronics S.A.C.

Orlando E. Ardito Chávez
Jorge Noé Rondón

Thompson Lighting Protection Inc.

Lizardo López Ingunza

SENATI

Sergio Takuman Kiyota

---oooOooo---

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL

Protección contra el rayo Parte 1: Principios generales

PRÓLOGO

- 1) La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) es una organización mundial de normalización que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales (Comités Nacionales de la IEC). El objeto de la IEC es promover la cooperación internacional en todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctricos y electrónicos. Con este fin, y además de otras actividades, la IEC publica Normas Internacionales, Especificaciones Técnicas, Informes Técnicos, Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS por sus siglas en inglés) y Guías (en lo sucesivo "Publicación (es) de la IEC"). Su preparación está a cargo de los comités técnicos; cualquier Comité Nacional de la IEC interesado en el tema tratado, podrá participar en este trabajo preparatorio. Las organizaciones internacionales, gubernamentales y no gubernamentales vinculadas con la IEC también participan en esta preparación. La IEC colabora estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés), de conformidad con las condiciones determinadas por acuerdo entre las dos organizaciones.
- 2) Las decisiones formales o acuerdos de la IEC sobre cuestiones técnicas expresan, lo más aproximadamente posible, un consenso internacional de opinión sobre los temas relevantes ya que cada comité técnico, tiene la representación de todos los Comités Nacionales de la IEC interesados.
- 3) Las Publicaciones de la IEC tienen la forma de recomendaciones para uso internacional y son aceptados por los Comités Nacionales de la IEC en ese sentido. Mientras que se hacen todos los esfuerzos razonables para asegurar que el contenido técnico de las Publicaciones IEC es exacta, la IEC no se hace responsable de la forma en que se utilizan o de cualquier mala interpretación por cualquier usuario final.
- 4) Con el fin de promover la uniformidad internacional, los Comités Nacionales de la IEC se comprometen a aplicar las Publicaciones de la IEC de forma transparente en la mayor medida posible en sus publicaciones nacionales y regionales. Cualquier divergencia entre alguna publicación IEC y la publicación nacional o regional correspondiente será indicada claramente en la segunda.
- 5) La misma IEC no proporciona ninguna evaluación de la conformidad. Los organismos de certificación independientes proporcionan servicios de evaluación de la conformidad y, en algunas zonas, el acceso a las marcas de conformidad de la IEC. La IEC no es responsable de los servicios llevados a cabo por organismos de certificación independientes.
- 6) Todos los usuarios deben asegurarse de que tienen la última edición de esta publicación.
- 7) Ninguna responsabilidad recaerá en la IEC o en sus directores, empleados, funcionarios o agentes incluidos los expertos individuales y los miembros de sus comités técnicos y los Comités Nacionales de la IEC por cualquier daño personal, daño material u otros daños de cualquier naturaleza, ya sean directos o indirectos, o por los gastos (incluyendo tasas legales) y gastos derivados de la publicación, uso o dependencia, de esta publicación de la IEC o de otras Publicaciones de la IEC.
- 8) Se llama la atención sobre las referencias normativas citadas en esta publicación. El uso de las publicaciones de referencia es indispensable para la correcta aplicación de la presente publicación.
- 9) Se llama la atención a la posibilidad de que algunos de los elementos de esta publicación de la IEC puedan ser objeto de derechos de patente. La IEC no se hace responsable por la identificación de alguno o todos los derechos de patente.

La Norma internacional IEC 62305-1 ha sido preparado por el comité técnico 81 de la IEC: Protección contra el rayo.

Esta segunda edición anula y sustituye a la primera edición, publicada en el 2006, y que constituye una revisión técnica.

Esta edición incluye los siguientes cambios técnicos significativos con respecto a la edición anterior:

- 1) Ya no abarca la protección de los servicios conectados a las estructuras.
- 2) Las interfaces aisladas se introducen como medidas de protección para reducir la falla de los sistemas eléctricos y electrónicos.
- 3) El primer impulso de corriente negativa se presenta como un nuevo parámetro del rayo para fines de cálculo.
- 4) El aumento previsto de sobrecorrientes debido a los relámpagos ha sido especificado para sistemas de energía de baja tensión y para los sistemas de telecomunicaciones.

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

FDIS	Informe sobre la votación
81/370 / FDIS	81/380 / RVD

La información completa sobre la votación para la aprobación de esta norma se puede encontrar en el informe sobre la votación que se indica en la tabla anterior.

Esta publicación ha sido redactada de acuerdo con las Directivas ISO / IEC, Parte 2.

Una lista de todas las partes de la serie IEC 62305, bajo el título general de Protección contra el rayo, se puede encontrar en el sitio web de la IEC.

El comité ha decidido que el contenido de esta publicación se mantendrá sin cambios hasta la fecha de estabilidad indicado en el sitio web de la IEC en "<http://webstore.iec.ch>" en los datos relacionados con la publicación específica. En esta fecha, la publicación será

- reconfirmado,
- retirado,
- sustituido por una edición revisada, o
- modificado.

Una versión bilingüe de esta norma podrá ser publicada en una fecha posterior.

INTRODUCCIÓN

No existen dispositivos o métodos capaces de modificar los fenómenos naturales climatológicos en la medida en que puedan prevenir las descargas de rayos. Relámpagos a, o cerca de, estructuras (o líneas conectadas a las estructuras) son peligrosos para las personas, a las propias estructuras, sus contenidos e instalaciones, así como a las líneas. Esta es la razón de por qué la aplicación de medidas de protección contra rayos es esencial.

La necesidad de protección, los beneficios económicos de la instalación de medidas de protección y la selección de adecuadas medidas de protección debe determinarse en términos de gestión del riesgo. La gestión del riesgo es el objeto de la Norma IEC 62305-2.

Las medidas de protección contempladas en la Norma IEC 62305 están probadas de ser eficaces en la reducción de riesgos.

Todas las medidas de protección contra los rayos forman la protección global contra el rayo. Por razones prácticas, los criterios para el diseño, instalación y mantenimiento de las medidas de protección contra rayos están considerados en dos grupos separados:

- el primer grupo concerniente con las medidas de protección para reducir el daño físico y peligros contra la vida en una estructura está dado en la Norma IEC 62305-3;
- el segundo grupo concerniente con las medidas de protección para reducir las fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos en una estructura está dado en la Norma IEC 62305-4.

La conexión entre las partes de la IEC 62305 se ilustra en la Figura 1.

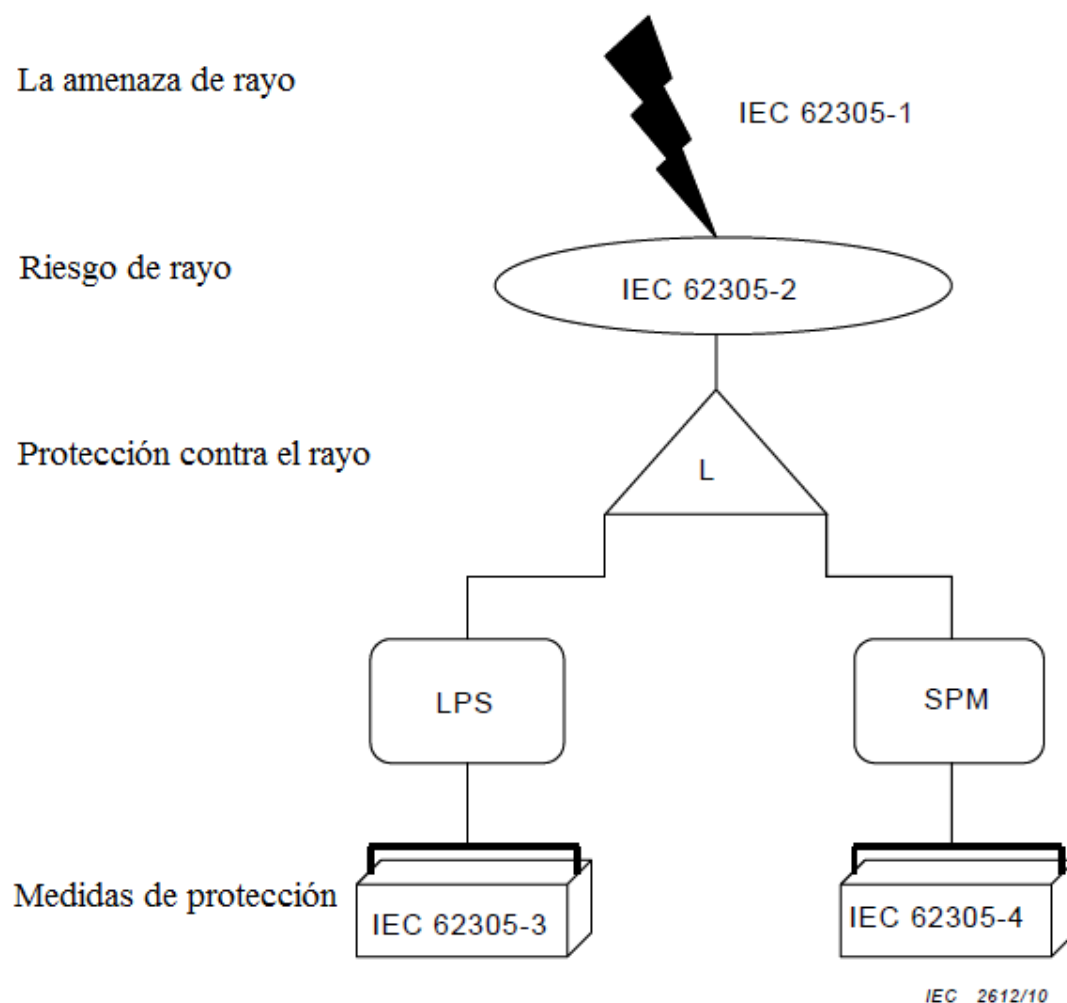


FIGURA 1: Conexión entre las varias partes de la IEC 62305

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

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 también de las personas.

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

- Sistemas de ferrocarriles;
- Vehículos, barcos, aviones, instalaciones en el mar;
- Tuberías subterráneas de alta presión;
- Tuberías, líneas de energía y de telecomunicación situadas fuera de la estructura.

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

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Los siguientes documentos de referencia son indispensables para la aplicación de esta norma. Para los documentos de referencia con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para los documentos de referencia sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

IEC 62305-2*:2010

Protección contra el rayo. Parte 2: Evaluación del riesgo.

* La NTP-IEC 62305-2:2015 es equivalente a la Norma IEC 62305-2:2010.

IEC 62305-3*:2010

Protección contra el rayo. Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo de la vida.

IEC 62305-4*:2010

Protección contra el rayo. Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

3. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los fines de este documento, se aplican los términos y definiciones siguientes:

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 líder descendente.

NOTA: Una descarga descendente consiste en un primer impulso de corta duración que puede estar seguido por impulsos subsiguientes. Uno o más de los impulsos pueden estar seguidos por un **rayo** de larga duración.

3.3 Descarga ascendente:

Descarga iniciada por un líder ascendente desde una estructura¹ en tierra hacia la nube.

NOTA: Una descarga ascendente consiste en una primera descarga de larga duración con o sin descargas consecutivas de corta duración superpuestas. Uno o más de estas descargas pueden estar seguidos por un rayo de larga duración.

* La NTP-IEC 62305-3:2015 es equivalente a la Norma IEC 62305-3:2010.

* La NTP-IEC 62305-4:2015 es equivalente a la Norma IEC 62305-4:2010.

¹ Ejemplos de una estructura se consideran un sistema de protección contra el rayo SPCR (LPS), una línea, un árbol, etc.

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 pico en la cola, 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 continuada.

NOTA: La duración T_{LARGO} (T_{LONG}) (duración entre el valor 10% en el frente y el valor 10% en la cola) de esta corriente continuada 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 de tiempo típico entre ellos de cerca de 50 ms .

NOTA: Se han observado sucesos que podían tener hasta algunas docenas de rayos y en 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 una estructura protuberante (por ejemplo una estructura, un sistema de protección contra el rayo SPCR (LPS), una línea, un árbol, etc.).

NOTA: Una descarga 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 pico de corriente, I :

Valor máximo de la corriente del rayo.

3.11 Valor medio de la pendiente del frente de impulso de corriente:

Valor medio de la variación de la corriente en un intervalo de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$.

NOTA: Se expresa como la diferencia $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ entre los valores de la corriente al comienzo y al final del Intervalo, dividido por el Intervalo $\Delta t = t_2 - t_1$ (véase la Figura A.1).

3.12 Tiempo de subida del impulso de corriente, 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 pico (véase la Figura A.1).

3.13 Origen virtual del impulso de corriente, O_1 :

Punto de intersección con el eje de tiempo de una línea recta trazada entre los puntos de referencia correspondientes al 10 % y 90 % del frente de la corriente de impacto (véase la Figura A.1); este precede en $0,1 T_1$ al instante en el que la corriente alcanza el 10% de su valor pico.

3.14 Tiempo hasta el valor de la mitad de la cola del impulso de corriente, 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 pico de la corriente en la cola (véase la Figura A.1).

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 larga duración, T_{LARGO} (T_{LONG}):

Tiempo durante el cual la corriente del rayo de larga duración está comprendida entre el 10% del valor pico cuando la corriente continuada aumenta, y el 10% del valor pico cuando la corriente continuada disminuye (véase la Figura A.2).

3.17 Carga del rayo, Q_{DESCARGA} (Q_{FLASH}):

Valor resultante de la integral en el tiempo de la corriente del rayo a lo largo de la duración total de la descarga.

3.18 Carga del impulso, Q_{CORTO} (Q_{SHORT}):

Valor resultante de la integral en el tiempo de la corriente del rayo en un impulso.

3.19 Carga del rayo de larga duración, Q_{LARGO} (Q_{LONG}):

Valor resultante de la integral en el tiempo de la corriente del rayo durante un rayo de larga duración.

3.20 Energía específica, W/R :

Valor resultante de la integral en el tiempo del cuadrado de la corriente del rayo en el tiempo de duración total de la descarga.

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

3.21 Energía específica de un impulso de corriente:

Valor resultante de la integral en el tiempo del cuadrado de la corriente del rayo en el tiempo de duración del impulso.

NOTA: La energía específica de un rayo de larga duración es despreciable.

3.22 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.

3.23 Línea:

Línea de potencia o de telecomunicación conectada a la estructura a proteger.

3.24 Líneas de telecomunicación:

Líneas previstas para la comunicación entre equipos situados en estructuras separadas, tales como líneas telefónicas o líneas de datos.

3.25 Líneas de potencia:

Líneas que suministran energía a los equipos eléctricos y electrónicos situados en una estructura, como líneas de distribución en baja tensión (BT) o en alta tensión (AT).

3.26 Caída de rayo en una estructura:

Descarga que impacta directamente sobre la estructura a proteger.

3.27 Caída de rayo próxima a una estructura:

Descarga que impacta a una distancia lo suficientemente próxima a la estructura a proteger que puede causar sobretensiones peligrosas.

3.28 Sistema eléctrico

Sistema que incorpora componentes de alimentación de potencia en baja tensión.

3.29 Sistema electrónico

Sistema que incorpora componentes electrónicos sensibles tales como equipos de telecomunicación, computadoras, sistemas de control e instrumentación, sistemas de radio, e instalaciones electrónicas de potencia.

3.30 Sistemas internos

Sistemas eléctricos y electrónicos situados en el interior de una estructura.

3.31 Daño físico

Daños en las estructuras (o en su contenido) debidos a los efectos mecánicos, térmicos, químicos y explosivos del rayo.

3.32 Daños en los seres vivos

Daños permanentes, incluida la muerte, en personas o animales por choques eléctricos debidos a las tensiones de toque y de paso causados por el rayo.

NOTA: Aunque los seres vivos pueden ser heridos por otros medios, en esta norma el término "daños a los seres vivos" se limita a la amenaza por choque eléctrico (tipo de daño D1).

3.33 Falla de los sistemas eléctricos y electrónicos

Daños permanentes en los sistemas eléctricos y electrónicos debidos al IEMR (LEMP).

3.34 Impulso electromagnético del rayo, IEMR (LEMP)

Todos los efectos electromagnéticos de la corriente del rayo que, producidos por acoplamientos resistivos, inductivos y capacitivos, generan ondas y campos electromagnéticos irradiados.

3.35 Onda de choque

Onda transitoria, producida por el IEMR (LEMP), que aparece como una sobretensión y/o una sobreintensidad.

3.36 Zona de protección contra el rayo, ZPR (LPZ)

Zona en la que está definido el ambiente electromagnético del rayo.

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

3.37 Riesgo, R

Valor de las pérdidas promedio anuales probables (personas o bienes) debidas al rayo, respecto al valor total (personas o bienes) de la estructura a proteger.

3.38 Riesgo tolerable, R_T

Valor máximo del riesgo que puede admitirse en la estructura a proteger.

3.39 Nivel de protección contra el rayo, NPR (LPL):

Cifra relacionada con un conjunto de parámetros de la corriente del rayo y relativa a la probabilidad de que los valores de diseño asociados, máximos y mínimos, no serán sobrepasados cuando naturalmente ocurran los rayos.

NOTA: El nivel de protección contra el rayo se emplea para diseñar las medidas de protección de acuerdo con el conjunto de los parámetros relevantes de la corriente del rayo.

3.40 Medidas de protección:

Medidas a tomar en la estructura a proteger con el fin de reducir el riesgo.

3.41 Protección contra el rayo, PCR (LP)

Sistema completo de protección de las estructuras contra el rayo que incluye la protección de sus sistemas internos y de sus contenidos, así como el de las personas y que está formado generalmente por un SPCR (LPS) y un SPM.

3.42 Sistema de protección contra el rayo, SPCR (LPS)

Sistema completo empleado para reducir los daños físicos por las descargas de rayos en una estructura.

NOTA: Consiste en sistemas de protección contra el rayo tanto externos como internos.

3.43 Sistema externo de protección contra el rayo

Parte del SPCR (LPS) que comprende un o unos dispositivos de captura, conductores de bajada y una puesta a tierra.

3.44 Sistema interno de protección contra el rayo

Parte del SPCR (LPS) formado por las conexiones equipotenciales y/o el aislamiento eléctrico del SPCR (LPS) externo.

3.45 Sistemas de dispositivos de captura

Parte de un SPCR (LPS) externo formado por elementos metálicos tales como, varillas, mallas o cables conductores destinados a interceptar el rayo.

3.46 Sistema de conductores de bajada

Parte de un SPCR (LPS) externo cuya misión es conducir la corriente del rayo desde el sistema de dispositivos de captura al sistema de puesta a tierra.

3.47 Sistema de puesta a tierra

Parte de un SPCR (LPS) externo cuya misión es conducir y dispersar la corriente del rayo en la tierra.

3.48 Elementos conductores externos:

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

3.49 Enlace equipotencial para el rayo EB

Conexión a un SPCR (LPS) de las partes metálicas realizada, sea directamente mediante conexiones conductoras o mediante dispositivos de protección contra ondas transitorias, para reducir las diferencias de potencial producidas por la corriente del rayo.

3.50 Impedancia convencional de tierra

Relación entre los valores pico de la tensión y de la corriente en la toma de tierra que, por lo general, no ocurren al mismo tiempo.

3.51 Medidas de protección contra el IEMR (LEMP), SMPI (SPM)

Medidas tomadas para proteger los sistemas internos de los efectos del IEMR (LEMP).

NOTA: Es parte de la protección contra el rayo general.

3.52 Pantalla magnética:

Malla (grilla) metálica cerrada o pantalla continua que rodea el objeto a proteger, o parte de él, utilizada con la finalidad de reducir las fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos.

3.53 Dispositivo de protección contra ondas transitorias, DPS (SPD):

Dispositivo que limita las sobretensiones transitorias y evacúa las corrientes de las ondas tipo impulso. Contiene al menos un componente no lineal.

3.54 Sistema coordinado de DPS (SPDs):

Conjunto de dispositivos de protección contra las ondas transitorias, debidamente elegidos, coordinados e instalados, para formar un sistema destinado a reducir las fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos.

3.55 Tensión de impulso soportada nominal, U_w

Tensión de impulso soportada, asignada por el fabricante al equipo o a una parte del equipo, que caracteriza la capacidad específica de su aislamiento para soportar sobretensiones.

NOTA: A los efectos de esta norma, sólo se considera la tensión de impulso soportada entre conductores activos y tierra.

[IEC 60664-1:2007, definición 3.9.2]^[1]²

3.56 Interfaces aislantes:

Dispositivos capaces de reducir las ondas transitorias conducidas por las líneas que entran en una ZPR (LPZ).

NOTA 1: Incluyen transformadores de aislamiento con pantallas entre arrollamientos puestas a tierra, cables de fibra ópticas no metálicas y aisladores ópticos.

NOTA 2: Las características del aislamiento de estos dispositivos son las apropiadas para su aplicación intrínseca o a través de los DPS (SPDs).

4. PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO

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

El Anexo B informa, con fines de análisis, sobre la función en el tiempo de la corriente del rayo.

El Anexo C informa, con fines de ensayos, sobre la simulación de la corriente del rayo.

El Anexo D informa, con fines de simular los efectos del rayo sobre los SPCR (LPS), sobre los parámetros básicos a emplear en los laboratorios.

² Las referencias entre corchetes hacen referencia a la bibliografía.

El Anexo E informa sobre las ondas transitorias producidas por los rayos en distintos puntos de la instalación.

5. DAÑOS CAUSADOS POR LOS RAYOS

5.1 Daños en una estructura

El impacto de un rayo sobre una estructura puede producir daños en la propia estructura, a sus ocupantes y en sus bienes, incluyendo las fallas de los sistemas internos. Los daños y las fallas 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, concreto, concreto armado, armaduras metálicas);
- la función (viviendas, oficinas, granjas, teatros, hoteles, escuelas, hospitales, museos, iglesias, prisiones, almacenes, bancos, fábricas, plantas industriales, estadios);
- 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);
- las líneas conectadas (líneas de potencia, líneas de telecomunicación, tuberías);
- las medidas de protección existentes o previstas (por ejemplo, medidas de protección para reducir el daño físico y proteger la vida, medidas de protección para reducir las fallas 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 sus alrededores, estructura peligrosa para el medioambiente).

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

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 Falla de los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos instalados (por ejemplo, televisores, computadoras, 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 falla del control electrónico de la ventilación y de los sistemas de distribución de la alimentación, etc.
Teatros, Hoteles, Escuelas, Tiendas de departamentos, Zonas deportivas	Daños en las instalaciones eléctricas (por ejemplo, la iluminación) susceptibles de provocar el pánico Falla 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, falla de las computadoras 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 daños menores hasta daños inaceptables y pérdida de la producción
Museos y lugares arqueológicos Iglesias	Pérdidas irreparables de patrimonio cultural
Telecomunicaciones, Centrales de energía	Pérdidas inaceptables de servicios para el público
Fábricas pirotécnicas, Fábricas de Municiones	Consecuencias del incendio y la explosión de la planta y sus alrededores
Planta 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. En función de la situación del punto de impacto respecto a la estructura considerada, deben tomarse en consideración las situaciones siguientes:

- a) S1: descargas que impactan directamente sobre la estructura;
 - b) S2: descargas que impactan en el suelo en las proximidades de la estructura;
 - c) S3: descargas que impactan directamente en las líneas conectadas a la estructura;
 - d) S4: descargas que impactan en el suelo en las proximidades de las líneas conectadas a la estructura.
- a) Las descargas que impactan directamente en la estructura pueden producir:
- daños mecánicos directos, fuego y/o explosión causados por el propio arco del 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 por el arco (fusión del metal);
 - fuego y/o explosiones por chispas producidas por las sobretensiones resultantes de acoplamientos resistivos e inductivos y por el paso de parte de las corrientes de los rayos;
 - daños a los seres vivos por el impacto eléctrico debido a las tensiones de toque y de paso resultantes de acoplamientos resistivos e inductivos;
 - fallas o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos al IEMR (LEMP).
- b) Las descargas que impactan en el suelo en las proximidades de la estructura pueden producir:
- fallas o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos al IEMR (LEMP).
- c) Las descargas que impactan directamente en una línea conectada a la estructura pueden producir:

- fuego y/o explosiones por chispas producidas por las sobretensiones y las corrientes del rayo transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura;
 - daños a los seres vivos por el impacto eléctrico debido a las tensiones de contacto en el interior de la estructura producidas por corrientes de rayo transmitidas a través de la línea conectada;
 - fallas o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos a sobretensiones transmitidas a través de la línea conectada a la estructura.
- d) Las descargas que impactan en el suelo en las proximidades de una línea conectada a la estructura pueden producir:
- fallas o mal funcionamiento de los sistemas internos debidos a sobretensiones transmitidas a través de las líneas conectadas 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 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 el NTP-IEC 62305-3).

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

- D1: daños en los seres vivos por el choque eléctrico.
- D2: daños físicos (fuego, explosión, destrucción mecánica, emanación química) producidos por los efectos de la corriente del rayo, incluyendo las chispas.
- D3: falla de los sistemas internos debido al IEMR (LEMP).

5.2 Tipos de pérdidas

Cada tipo de daño, solo o en combinación con otros, puede dar lugar, en la estructura a proteger, a pérdidas diferentes. El tipo de pérdidas que puede aparecer depende de las características de la estructura en sí misma.

Para los fines de la Norma IEC 62305 se consideran los siguientes tipos de pérdidas que pueden aparecer como consecuencia de los daños relativos a la estructura:

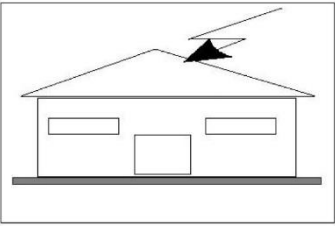
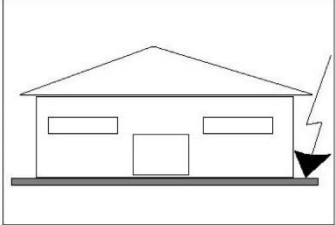
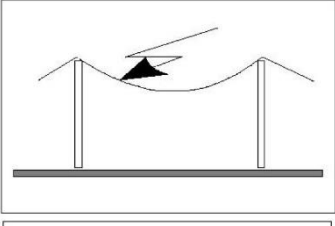
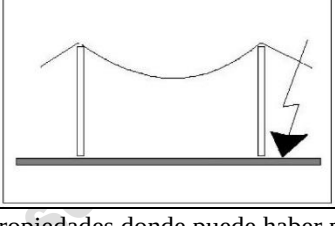
- L1: pérdida de vida humana (incluyendo daños permanentes).
- L2: pérdida del servicio al público.
- L3: pérdida de patrimonio cultural.
- L4: pérdida de valor económico (estructura y su contenido, servicios y pérdida de actividad).

NOTA: Para los fines de la Norma IEC 62305 solamente se consideran servicio público las compañías de gas, agua, TV, teléfonos y las eléctricas.

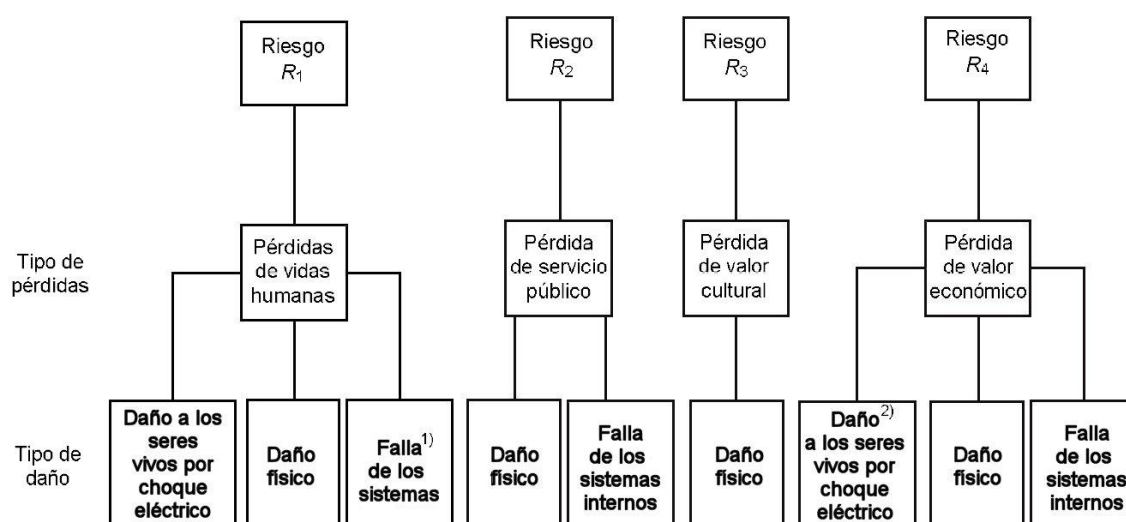
Las pérdidas L1, L2 y L3 pueden considerarse como pérdidas de valor social, mientras que la L4 se puede considerar como pérdida puramente económica.

La relación entre las fuentes de los daños, los tipos de daños y las pérdidas se indica en la Tabla 2.

TABLA 2 - 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 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
Cerca de la estructura		S2	D3	L1 ^b , L2, L4
Línea conectada a la estructura		S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
Cerca de una línea		S4	D3	L1 ^b , L2, L4
^a Solamente en propiedades donde puede haber pérdida de animales. ^b Solamente para estructuras con riesgo de explosión y para hospitales o estructuras similares en las que la falla de los sistemas internos pone en peligro la vida humana inmediatamente.				

En la Figura 2 se relacionan los tipos de pérdidas con los tipos de daños y sus correspondientes riesgos.



IEC 2613/10

Leyenda

- 1) Solamente en hospitales o en estructuras en las que la falla de los sistemas internos pone en riesgo inmediato la vida humana.
- 2) Solamente en propiedades en los que puedan perderse animales.

FIGURA 2 - Tipo de pérdida y sus riesgos correspondientes resultante de los diferentes tipos de daños

6. NECESIDAD Y JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO

6.1 Necesidad de la protección contra el rayo

La necesidad de la protección contra el rayo de una estructura a ser protegida debe valorarse con el fin de reducir las pérdidas de valor social L1, L2, y debiéndose evaluar L3.

Con el fin de determinar la necesidad o no de la protección contra el rayo de una estructura se debe llevar a cabo una evaluación del riesgo de acuerdo a la metodología indicada en la NTP-IEC 62305-2. Deben tenerse en cuenta los siguientes tipos de riesgo, en función de los tipos de pérdidas definidos en el apartado 5.2:

- R_1 : riesgo de pérdida o de daño permanente en el ser humano;
- R_2 : riesgo de pérdida de servicio al público;
- R_3 : riesgo de pérdida de patrimonio cultural.

NOTA 1: El Riesgo R_4 , pérdida de valor económico, debería valorarse siempre que se considere la justificación económica de la protección contra el rayo.

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 en 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 (L_1 , L_2 y L_3).

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

NOTA 2: 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 estos casos, los niveles de protección requeridos serán especificados por esta autoridad. En algunos casos, puede llevarse a cabo una evaluación del riesgo como técnica que permita la justificación de estas exigencias.

NOTA 3: En la NTP-IEC 62305-2 se da información más detallada sobre la evaluación del riesgo y cómo proceder para seleccionar las medidas de protección.

6.2 Justificación económica de la protección contra el rayo

Además de la necesidad de la protección contra el rayo de la estructura 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 L_4 .

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

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

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

NOTA: En la NTP-IEC 62305-2 se da información más detallada sobre la evaluación de la justificación económica de la protección contra el rayo.

7. MEDIDAS DE PROTECCIÓN

7.1 Generalidades

Las medidas de protección pueden adoptarse con el fin de reducir el riesgo de acuerdo al tipo de daño.

7.2 Medidas de protección para reducir los daños a seres vivos por choque eléctrico

Las posibles medidas de protección comprenden:

- aislamiento adecuado de las partes conductoras accesibles;
- equipotencialización por medio de un sistema de puesta a tierra enmallado;

- restricciones físicas y carteles de advertencia;
- conexiones equipotenciales para el rayo (EB).

NOTA 1: La equipotencialización y un incremento de la resistencia de contacto de la superficie del terreno, en el interior y en el exterior de la estructura, pueden reducir el riesgo sobre la vida (véase el Capítulo 8 de la NTP-IEC 62305-3:2010).

NOTA 2: Las medidas de protección solo son efectivas si las estructuras están protegidas con un SPCR (LPS).

NOTA 3: El empleo de detectores de tormentas y las previsiones asociadas puede reducir el riesgo sobre la vida.

7.3 Medidas de protección para reducir los daños físicos

La protección se consigue mediante el sistema de protección contra el rayo SPCR (LPS) que incluye lo siguiente:

- sistema de captura;
- sistema de conductores bajantes;
- sistema de puesta a tierra;
- un enlace equipotencial para el rayo (EB);
- un aislamiento eléctrico (y por tanto distancia de separación) del SPCR (LPS) externo.

NOTA 1: Cuando se instala un SPCR (LPS), la equipotencialización es una medida muy importante para reducir los riesgos por fuego, explosión y de 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 vías de escape protegidas aseguran la protección de las personas.

7.4 Medidas de protección para reducir las fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos

Las posibles medidas de protección (SMP) comprenden:

- puesta a tierra y enlaces equipotenciales;
- apantallamiento magnético;
- trazado de la línea;
- interfaces aislantes;
- sistema de protección coordinada de DPS (SPD).

Estas medidas pueden aplicarse solas o combinadas.

NOTA 1: Cuando se considera la fuente del daño S1, las medidas de protección son efectivas solamente si las estructuras están protegidas por un SPCR (LPS).

NOTA 2: El empleo de los detectores de tormentas y de las provisiones asociadas pueden reducir las fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos.

7.5 Selección de las medidas de protección

Las medidas de protección indicadas en los apartados 7.2, 7.3 y 7.4 forman la protección total contra el rayo.

La selección de las medidas de protección más adecuadas debe llevarse a cabo entre el diseñador de las medidas de protección y el propietario de la estructura a proteger, teniendo en cuenta el tipo y el costo de cada tipo de daño y los aspectos técnicos y económicos de las diferentes medidas de protección y el resultado de la evaluación del riesgo.

En la NTP-IEC 62305-2 se dan los criterios para evaluar el riesgo y para la selección 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 capaces de soportar los esfuerzos esperados en el lugar de su instalación.

8. CRITERIOS BÁSICOS PARA LA PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

8.1 Generalidades

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

Esto prevendría la penetración en la estructura 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 costo reducido, obtener medidas que aseguren esta protección total.

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

- daños físicos y riesgos de muerte;
- fallas de los sistemas internos.

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 la protección (nivel de protección contra el rayo).

8.2 Niveles de protección contra el rayo NPR (LPL)

Para los fines de la Norma IEC 62305, se introducen cuatro niveles de protección contra el rayo (I a IV). Para cada NPR (LPL) se fijan un conjunto de parámetros máximos y mínimos de la corriente del rayo.

NOTA 1: La protección contra el rayo cuyos parámetros máximos y mínimos de la corriente del rayo exceden de los que corresponden al NPR (LPL) I necesita medidas de protección más eficientes que deberían tomarse y aplicarse en cada caso particular.

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

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

NOTA 3: Los niveles de protección contra el rayo cuyos parámetros máximos y mínimos de corriente son inferiores a los que corresponden al NPR (LPL) IV, solo permite considerar valores de probabilidad de daños superiores a los indicados en el Anexo B de la NTP-IEC 62305-2:2010, pero no la cuantificación de los mismos, y son útiles para elaborar mejor las medidas de protección con el fin de evitar costos injustificados.

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 3 y se emplean para el diseño de los componentes de la protección contra el rayo (por ejemplo, sección de los conductores, espesor de las planchas metálicas, capacidad de corriente de los DPS (SPDs), 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 (LPL), para calcular el radio de la esfera ficticia (véase el Capítulo A.4) con el fin de definir la zona de protección ZPR (LPZ) 0_B que no puede ser alcanzada directamente por el rayo (Véase el apartado 8.3 y las Figuras 3 y 4). Los valores mínimos de los parámetros de la corriente del rayo asociados al radio de la esfera ficticia están indicados en la Tabla 4. Se emplean para determinar el emplazamiento de los dispositivos de captura y para definir la zona de protección ZPR (LPZ) 0_B (véase el apartado 8.3).

TABLA 3 - Valores máximos de los parámetros del rayo correspondientes a los NPR (LPL)

Primer impulso positivo			NPR			
Parámetros de corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor pico de la corriente	I	kA	200	150	100	
Carga del impulso	Q _{CORTO}	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			
Primer impulso negativo ^a			NPR			
Parámetros de corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	
Valor pico de la corriente	I	kA	100	75	50	
Pendiente media	di/dt	kA/μs	100	75	50	
Parámetros de tiempo	T ₁ /T ₂	μs/ μs	1/200			
Impulso subsiguiente			NPR			
Parámetros de corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor pico 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			LPL			
Parámetros de corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga del impulso largo	Q _{LARGO}	C	200	150	100	
Parámetros de tiempo	T _{LARGO}	s	0,5			
Descarga			NPR			
Parámetros de corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga de la descarga	Q _{DESCARGA}	C	300	225	150	

^a Las formas de onda de las corrientes son solamente para cálculos pero no para ensayos.

^a Las formas de onda de las corrientes son solamente para cálculos pero no para ensayos.

TABLA 4 - Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de la esfera rodante asociada correspondientes a los niveles de protección

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

A partir de las distribuciones estadísticas 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 5).

TABLA 5 - Probabilidades de los límites de los parámetros de la corriente del rayo

Probabilidad para que los parámetros del rayo sean	NPR			
	I	II	III	IV
Inferiores a los valores máximos definidos en la Tabla 3	0,99	0,98	0,95	0,95
Superiores a los valores mínimos definidos en la Tabla 4	0,99	0,97	0,91	0,84

Las medidas de protección especificadas en las NTP-IEC 62305-3 e NTP-IEC 62305-4 son eficaces contra los rayos si los parámetros de la corriente del rayo están en el rango definido para el NPR (LPL) asumido por el diseño. Por eso es por lo que la eficacia de una medida de protección se considera igual a la probabilidad de que los parámetros del rayo estén dentro de tal rango. Para los parámetros que superen este rango hay un riesgo residual de daños.

8.3 Zonas de protección contra el rayo LPZ (ZPR)

Las medidas de protección tales como un SPCR (LPS), apantallamiento de cables, pantallas magnéticas, y DPS (SPD) determinan zonas de protección contra el rayo ZPR (LPZ).

Las ZPR (LPZ) aguas abajo de las medidas de protección se caracterizan por una reducción significativa de los IEMR (LEMP) en comparación con las ZPR (LPZ) situadas aguas arriba.

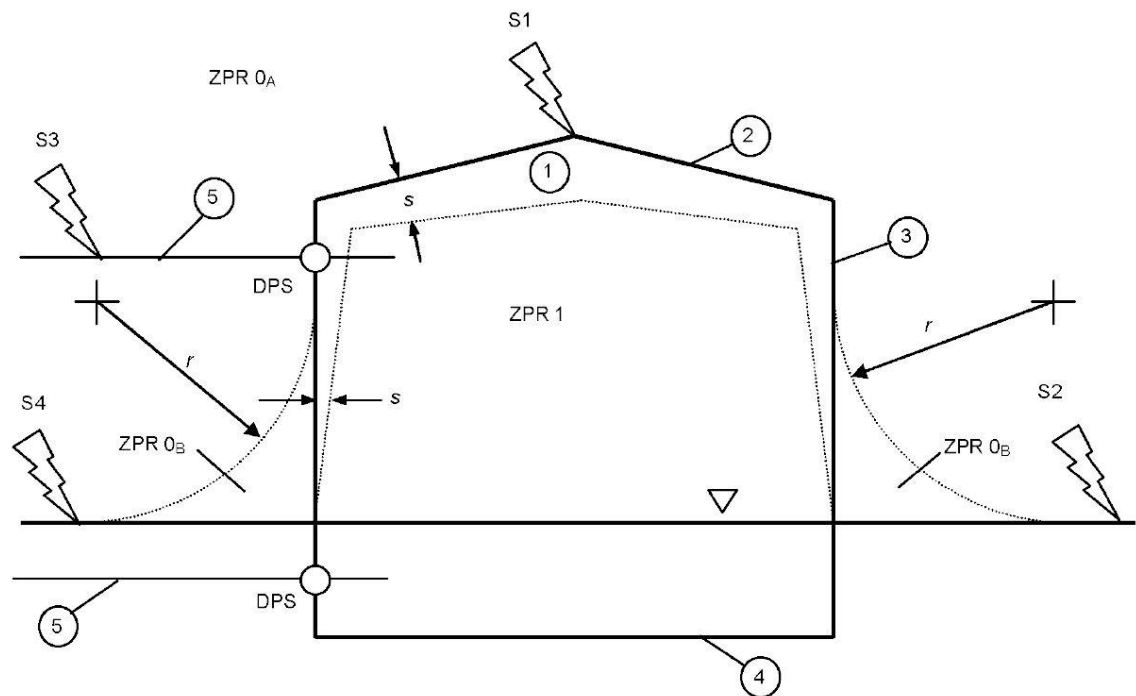
En relación con la amenaza de rayo, se definen las siguientes ZPR (LPZ) (véanse las Figuras 3 y 4):

- ZPR 0_A zona en la que la amenaza se debe a las descargas directas y a los campos electromagnéticos totales 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 la amenaza viene de los campos electromagnéticos totales 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 las interfaces aislantes y/o DPS colocados en la frontera entre zonas. El apantallado espacial adicional 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 interfaces aislantes y/o DPS adicionales en la frontera entre zonas. Pueden utilizarse apantallados 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.

Como regla general de protección, el objeto a proteger debe estar en una ZPR (LPZ) en la que las características electromagnéticas sean compatibles con la capacidad de la estructura para soportar los esfuerzos, lo que da lugar a la disminución de los daños (daños físicos, falla 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.



IEC 2614/10

Leyenda

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1 Estructura | S1 Impacto sobre la estructura |
| 2 Sistema de dispositivos de captura | S2 Impacto cerca de la estructura |
| 3 Sistema de conductores de bajada | S3 Impacto sobre una línea conectada a la estructura |
| 4 Sistema de puesta a tierra | S4 Descarga cerca de una línea conectada a la estructura |
| 5 Líneas entrantes | r Radio de la esfera rodante |
| | s Distancia de separación para evitar chispas peligrosas |

▽ Nivel del suelo

O Enlace equipotencial por medio de DPS

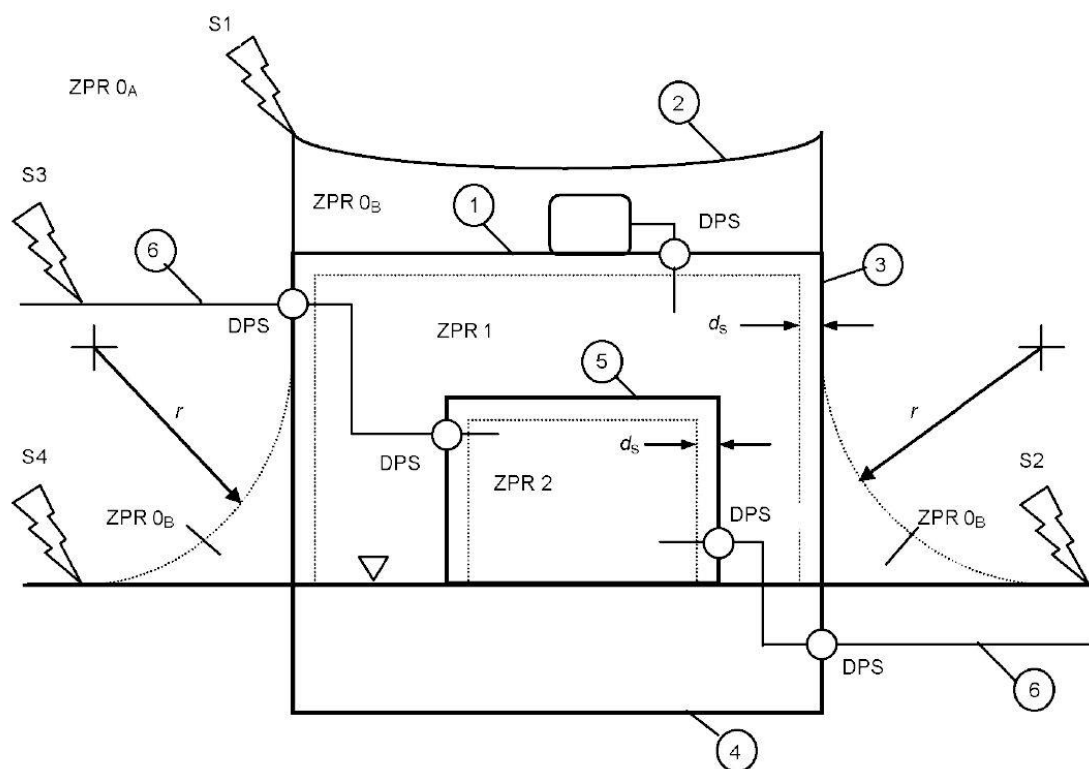
ZPR 0A Descargas directas, corriente del rayo total

ZPR 0B 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 3 - Zonas de protección contra el rayo ZPR (LPZ) definidas para un SPCR (LPS) (IEC 62305-3)



IEC 2615/10

Leyenda

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1 Estructura (pantalla de ZPR 1) | S1 Impacto sobre la estructura |
| 2 Sistema de dispositivos de captura | S2 Impacto cerca de la estructura |
| 3 Sistema de conductores de bajada | S3 Impacto sobre una línea conectada a la estructura |
| 4 Sistema de puesta a tierra | S4 Descarga cerca de una línea conectada a la estructura |
| 5 Sala (pantalla de ZPR 2) | r Radio de la esfera rodante |
| 6 Líneas conectadas a la estructura | d_s Distancia de seguridad contra campos magnéticos muy altos |
- ▽ Nivel del suelo
 O Enlace equipotencial por medio de DPS
- ZPR 0A Descargas directas, corriente del rayo total, campo magnético total
 ZPR 0B 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 4 – ZPR (LPZ) definidas por un SMPI (SPM) (IEC 62305-4)

8.4 Protección de las estructuras

8.4.1 Protección para reducir el daño físico y el peligro de muerte

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

Un SPCR (LPS) está formado por un sistema de protección externo y otro interno.

Las funciones del SPCR (LPS) externo son:

- interceptar una descarga directa sobre la estructura (con un sistema de dispositivos de captura);
- conducir la corriente de manera segura hasta tierra (por medio de un sistema de conductores de bajada);
- dispersarla en la tierra (con un sistema de puesta a tierra).

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

Se han definido cuatro tipos de SPCR (I, II, III y IV) como un conjunto de reglas de construcción, en base a los correspondientes NPR (LPL). Cada conjunto incluye reglas de construcción dependientes (por ejemplo, radio de la esfera rodante, 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 conductoras expuestas, por equipotencialización del suelo mediante una red de tierra enmallada, por carteles de advertencia y por restricciones físicas;

- en el interior de la estructura, por una enlace equipotencial de las líneas de los servicios en el punto de entrada a la estructura.

Los SPCR (LPS) deben cumplir con los requisitos de la NTP-IEC 62305-3.

8.4.2 Protección para reducir las fallas de los sistemas internos

La protección contra el IEMR (LEMP) para reducir el riesgo de falla de los sistemas internos debe limitar:

- las ondas transitorias debidas a las descargas atmosféricas en la estructura producidas por acoplamientos resistivos e inductivos;
- las ondas transitorias debidas a las descargas atmosféricas en las proximidades de la estructura producidas por acoplamientos inductivos;
- las ondas transitorias transmitidas por las líneas conectadas a la estructura producidas por las descargas atmosféricas en o en la proximidades de la líneas;
- el acoplamiento directo del campo magnético con los aparatos.

NOTA: Las fallas de los aparatos por campos magnéticos radiados directamente en el equipo son despreciables siempre y cuando los aparatos cumplan con los ensayos de emisión radiada en radiofrecuencia (RF) y de inmunidad definidos en las normas de CEM (ECM) de producto (véanse las NTP-IEC 62305-2 y NTP-IEC 62305-4).

Los sistemas a proteger deben estar colocados en el interior de una ZPR (LPZ) 1 o superior. Esto se consigue mediante medidas de protección de los sistemas eléctricos y electrónicos, consistentes en pantallas magnéticas que atenúen el campo magnético inducido y/o mediante el trazado apropiado del cableado de manera que se reduzcan los bucles de inducción. En los límites de las ZPR deben preverse, para las partes metálicas y los sistemas que crucen los límites, conexiones equipotenciales. Estas conexiones se pueden llevar a cabo mediante conductores de equipotencialización o, en caso de ser necesario, mediante dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).

Las medidas de protección para cualquier ZPR (LPZ) deben cumplir con la
IEC 62305-4.

NTP-

Una protección eficaz contra las sobretensiones, causantes de las fallas en los sistemas internos, también puede realizarse mediante interfaces aislantes y/o un sistema DPS coordinado que limite las sobretensiones a valores inferiores de los que corresponden a la tensión de impulso soportada nominal del sistema a proteger.

Las interfases aislantes y los DPS deben elegirse e instalarse conforme a los requisitos de la NTP-IEC 62305-4.

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN Y/O COMERCIALIZACIÓN

ANEXO A (INFORMATIVO)

PARÁMETROS DE LA CORRIENTE DEL RAYO

A.1 Descargas a tierra

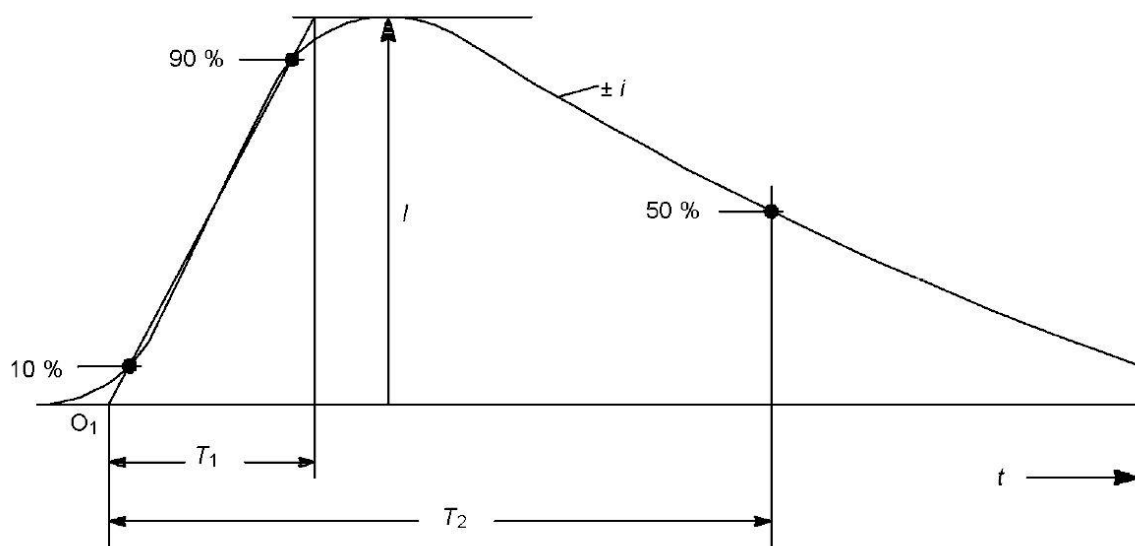
Existen dos tipos básicos de descargas:

- las descargas descendentes, iniciadas por un líder descendente desde la nube hacia tierra; y
- las descargas ascendentes, iniciadas por un líder ascendente desde una estructura en tierra hacia la nube.

La mayor parte de las descargas descendentes ocurren en terrenos llanos y en estructuras poco elevadas, mientras que las ascendentes son dominantes en estructuras expuestas y/o elevadas. La probabilidad de impacto directo aumenta con la altura efectiva de las estructuras (véase la NTP-IEC 62305-2:2010, Anexo A) y con el cambio de las condiciones físicas.

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

- impulsos con duraciones inferiores a 2 ms (Figura A.1);
- impactos largos de duración superior a 2 ms (Figura A.2).

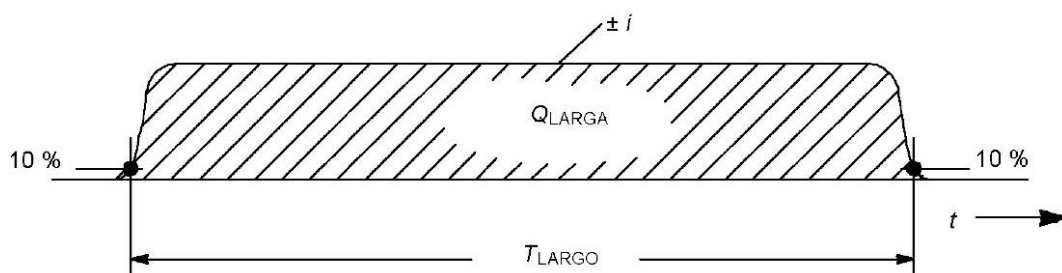


IEC 2616/10

Leyenda

- O_1 Origen virtual
 I Valor pico de la corriente
 T Tiempo del frente
 T_2 Tiempo hasta la mitad del valor

FIGURA A.1 - Definiciones de los parámetros de un impulso (normalmente $T_2 < 2$ ms)



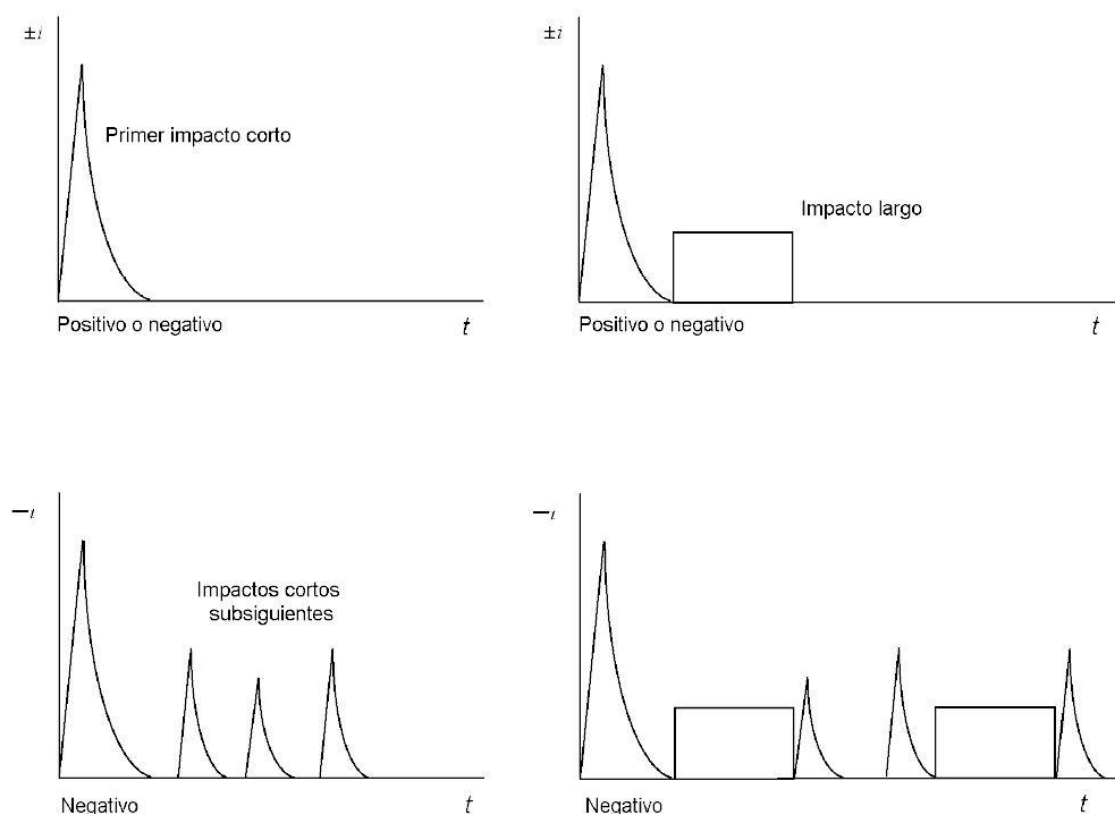
IEC 2617/10

Leyenda

- T_{LARGO} Duración
 Q_{LARGO} Carga de un impacto largo

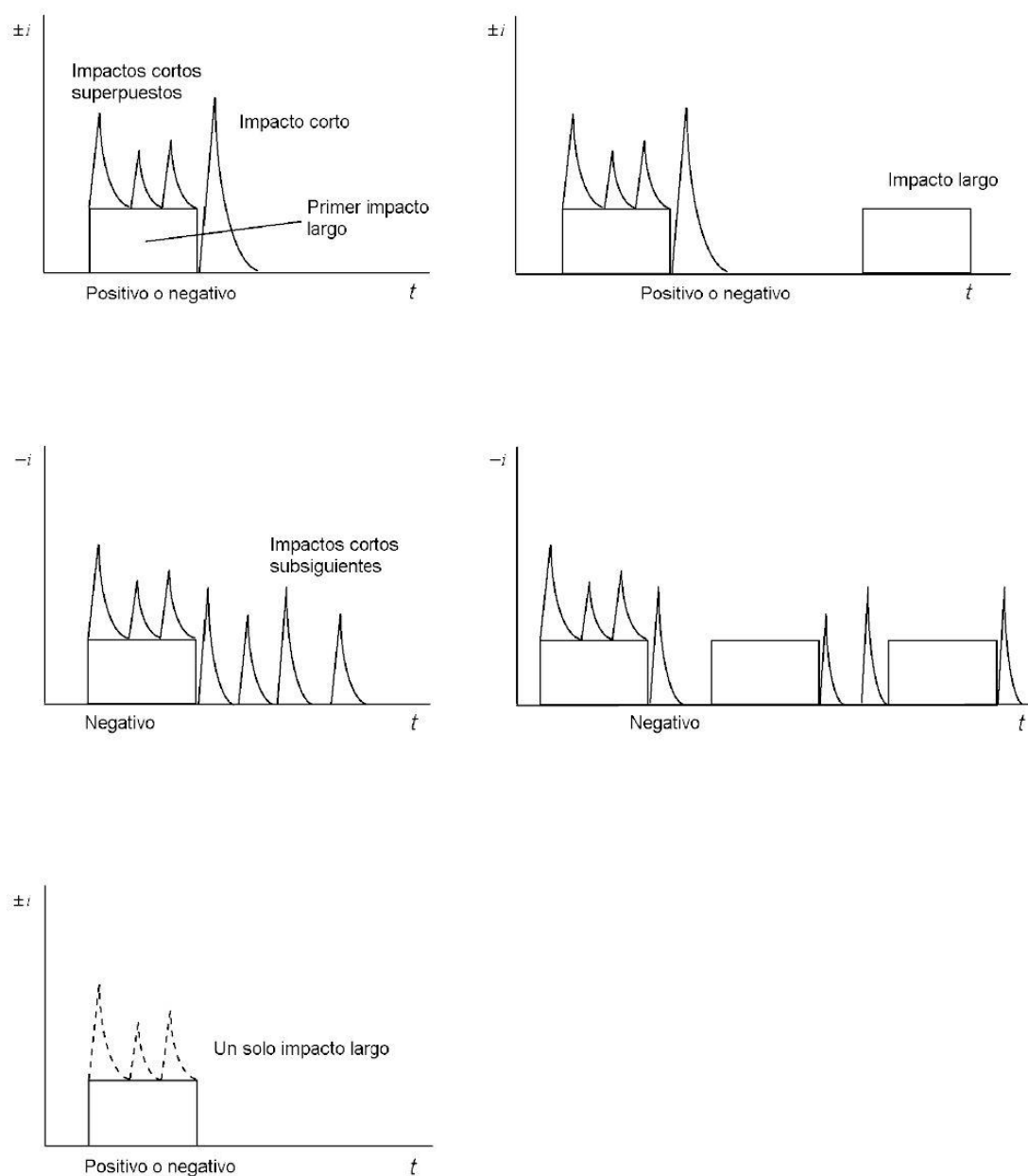
FIGURA A.2 - Definiciones de los parámetros de un impacto de larga duración (normalmente $2 \text{ ms} < T_{LARGO} < 1 \text{ s}$)

Otras diferencias entre los impactos vienen dadas 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.



IEC 2618/10

FIGURA A.3 - Posibles componentes de las descargas descendentes (típicas en terreno llano y estructuras bajas)



IEC 2619/10

**FIGURA A.4 - Posibles componentes 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. Aún no se ha confirmado una carga mayor en un impacto de larga duración de una descarga ascendente. Por tanto, se considera que los parámetros de la corriente del rayo de las descargas ascendentes están cubiertos por los valores máximos de las descargas descendentes. Actualmente está en estudio una evaluación más precisa de los parámetros del rayo en función de la altura, tanto para las descargas descendentes como ascendentes.

A.2 Parámetros de la corriente del rayo

Los parámetros de la corriente del rayo, indicados en esta parte de la serie de Normas IEC 62305, dados en la Tabla A.1, 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 $\sigma_{\log}$ correspondientes se dan en la Tabla A.2 y en la Tabla A.5 se muestra la función de distribución. Sobre esta base puede determinarse 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 del territorio. Se recomienda emplear la relación anterior en el caso de no disponer de información local más precisa.

En la Tabla A.3 se indica la probabilidad de que los valores pico de las corrientes de los rayos superen el valor previamente considerando.

TABLA A.1 - Valores tabulados de los parámetros de la corriente del rayo según CIGRE (Electra No. 41 o No. 69)^{[3]•[4]}

Parámetro	Valor fijado para el NPR I	Valores			Tipo de impacto	Línea de la Figura A.5
		95%	50%	5%		
I (kA)		4 ^a	20 ^a	90	Primer corto negativo ^b	1A + 1B
	50	4,9	11,8	28,6	Subsiguiente corto negativo ^b	2
	200	4,6	35	250	Primer corto positivo (solo)	3
Q _{DESCARGA} (C)		1,3	7,5	40	Descarga negativa	4
	300	20	80	350	Descarga positiva	5
Q _{CORTA} (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 ^b	12
		9,9	39,9	161,5	Subsiguiente corto negativo ^b	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 ^b	15
Q _{LARGO} (C)	200				Largo	
T _{LARGO} (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	

^a Los valores de I = 4 kA e I = 20 kA corresponden a una probabilidad del 98 % y del 80 % respectivamente.

^b En la revista Electra n° 69 se indican los parámetros y los valores más relevantes

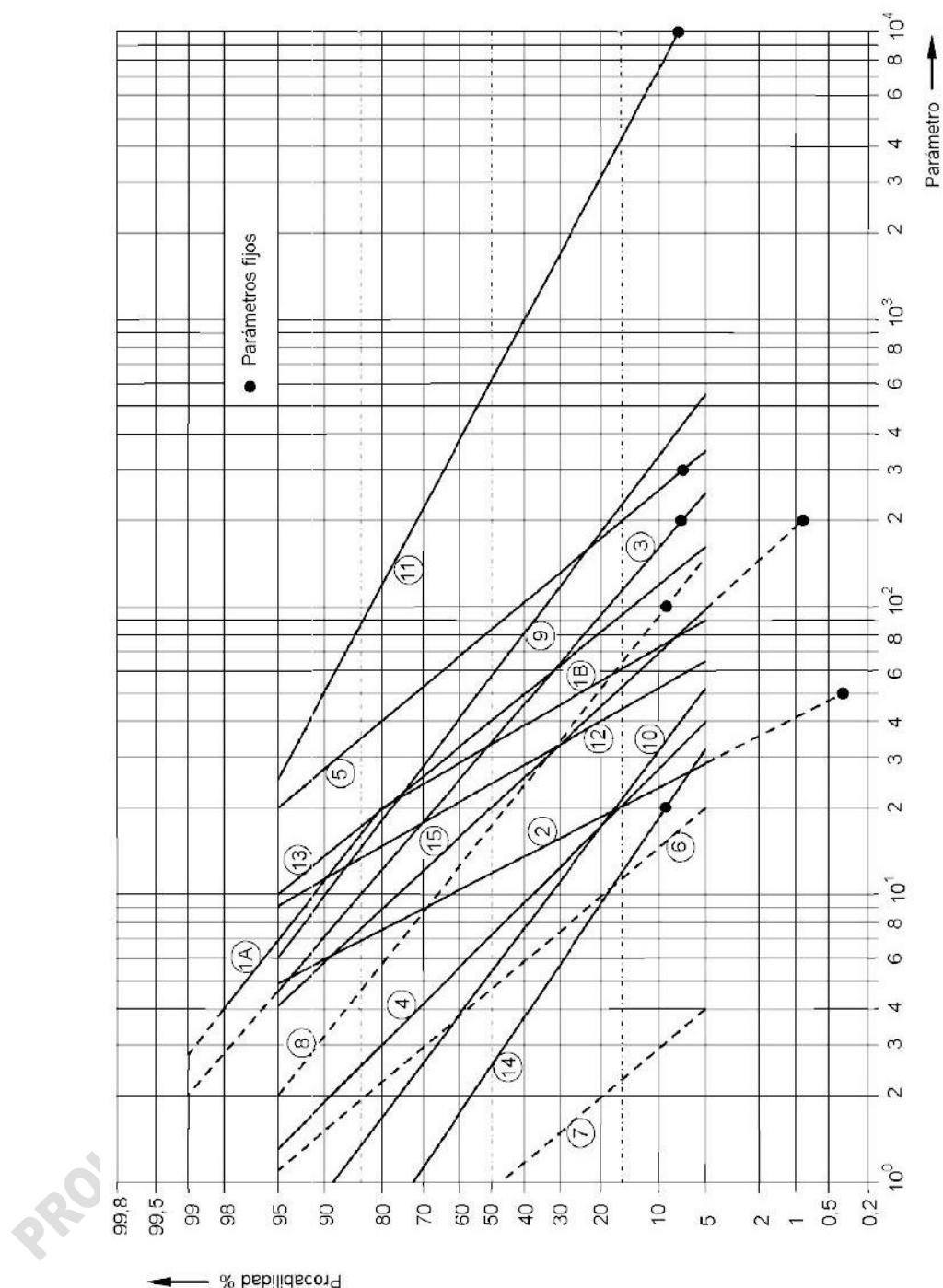
TABLA A.2 - Distribución logarítmica normal de los parámetros de la corriente del rayo - Valores medios μ y de dispersión $\sigma_{\log}$ calculados para el 95% y el 5% según CIGRE (Electra n° 41 o n° 69*)^[3], ^[4]

Parámetro	Media A	Dispersión ^a $\sigma_{\log}$	Tipo de impacto	Línea de la Figura A.5
I (kA)	(61,1)	0,576	Primer corto negativo (80%) ^b	1A
	33,3	0,263	Primer corto negativo (80%) ^b	1B
	11,8	0,233	Subsiguiente corto negativo ^b	2
	33,9	0,527	Primer corto positivo (solo)	3
Q _{DESCARGA} (C)	7,21	0,452	Descarga negativa	4
	83,7	0,378	Descarga positiva	5
Q _{CORTO} (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 ^b	12
	40,0	0,369	Subsiguiente corto negativo ^b	13
	2,53	0,670	Primer corto positivo	14
di/dt _{30%/90%} (kA/μs)	20,1	0,420	Subsiguiente corto negativo ^b	15
QLARGO (C)	200		Largo	
TLARGO (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 solo)	
	83,7	0,472	Descarga positiva	

Legenda: ^a $\sigma_{\log} = \log(X_{16\%}) - \log(X_{50\%})$, donde X es el valor del parámetro.
^b En la revista Electra n° 69 se indican los parámetros y los valores más relevantes.

TABLA A.3 - Valores de la probabilidad P como función de la corriente del rayo I

I (kA)	P
0	1
3	0,99
5	0,95
10	0,9
20	0,8
30	0,6
35	0,5
40	0,4
50	0,3
60	0,2
80	0,1
100	0,05
150	0,02
200	0,01
300	0,005
400	0,002
600	0,001



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

IEC 2620/10

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

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 valores de los parámetros del rayo se obtienen, normalmente, por medidas llevadas a cabo en estructuras altas. La distribución estadística de los valores pico de la corriente que no considera el efecto de las estructuras altas también puede obtenerse de los sistemas de localización de rayos.

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

A.3.1 Impulso positivo

Los efectos mecánicos del rayo están relacionados con el valor pico 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 en las instalaciones se producen arcos. Las sobretensiones y las chispas peligrosas, producidas por acoplamientos inductivos, están relacionadas con la pendiente media (di/dt) del frente de la corriente del rayo.

Cada uno de los parámetros (I , Q , W/R , di/dt) tiende a predominar en cada uno de los mecanismos de falla. Esto debe tenerse en cuenta cuando se establezcan los procedimientos de ensayo.

A.3.2 Impulso positivo y de larga duración

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, con probabilidades inferiores al 10%, los valores:

$$I = 200 \text{ kA}$$

$$Q_{\text{DESCARGA}} = 300 \text{ C}$$

$$Q_{\text{CORTO}} = 100 \text{ C}$$

$$W/R = 10 \text{ MJ}/\Omega$$

$$di/dt = 20 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Para un primer impulso positivo, y de acuerdo con la Figura A.1, estos valores dan una primera aproximación para la duración del frente:

$$T_1 = I / (di/dt) = 10 \mu\text{s} \text{ (} T_1 \text{ es de poco interés)}$$

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

$$Q_{\text{CORTO}} = (1/0,7) \times I \times T_2$$

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

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

$$T_2 = 350 \mu\text{s}$$

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

$$Q_{\text{LARGO}} = Q_{\text{DESCARGA}} - Q_{\text{CORTO}} = 200 \text{ C}$$

Su duración puede estimarse, de acuerdo con la Figura A.2 y a partir de los datos de la Tabla A.1 mediante:

$$T_{\text{LARGO}} = 0,5 \text{ s}$$

A.3.3 Primer impulso negativo

Para algunos acoplamientos inductivos, el primer impulso negativo se relaciona con las mayores tensiones inducidas, por ejemplo, cables situados en conductos de hormigón armado. A partir de la Figura A.5 (líneas 1 y 12), pueden tomarse, con probabilidades inferiores al 1 %, los siguientes valores:

$$I = 100 \text{ kA}$$

$$di/dt = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Estos valores, de acuerdo con la Figura A.1, dan, para el primer impulso negativo, una primera aproximación para la duración del frente de:

$$T_1 = I / (di/dt) = 1,0 \mu\text{s}$$

El tiempo hasta el valor mitad puede estimarse a partir de la duración del impacto de larga duración:

$$T_2 = 200 \mu\text{s} \text{ (} T_2 \text{ es de poco interés)}$$

A.3.4 Impulso subsiguiente

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

$$I = 50 \text{ kA}$$

$$di/dt = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

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

$$T_1 = 1 / (di/dt) = 0,25 \mu s$$

El tiempo hasta la mitad del valor puede estimarse a partir de la duración del impacto o de los impulsos negativos subsiguientes:

$$T_2 = 100 \mu s \text{ (} T_2 \text{ es de poco interés)}$$

A.4 Fijación de los parametros mínimos de la corriente del rayo

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

Siguiendo el modelo electrogeométrico, el radio de la esfera rodante r (distancia que corresponde al salto final) está correlacionado con el valor pico de la corriente del primer impulso de corriente. En el informe de un grupo de trabajo de la IEEE ^[5] se da la siguiente relación:

$$r = 10 \times I^{0.65} \quad (\text{A.1})$$

donde

r es el radio de la esfera rodante (m);
 I es el valor pico de la corriente (kA).

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

ANEXO B (INFORMATIVO)

FUNCIONES DE TIEMPO DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ANÁLISIS

Las formas de ondas de la corriente:

- del primer impulso positivo 10/350 μ s;
- del primer impulso negativo 1/200 μ s;
- de los impulsos negativos subsiguientes 0,25/100 μ s;

se pueden definir mediante:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} \times \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (\text{B.1})$$

donde

I es el valor pico de la corriente;

k es el factor de corrección de la corriente pico;

t es el tiempo;

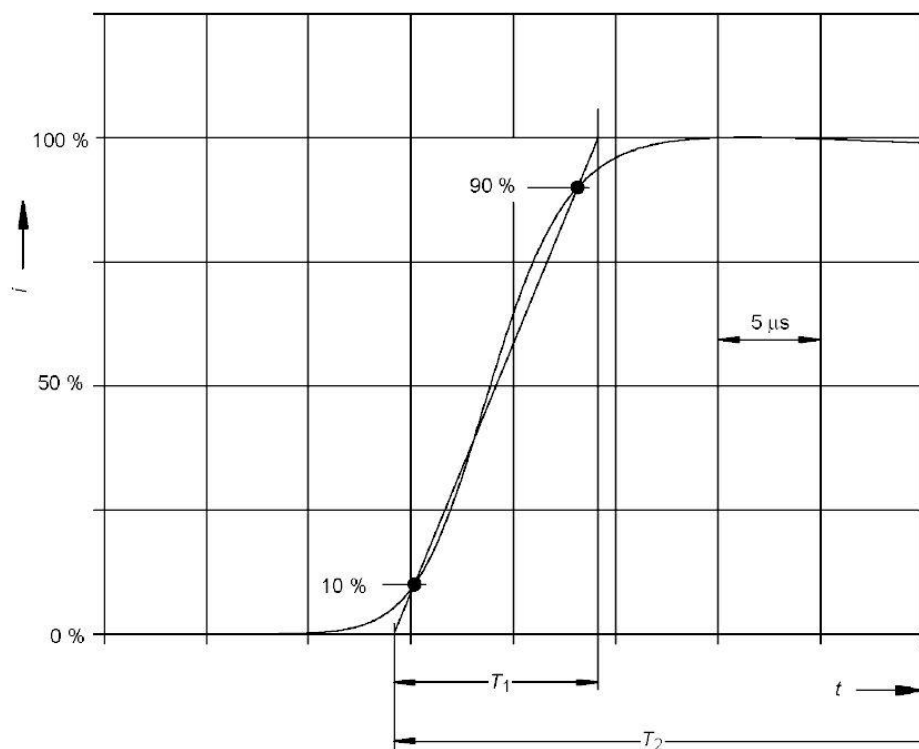
T_1 es la constante de tiempo del frente;

T_2 es la constante de tiempo de la cola.

Los parámetros indicados en la Tabla B.1 son aplicables, para los diversos niveles de protección, a las formas de onda de las corrientes del primer impulso positivo, del primer impulso negativo y a los subsiguientes impulsos negativos. Las curvas analíticas en función del tiempo están representadas en las Figuras B.1 a B.6.

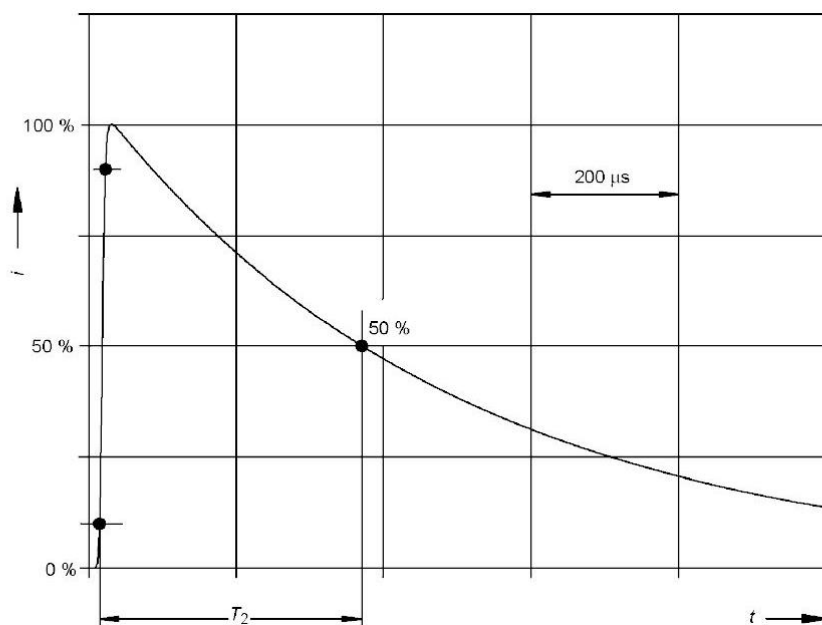
TABLA B.1 — Parámetros de la ecuación B.1

Parámetros	Primer impulso positivo			Primer impulso negativo			Impulso negativo subsiguiente		
	NPR			NPR			NPR		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	100	75	50	50	37,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
T ₁ (μs)	19	19	19	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
T ₂ (μs)	485	485	485	285	285	285	143	143	143



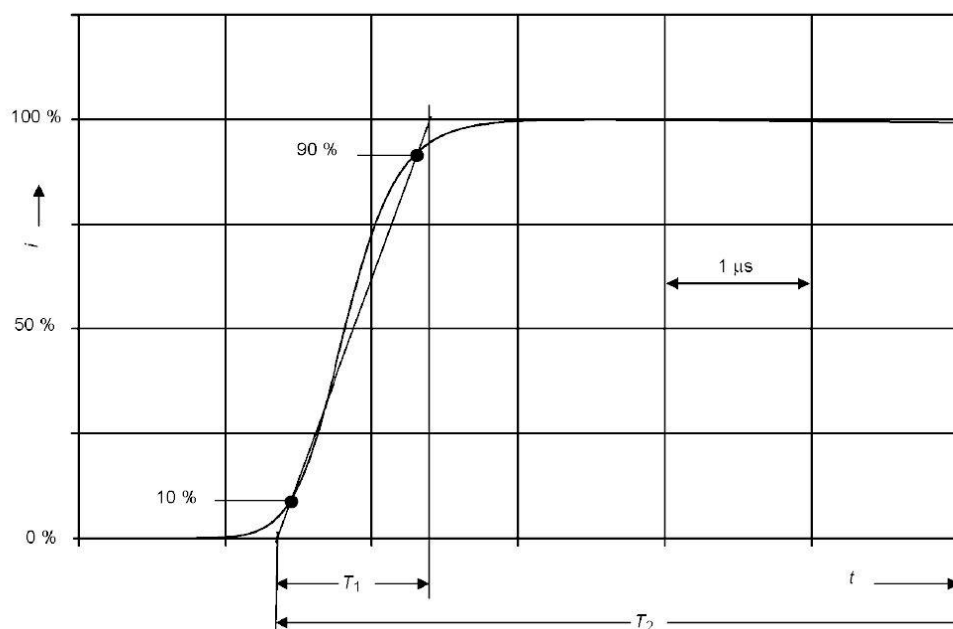
IEC 2621/10

FIGURA B.1 - Forma del aumento de la corriente del primer impulso positivo



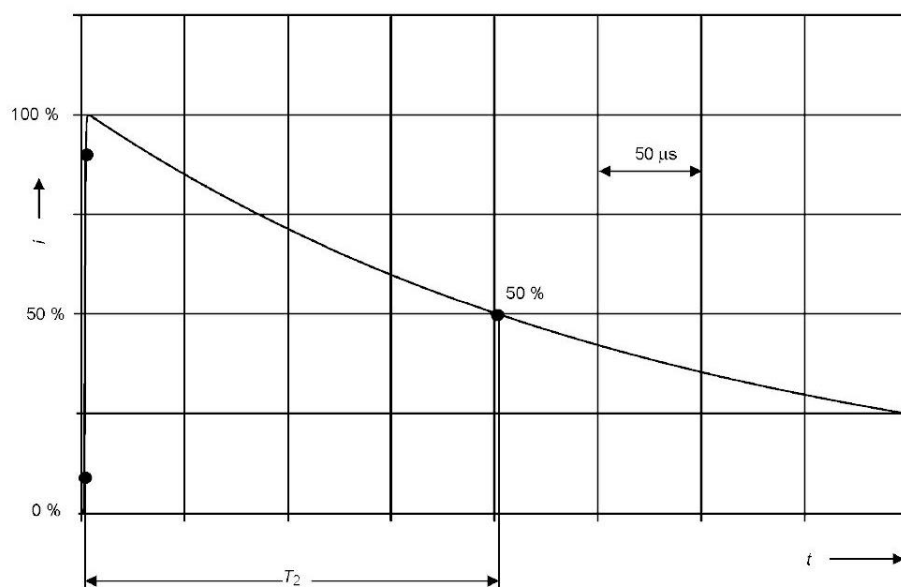
IEC 2623/10

FIGURA B.2 - Forma de la cola de la corriente del primer impulso positivo



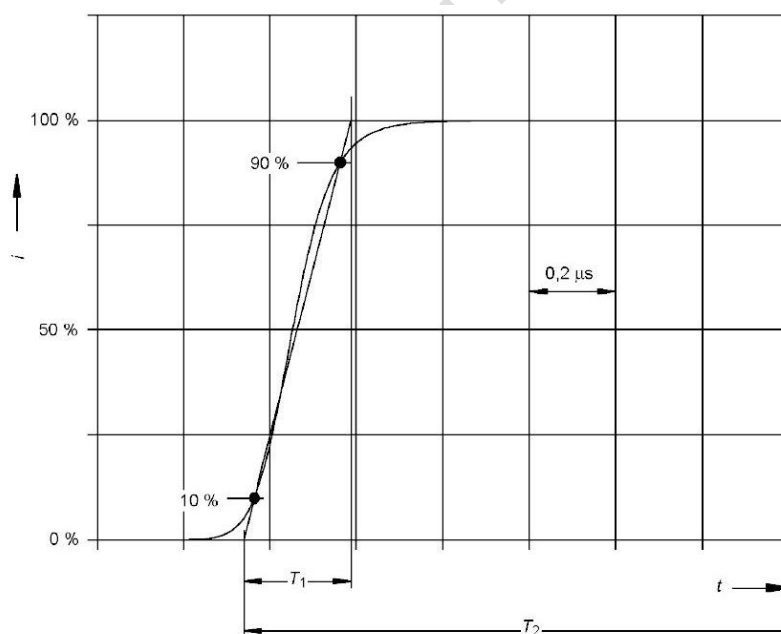
IEC 2624/10

FIGURA B.3 - Forma del aumento de la corriente del primer impulso negativo



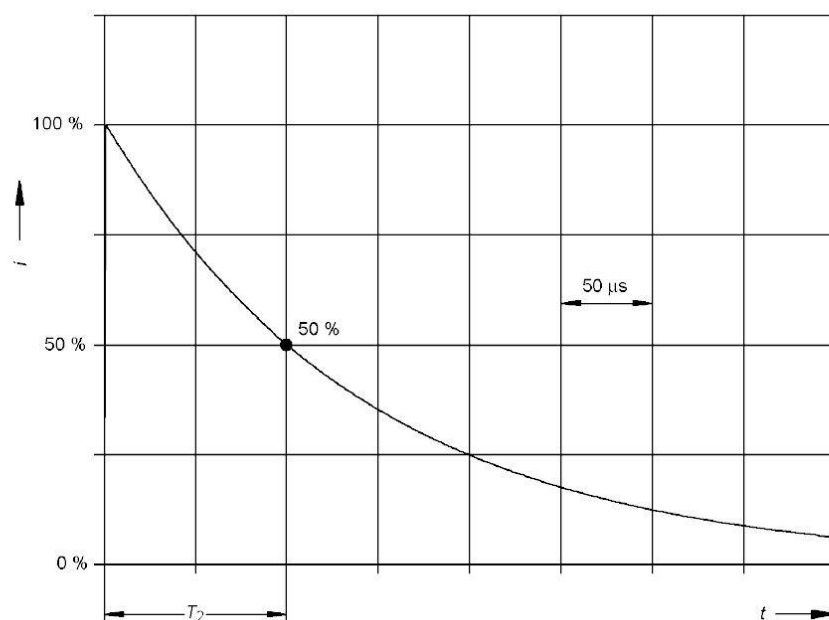
IEC 2624/10

FIGURA B.4 - Forma de la cola de la corriente del primer impulso negativo



IEC 2626/10

FIGURA B.5 - Forma del aumento de corriente de los impulsos negativos subsiguientes



IEC 2627/10

FIGURA B.6 - Forma de la cola de los impulsos negativos subsiguientes

El impacto de larga duración puede describirse mediante una onda rectangular de valor medio de la corriente I y con una duración T_{LARGO} de acuerdo con la Tabla 3.

Los valores de la amplitud de la densidad de la corriente del rayo pueden deducirse a partir de las curvas analíticas como función del tiempo (Figura B.7).

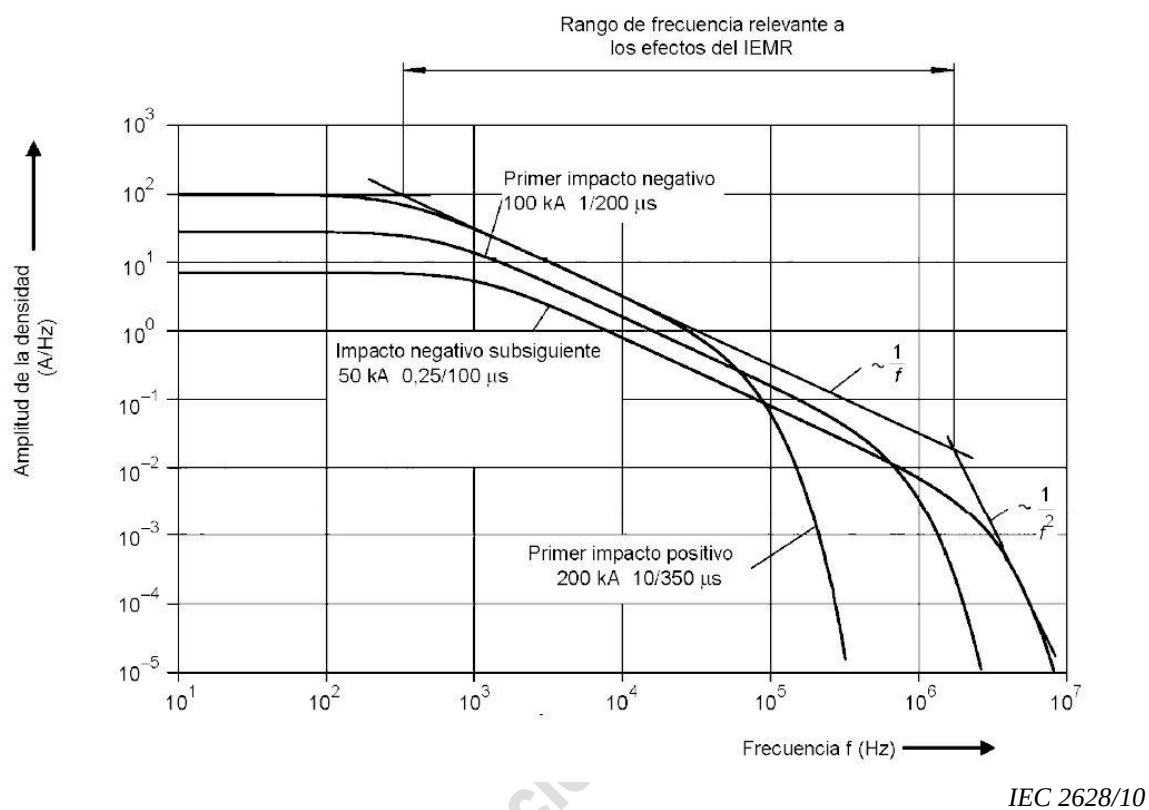


FIGURA B.7 - Amplitud de la densidad de la corriente del rayo para el NPR I

ANEXO C (INFORMATIVO)

SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DEL RAYO CON FINES DE ENSAYO

C.1 Generalidades

Si un rayo impacta en una estructura, la corriente del rayo se distribuye dentro de ella. Este fenómeno se debe tener en cuenta cuando se realizan ensayos individuales de los componentes de las medidas de protección, 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 impulso positivo y de la carga del impacto de larga duración

Los parámetros de ensayo están definidos en las Tablas C.1 y C.2, mostrándose en la Figura C.1 un ejemplo de un generador de ensayo. Este generador puede emplearse para simular la energía específica del primer impulso positivo combinada con la carga del impacto de larga duración.

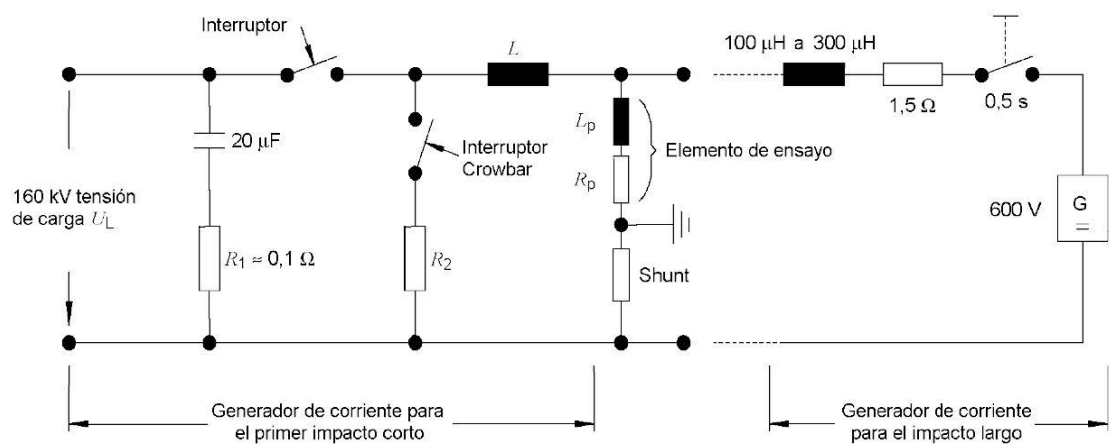
Los ensayos se pueden utilizar para valorar la integridad mecánica y la ausencia de calentamientos no deseados y los efectos debidos a las fusiones.

Los parámetros de ensayo relevantes para la simulación del primer impulso positivo (valor pico de la corriente I , energía específica W/R y carga Q_{CORTO}) están indicados en la Tabla C.1. Estos parámetros deberían obtenerse en el 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 relevantes para la simulación del impacto de larga duración (carga Q_{LARGO} y duración T_{LARGO}) están indicados en la Tabla C.2.

Dependiendo del tipo de ensayo y de los mecanismos de daño previstos, los ensayos para el primer impacto positivo o el impacto de larga duración pueden aplicarse en un ensayo individual o combinado, realizándose el ensayo del impacto de larga duración inmediatamente después del ensayo del primer impulso. Los ensayos de fusión por arco deberían realizarse empleando ambas polaridades.

NOTA: El primer impulso negativo no se emplea con fines de ensayo.



IEC 2647/10

NOTA: Los valores son aplicables a un NPR I.

FIGURA C.1 - Ejemplo de un generador de ensayo para la simulación de la energía específica del primer impulso positivo y la carga del impacto de larga duración

TABLA C.1 - Parámetros de ensayo del primer impacto de corta duración

Parámetros de ensayo		NPR			Tolerancia %
		I	II	III - IV	
Valor pico de la corriente I	(kA)	200	150	100	± 10
Carga Q_{CORTO}	(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	NPR			Tolerancia %
	I	II	III - IV	
Carga Q_{LARGO} (C)	200	150	100	±20
Duración T_{LARGO} (S)	0,5	0,5	0,5	±10

C.3 Simulación de la pendiente del frente de los impulsos

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 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 relevantes para la simulación de la pendiente. En las Figuras C.3 y C.4 se muestran ejemplos de generadores de ensayo (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 impulso positivo y un impulso negativo subsiguiente.

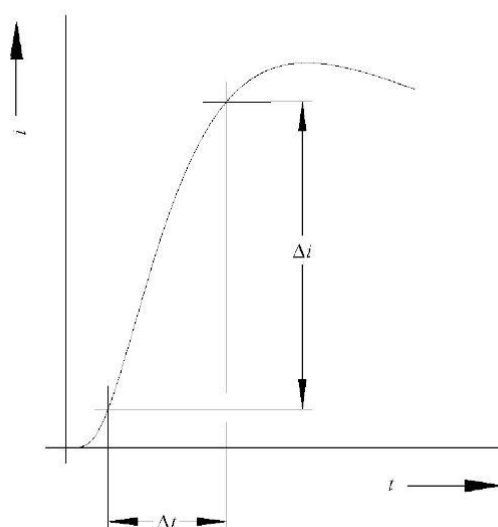
NOTA: Esta simulación cubre la pendiente del frente de los impulsos. La cola de la corriente no tiene influencia en este tipo de simulación.

La simulación conforme con el 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 de ensayo que simulan los efectos del rayo sobre los componentes de un SPCR (LPS), véase el Anexo D.

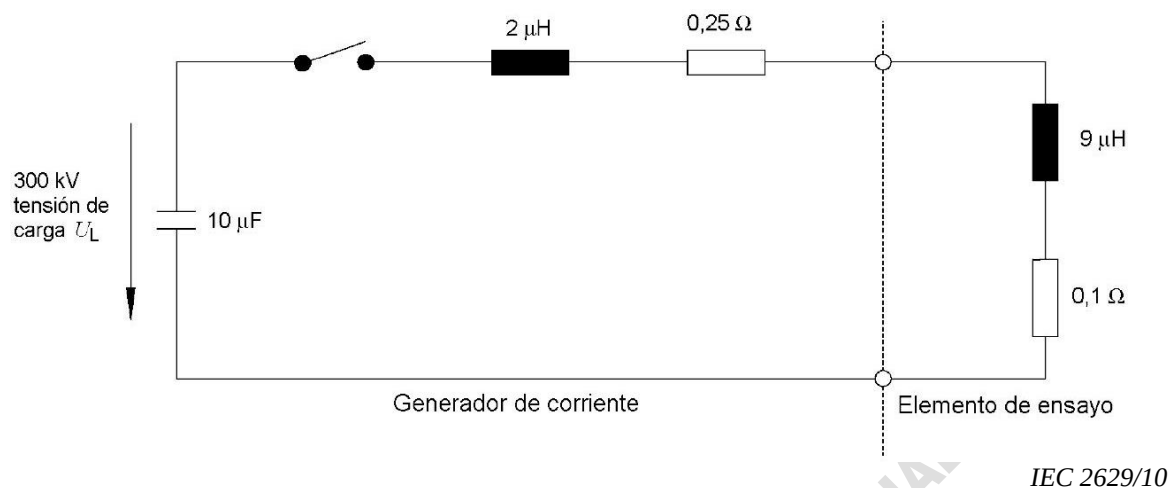
TABLA C.3 - Parámetros de ensayo de los impulsos

Parámetros de ensayo	NPR			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



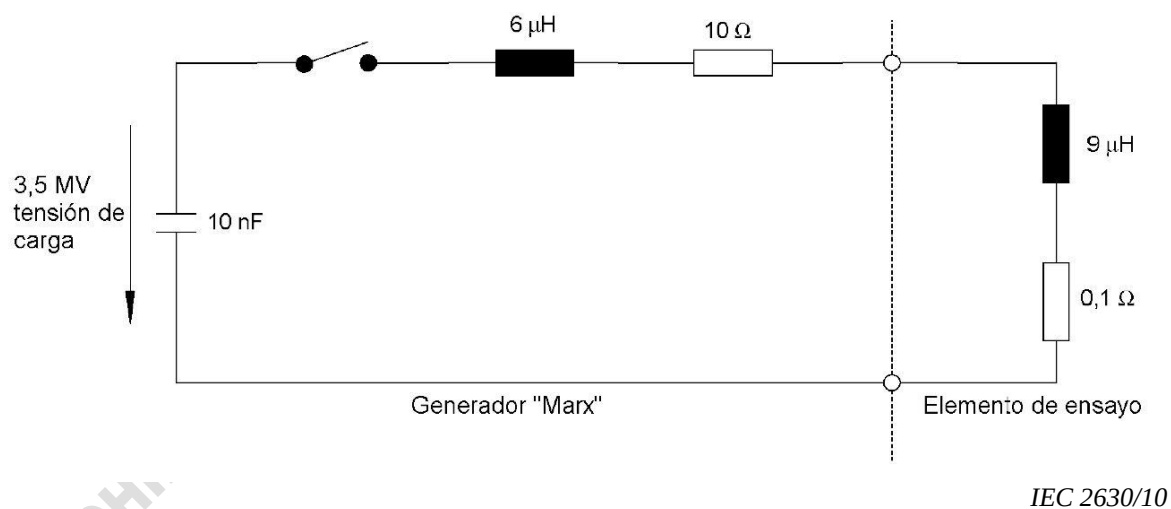
IEC 2628/10

FIGURA C.2 - Definición de la pendiente de la corriente de acuerdo con la tabla C.3



NOTA: Estos valores se aplican a un NPR I.

FIGURA C.3 - Ejemplo de generador de ensayo para la simulación de la pendiente del frente del primer impulso positivo para grandes elementos de ensayo



NOTA: Estos valores se aplican a un NPR I.

FIGURA C.4 - Ejemplo de generador de ensayo para la simulación de la pendiente del frente de los impulsos subsiguientes negativos para grandes elementos de ensayo

ANEXO D (INFORMATIVO)

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

D.1 Generalidades

Este Anexo D contiene los parámetros básicos que deben emplearse 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 relevantes para los sistemas (por ejemplo, la coordinación de los dispositivos de protección contra ondas transitorias) no se consideran en este anexo.

D.2 Parámetros relevantes de la corriente en el 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, el valor pico de la corriente 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 falla, como se analiza a continuación en detalle. Los parámetros de la corriente a tener en cuenta en los ensayos son combinaciones de estos valores, elegidos para simular en el laboratorio el mecanismo de falla 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.

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 NPR

Componente	Problema principal	Parámetros del rayo					Notas
Dispositivo de captura	Erosión en el punto de impacto (por ejemplo placas metálicas delgadas)	NPR	Q_{LARGO} C	T			
		I II III-IV	200 150 100	< 1 s (aplicar Q_{LARGO} en un solo impacto)			
Sistemas de dispositivos de captura y conductores de bajada	Calentamiento óhmico	NPR	W/R kJ/Q	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 ms (aplicar I y W/R en un impulso solo)		
Tomas de tierra	Erosión en el punto de impacto	NPR	Q_{LARGO} C	T			Dimensionamiento determinado por los aspectos mecánicos y químicos (corrosión, etc.)
		I II III-IV	200 150 100	< 1 s (aplicar Q_{LARGO} en un solo disparo)			
DPS con explosores	Efectos combinados (térmicos, mecánicos y arcos)	NPR	I kA	Q_{CORTO} C	W/R kJ/Ω	di/dt kA/μs	Aplicar I, Q_{CORTO} 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	

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 NPR (Continuación)

Componente	Problema principal	Parámetros del rayo					Notas
DPS con varistores	Efectos energéticos (sobrecargas)	NPR	Q_{CORTA} C				Deben verificarse ambos aspectos Pueden considerarse ensayos por separado
		I	100				
		II	75				
	Efectos dieléctricos (contorneamientos/perforaciones)	III-IV	50				
		NPR	I kA	T			
		I	200	< 2 ms (aplicar I en un solo impulso)			
		II	150				
		III-IV	100				

D.3 Reparto de corriente

Los parámetros dados en la Tabla D.1 son, en el punto de impacto, relevantes para la corriente del rayo. 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 entran, por lo general, diferentes tipos de líneas (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 específicos de un SPCR (LPS) debe tenerse en cuenta el reparto de la corriente. Debería evaluarse, preferentemente, la amplitud y la forma de onda de la corriente a través de un componente del SPCR 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 k_c (véase el Anexo C de la NTP-IEC 62305-3:2010). Este factor da una estimación del reparto de la corriente que circula por los conductores de bajada del SPCR externo 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 pico 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:

$$I_p = k \times I \quad (D.1)$$

$$Q_p = k \times Q \quad (D.2)$$

$$(W/R)_p = k^2 \times (W/R) \quad (D.3)$$

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

donde:

- x_p es el valor de la cantidad considerada [corriente pico I_p , carga Q_p , energía específica $(W/R)_p$, pendiente de la corriente $(di/dt)_p$] relevante para 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)] relevante para 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 NTP-IEC 62305-3:2010);
 - 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 y daños posibles

D.4.1 Efectos térmicos

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

D.4.1.1 Calentamiento resistivo

Un calentamiento resistivo tiene lugar en cualquier componente de un SPCR (LPS) 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, deben tenerse en cuenta para las partes expuestas a las condiciones atmosféricas la resistencia mecánica y el criterio de durabilidad 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, y 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:

$$P(t) = i^2(t) \times R \quad (D.5)$$

La energía térmica generada por el impulso completo del rayo en el componente del SPCR considerado, es igual a la resistencia óhmica de la trayectoria del rayo, multiplicado por la energía específica del impulso. Esta energía se expresa en Joules (J) o en Watts/segundo (Wxs).

$$W = R \times \int i^2(t) \times dt \quad (D.6)$$

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 (LPS) puede evaluarse mediante:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{W}{R} \times \alpha \times \rho_0 \right) - 1 \right] \quad (D.7)$$

Los valores característicos de los parámetros físicos de diferentes materiales empleados en un SPCR (LPS), referenciados en la ecuación D.7, se indican en la tabla D.2 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/Q);

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);

C_s es el calor latente de fusión (J/kg);

θ_s es la temperatura de fusión ($^{\circ}C$).

TABLA D.2 - Características físicas de materiales típicos empleados en los componentes de un SPCR

Característica	Material			
	Aluminio	Acero dulce	Cobre	Acero inoxidable ^a
ρ_0 (Ωm)	29×10^{-9}	120×10^{-9}	$17,8 \times 10^{-9}$	700×10^{-9}
α (1/K)	$4,0 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$3,92 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-3}$
γ (kg/m^3)	2 700	7 700	8 920	8 000
θ_s ($^{\circ}C$)	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

^a Austenítico no magnético.

La Tabla D.3 indica, como ejemplo de aplicación de esta ecuación, el calentamiento de los conductores de diferentes materiales en función de la W/R y de la sección del conductor.

TABLA D.3 — Calentamiento de conductores de diferentes secciones en función de W/R

Sección mm ²	Material											
	Aluminio			Acero dulce			Cobre			Acero inoxidable ^a		
	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

^a Austenítico no magnético.

Un impacto de rayo típico se caracteriza por un impacto de corta duración (tiempo hasta la mitad del orden de algunos 100 μs) y un valor pico 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 dinámica de los conductores del SPCR) y las condiciones 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.

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 de captura, explosores, etc.

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 importante cantidad de calor, así como un fuerte calentamiento óhmico 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. El calor generado en la zona próxima a la raíz del arco es superior al que, por conducción, puede absorber el material, perdiéndose el exceso bien por radiación, bien por fusión o bien 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-o-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-o-cátodo

La energía W que entra 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:

$$W = \int_0^{\infty} u_{a,c}(t) i(t) dt = u_{a,c} \int_0^{\infty} |i(t)| dt \quad (D.8)$$

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-o-cátodo $u_{a,c}$ es del orden de algunas decenas de voltios.

Considerando una aproximación simplificada que toda la energía desarrollada en el punto donde se genera el arco se emplea solamente para la fusión del material, se puede calcular, mediante la ecuación (D.9), el volumen de material fundido (valor sobreestimado).

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

donde:

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

$u_{a,c}$ es la caída de tensión ánodo-o-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 ($^{\circ}C$);

θ_u es la temperatura ambiente ($^{\circ}C$);

C_s es el calor latente de fusión (J/kg).

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

Básicamente, la carga considerada es la suma de la carga del impacto de retorno y la de la corriente continuada del rayo. La experiencia de los laboratorios indica que los efectos de la carga del impacto de retorno son de menor importancia que los debidos a la carga de la corriente continuada.

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 de un SPCR (LPS) que se encuentran en contacto uno con otro, cuando sea procedente.

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 tanto de la amplitud de la corriente del rayo como de la configuración geométrica del circuito. El efecto mecánico de estas fuerzas, sin embargo, 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:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \times i^2(t) \times \frac{l}{d} = 2 \times 10^7 \times i^2(t) \times \frac{l}{d} \quad (D.10)$$

donde

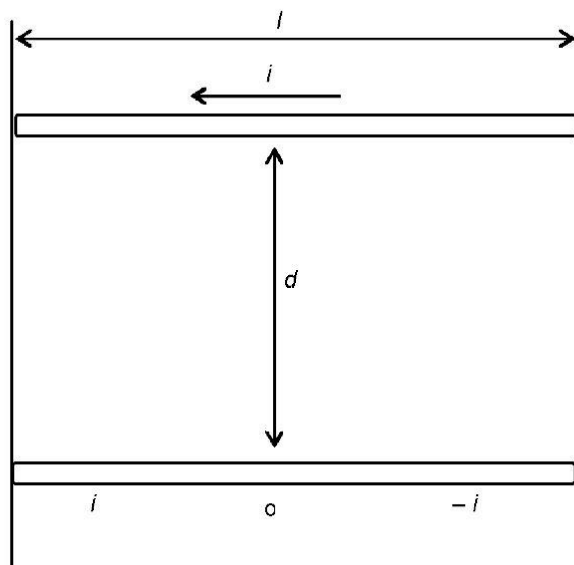
$F(t)$ es la fuerza electrodinámica (N);

i es la corriente (A);

μ_0 es la permeabilidad magnética del espacio libre (vacío) ($4 \pi \times 10^{-7}$ H/m);

l es la longitud de los conductores (m);

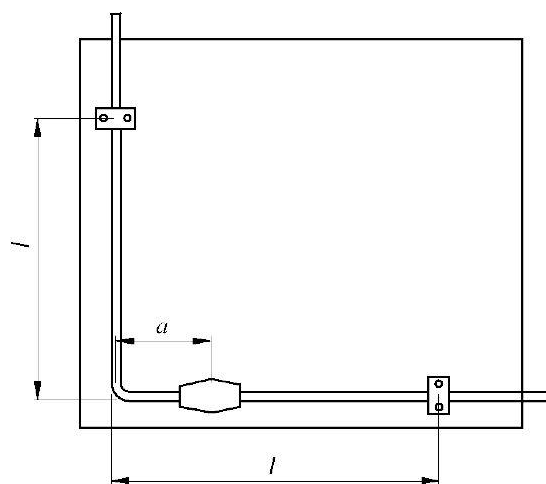
d es la distancia entre las ramas en paralelo del conductor (m).



IEC 2631/10

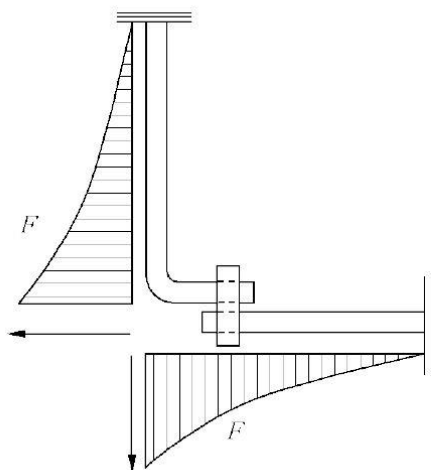
FIGURA D.1 - Disposición general de dos conductores para el cálculo de las fuerzas electrodinámicas

Un ejemplo típico en un SPCR es el dado por la disposición en esquina simétrica de los conductores formando un ángulo de 90° con una fijación en las proximidades de la esquina, 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. El valor numérico de la fuerza a lo largo de un conductor horizontal, considerando un valor pico de la corriente de 100 kA y una longitud vertical del conductor de 0,5 m, está indicado en la Figura D.4.



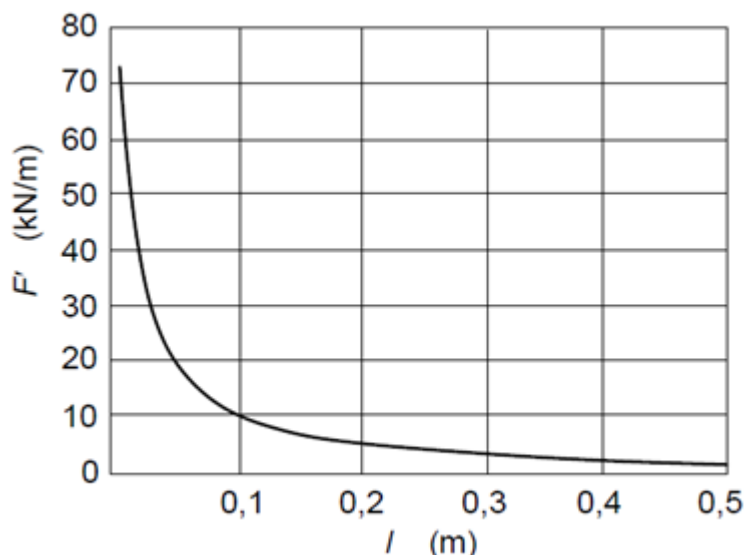
IEC 2632/10

FIGURA D.2 - Disposición típica de los conductores de un SPCR



IEC 2633/10

FIGURA D.3 - Diagrama de los esfuerzos F para la configuración de la Figura D.2



IEC 2634/10

NOTA: El valor pico de la corriente es 100 kA y longitud del conductor vertical es 0,5 m.

FIGURA D.4 - Fuerza por unidad de longitud F 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 tiene 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, siendo el factor esencial la relación entre la duración del impulso de corriente y el período de la oscilación mecánica natural de la estructura. La condición típica encontrada en las aplicaciones de los SPCR consiste de períodos de oscilación mecánica natural de la estructura mucho mayores 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 pico inferior a la fuerza aplicada. En la mayoría de los casos puede despreciarse el esfuerzo mecánico máximo.

Las deformaciones plásticas aparecen cuando el esfuerzo de tensión es superior al límite elástico del material. Si los materiales que forman la estructura del 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 tanto, 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 por un arco se produce una onda de choque. La severidad del choque depende del valor pico y de la pendiente de la corriente.

Por lo 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.4.3 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 debidos solo a los esfuerzos mecánicos. En caso extremo, el conductor se podría fundir de manera explosiva y producir daños importantes en la estructura que le rodea. Si la sección del material es suficiente para soportar estos fenómenos de manera segura, sólo debe comprobarse la integridad mecánica.

D.4.4 Chispas

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

Pueden aparecer dos tipos de chispas, a saber, la chispa térmica y la chispa eléctrica por tensión. La chispa térmica ocurre cuando una alta corriente se ve forzada a atravesar una junta entre dos materiales conductores. La mayor parte de las chispas térmicas ocurren cerca de 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 trayectos enrevesados, por ejemplo, en el caso de una junta se puede producir la chispa si la tensión inducida en un bucle que forma el circuito es superior a la rigidez dieléctrica existente entre las partes metálicas. La tensión inducida es proporcional a la autoinducción propia multiplicada por la pendiente de la corriente del rayo. Por tanto, el componente de la corriente del rayo más crítico para la chispa eléctrica es el impacto negativo subsiguiente.

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

D.5.1 Generalidades

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

D.5.2 Dispositivo de captura

Los efectos de los esfuerzos debidos al rayo sobre los dispositivos de captura son tanto mecánicos como térmicos (como se indica a continuación en el apartado D.5.3, considerando que un alto porcentaje de la corriente del rayo circula por el dispositivo de captura 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 (donde puede aparecer perforaciones o elevaciones excesivas de la temperatura) y los conductores suspendidos.

A 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.5.3 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 uno de otro o cuando la corriente cambia de dirección (curvas o conexiones entre conductores que forman ángulo dado entre sí).

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

D.5.3.1 Calentamiento resistivo

Los cálculos y las 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 numerosos autores. Los resultados más importantes, en forma de gráficos y fórmulas, están indicados en el apartado D.4.1.1. Por lo que, para verificar el comportamiento del conductor frente al calentamiento, 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:

- 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 ambientales que rodean al conductor considerado. 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.5.3.2 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.

La situación típica en la que puede presentarse un efecto visible es en la que el conductor forma un bucle o está doblado. 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 mecánica 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 este Proyecto de Norma Técnica Peruana.

En todos los casos en que sea necesario un ensayo (especialmente en materiales blandos), se deberían tener en cuenta las consideraciones que se indican a continuación. Se tendrán en cuenta los 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.

En términos de desplazamientos, 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.

- 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 pico 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 pico 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.5.3.3 Componentes de conexión

Los componentes de conexión entre conductores adyacentes de un SPCR (LPS) son puntos débiles posibles, tanto desde el punto de vista mecánico como térmico cuando se produzcan esfuerzos muy 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 los conductores, lo que resulta en la desconexión. 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 pequeñas superficies de contacto tiene un efecto notable.

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

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

Los valores máximos del impulso de corriente determinan la fuerza máxima, o cuando la fuerza de tracción electrodinámica sobrepasa la fuerza de rozamiento, la longitud del 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 son sobrepasadas y tiene un papel importante en el fenómeno de transferencia de calor en el material.

D.5.3.4 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, es de menor importancia la erosión de los electrodos por arco. Debe considerarse, que al contrario que el dispositivo de captura, 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 deberían considerarse dos parámetros de ensayo importantes:

- 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 ondas transitorias (DPS)

D.6.1 Generalidades

Los efectos de los esfuerzos del rayo en los DPS dependen del tipo de DPS considerado con especial referencia a la presencia o no de explosores.

D.6.2 DPS con explosores

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

- erosión 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, por separado, estos efectos porque ambos están relacionados con los principales parámetros de la corriente del rayo por medio de relaciones complejas.

Para los explosores, los ensayos en los laboratorios deben realizarse de manera tal que representen, de la manera más ajustada posible, los parámetros apropiados de la corriente del rayo en las situaciones más críticas, es decir todos 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 pico de la corriente, la carga, la duración, la energía específica y la pendiente del impulso de corriente.

El valor pico 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.

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 desprejarse 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 el auto compresión magnética del arco y la física del chorro de plasma del electrodo desarrollado en la interface 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 amplitud de la posible corriente del circuito de potencia que puede circular debe tomarse en consideración por ser un factor de esfuerzo importante.

D.6.3 DPS 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 falla, producido por fenómenos diferentes y debido a diferentes parámetros. La falla de los DPS de óxidos metálicos está unida a su característica más débil, por lo que es improbable que se produzca una sinergia entre los diferentes esfuerzos dañinos. Parece, por tanto, aceptable realizar ensayos por separado para comprobar el comportamiento para cada condición de falla.

Las sobrecargas se deben a que el dispositivo 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 DPS instalados en los sistemas de alimentación se considera que la corriente inyectada por el sistema de alimentación y, que circula una vez desaparecida la acción del rayo, puede jugar un papel importante en la destrucción de los DPS. Finalmente, un DPS puede dañarse definitivamente por inestabilidad térmica bajo la tensión aplicada que está relacionada con el coeficiente negativo de temperatura de la característica volt/ampere 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 de resistencia de óxido metálico (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 falla se pone en evidencia, generalmente, por un cebado externo a lo largo de la abrazadera, penetrando, en algunas ocasiones, en el bloque de las resistencias produciendo una grieta o un orificio perpendicular a la abrazadera. Las fallas están relacionadas principalmente con la falla del dieléctrico de la abrazadera del bloque de resistencias.

Para la simulación de este fenómeno debido al rayo, deberían considerar fundamentalmente dos parámetros: el valor pico de la corriente y la duración del impulso de corriente.

El valor máximo de la corriente de impulso determina, para el correspondiente nivel de tensión residual, si se sobrepasa la rigidez dieléctrica de la abrazadera 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 la abrazadera de las resistencias.

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 durante 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 deberían calcularse considerando el reparto de corriente tenido en cuenta mediante el factor de distribución de corriente, tal 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 debidos al reparto de corriente, tal como se indica en las fórmulas del Capítulo D.3

ANEXO E (INFORMATIVO)

ONDAS TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR EL RAYO EN DIFERENTES PUNTOS DE LA INSTALACIÓN

E.1 Introducción

Para dimensionar los conductores, los DPS y los aparatos, debería determinarse la amenaza que representan las ondas transitorias en puntos determinados de la instalación. Las ondas transitorias pueden originarse por las corrientes del rayo (parcial) o por inducciones en los bucles existentes en la instalación. La amenaza de estas ondas transitorias 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.2 Ondas transitorias por descargas en la estructura (fuente de daño S1)

E.2.1 Onda transitoria que provienen 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 DPS conectados.

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

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

- del número de caminos paralelos;
- de la impedancia convencional de puesta a tierra para las partes enterradas, o, en el caso de elementos aéreos, de la resistencia de puesta a tierra donde estos elementos aéreos se conectan a tierra;

- de la impedancia convencional de tierra del sistema de puesta a tierra.

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

• para las instalaciones aéreas
$$k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z \times \left(n_2 + n_1 \times \frac{Z_2}{Z_1} \right)} \quad (\text{E.3})$$

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 (siendo relevante la resistividad en el punto de puesta a tierra).

NOTA 1: 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.

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 (NPR) seleccionado.

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

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

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:

$$k'_e = k_e \times R_s / (n' \times R_s + R_c) \quad (E.6)$$

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 2: 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^a 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).

^a Valores referidos a longitudes externas superiores a 100 m. Para longitudes externas inferiores a 100 m en terrenos de alta resistividad (> 500 Ωm) podrían doblarse los valores de Z_1 .

^b El sistema de puesta a tierra debe cumplir con el apartado 5.4 de la Norma IEC 62305-3:2010

E.2.2 Factores que intervienen en la distribución de corriente en las líneas de potencia

En los cálculos detallados de las ondas transitorias, 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 ;
- 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 1: 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 % cada uno). Si N, L_1 , L_2 y L_3 tienen la misma impedancia, cada conductor transportará, aproximadamente, el 25 % de la corriente.

- las impedancias diferentes de los transformadores pueden influir en el reparto de la corriente (este efecto es despreciable si el transformador está protegido con DPS que puenteen su impedancia);
- 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 transitoria 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.

NOTA 2: Para más información véase el Anexo D de la NTP-IEC 62305-4:2010.

E.3 Ondas transitorias en los sistemas conectados a la estructura

E.3.1 Ondas transitorias producidas por descargas en las líneas (fuente de daño S3)

En el caso de impactos directos en las líneas conectadas a la estructura, debería 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 las Tablas E.2 y E.3 para los sistemas de baja tensión y en los de la Tabla E.3 para los sistemas de telecomunicación 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 transitorias de corriente esperadas por las descargas atmosféricas en sistemas de baja tensión

NPR (clases)	Sistemas de baja tensión			
	Descarga directa e indirecta en el servicio		Descarga cerca de la estructura ^a	Descarga en la estructura ^a
	Fuente de daño S3 (descarga directa) ^b Forma de onda: 10/350 μ s kA	Fuente de daño S4 (descarga indirecta) ^c Forma de onda: 8/20 μ s kA	Fuente de daño S2 (corriente inducida) Forma de onda: ^d 8/20 μ s kA	Fuente de daño S1 (corriente inducida) Forma de onda: ^d 8/20 μ s kA
III-IV	5	2,5	0,1	5
II	7,5	3,75	0,15	7,5
I	10	5	0,2	10

NOTA: Los valores se refieren a cada conductor de línea.

- ^a El trazado de los conductores con bucles y la distancia a la corriente inducida afectan a los valores de las sobreintensidades transitorias previstas.
Los valores de la tabla E.2 hacen referencia a conductores sin apantallar, cortocircuitados, formando bucle, con diferente trazado en grandes edificios (superficie del bucle de 50 m², ancho 5 m), separados 1 m de la pared de la estructura, en el interior de una estructura o edificio sin apantallar con SPCR ($kc = 0,5$). Para otras características de bucles y estructuras, los valores deberían multiplicarse por los factores K_{S1} , K_{S2} , K_{S3} (véase el capítulo B.4 de la Norma IEC 62305-2:2010).
- ^b Valores relevantes en el caso de que el impacto se produzca en el último apoyo de la línea más próximo al consumidor (línea con tres fases y neutro).
- ^c Valores referidos a líneas aéreas. Para líneas enterradas puede tomarse el valor mitad.
- ^d La resistencia y la inductancia del bucle afecta la forma de la corriente inducida. Cuando la resistencia es despreciable, debería considerarse la forma de onda 10/350 μ s. Este es el caso cuando se instala un DPS en el circuito Inducido.

TABLA E.3 - Ondas transitorias de corriente esperadas por descargas atmosféricas en sistemas de telecomunicación

NPR (clases)	Sistemas de telecomunicación ^a			
	Descarga directa e indirecta en el servicio		Descarga cerca de la estructura ^b	Descarga en la estructura ^b
	Fuente de daño S3 (descarga directa) ^c Forma de onda: 10/350 μ s kA	Fuente de daño S4 (descarga) Forma de onda: 8/20 μ s kA	Fuente de daño S2 (corriente inducida) Forma de onda: 8/20 μ s kA	Fuente de daño S1 (corriente inducida) Forma de onda: 8/20 μ s kA
III-IV	1	0,035	0,1	5
II	1,5	0,085	0,15	7,5
I	2	0,160	0,2	10

NOTA: Los valores se refieren a cada conductor de línea.

^a Para más información, véase la Recomendación K.67^[6] de la ITU-T.

^b El trazado de los conductores con bucles y la distancia a la corriente inducida afectan a los valores de las sobreintensidades transitorias previstas.
Los valores de la tabla E.3 hacen referencia a conductores sin apantallar, cortocircuitados, formando bucle, con diferente trazado en grandes edificios (superficie del bucle de 50 m², ancho 5 m), separados 1 m de la pared de la estructura, en el interior de una estructura o edificio sin apantallar con SPCR ($kc = 0,5$). Para otras características de bucles y estructuras, los valores deberían multiplicarse por los factores K_{S1} , K_{S2} , K_{S3} (véase el capítulo B.4 de la Norma IEC 62305-2:2010).

^c Valores relevantes a líneas sin apantallar con muchos pares. Para un cable sin apantallar, los valores podrían ser cinco veces mayores.

^d Valores referidos a líneas aéreas sin apantallar. Para líneas enterradas puede tomarse el valor mitad.

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 de la línea en paralelo.

E.3.2 Ondas transitorias producidas por descargas próximas a las líneas (fuente de daño S4)

Las ondas transitorias producidas por las descargas próximas a las líneas tienen mucha menor energía que la que producen las descargas en las líneas (fuente de daño S3).

Las sobreintensidades previstas y asociadas con los niveles de protección contra el rayo (NPR) se dan en las Tablas E.2 y E.3.

En las líneas apantalladas, los valores de las sobre intensidades dados en las Tablas E.2 y E.3 pueden reducirse por un factor de 0,5.

E.4 Ondas transitorias producidas por efectos inductivos (fuente de daño S1 o S2)

E.4.1 Generalidades

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

E.4.2 Ondas transitorias 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 con mallas de anchos superiores a 5 m, conforme a la NTP-IEC 62305-3) pueden producirse sobretensiones relativamente altas por efectos inductivos originados por campos magnéticos no amortiguados.

Las sobreintensidades previstas, en función de los niveles de protección, se indican en las Tablas E.2 y E.3.

E.4.3 Ondas transitorias 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 NTP-IEC 62305-4:2011), la generación 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.4.2.

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.5 Información general relativa a los DPS

El empleo de los DPS depende de su capacidad para soportar las ondas transitorias, de acuerdo con la Norma IEC 61643-1^[7] para los sistemas de potencia y con la Norma IEC 61643-21^[8] para los sistemas de telecomunicación.

La colocación de los DPS en la instalación es como sigue:

- a) A la entrada de la línea en la estructura (en el límite de la ZPR 1, por ejemplo en el tablero principal de distribución):
 - DPS ensayados con I_{imp} (forma de onda típica 10/350), por ejemplo, DPS ensayados de acuerdo a la Clase I,
 - DPS ensayados con I_n (forma de onda típica 8/20), por ejemplo, DPS ensayados de acuerdo a la Clase II.
- b) Próximo al aparato a proteger (en el límite de la ZPR 2 o superior, por ejemplo en un tablero secundario de distribución, o en tomacorrientes):
 - DPS ensayados con I_{imp} (forma de onda típica 10/350), por ejemplo, DPS ensayados de acuerdo a la Clase I,
 - DPS ensayados con I_n (forma de onda típica 8/20), por ejemplo, DPS ensayados de acuerdo a la Clase II,
 - DPS ensayados con una onda combinada (forma de onda de corriente típica 8/20), DPS ensayados de acuerdo a la Clase III

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 60664-1:2007, Coordinación del aislamiento para equipo dentro de sistemas de baja tensión. Parte 1: Principios, requerimientos y ensayos.
- [2] IEC 61000-4-5, Compatibilidad electromagnética (EMC). Parte 4-5: Ensayo y técnicas de medición, Ensayo de inmunidad a las sobretensiones transitorias.
- [3] BERGER K., ANDERSON R.B., KRONINGER H., Parámetros de las descargas del rayo. CIGRE Electra No 41 (1975), p. 23 - 37.
- [4] ANDERSON R.B., ERIKSSON A.J., Parámetros del rayo para aplicaciones de ingeniería. CIGRE Electra No 69 (1980), p. 65 - 102.
- [5] IEEE Reporte del grupo de trabajo, Estimando el desempeño ante el rayo de las líneas de transmisión – Modelos Analíticos. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, n. 3, July 1993.
- [6] ITU-T Recomendación K.67, Sobretensiones transitorias esperadas en redes de telecomunicación y señalización debido al rayo.
- [7] IEC 61643-1, Dispositivos de protección contra las sobretensiones transitorias en baja tensión, Parte 1: Dispositivos de protección contra las sobretensiones transitorias para sistemas de distribución en baja tensión. Requerimientos y ensayos.
- [8] IEC 61643-21 Dispositivos de protección contra las sobretensiones transitorias en baja tensión, Parte 21: Dispositivos de protección contra las sobretensiones transitorias conectados a redes de telecomunicación y señalización. Requerimientos de desempeño y métodos de ensayo.