



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Francisco Felipe Reyes Julio

Diseño de Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas del Hospital de Queilén

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 11 de Julio de 2018



Diseño de Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas del Hospital de Queilén

Francisco Felipe Reyes Julio

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Paulino Alonso Rivas

Profesor Guía

Sr. Sergio Valencia Santelices

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 11 de Julio de 2018

*Si vas a intentarlo, ve hasta el final.
De otra forma ni siquiera comiences.*

*Si vas a intentarlo, ve hasta el final.
Esto puede significar perder novias,
esposas,
parientes,
trabajos y,
quizá tu cordura.*

*Ve hasta el final.
Esto puede significar no comer por 3 o 4 días.
Esto puede significar congelarse en la banca de un parque.
Esto puede significar la cárcel.
Esto puede significar burlas, escarnios, soledad...
La soledad es un regalo.
Los demás son una prueba de tu insistencia, o
de cuánto quieres realmente hacerlo.
Y lo harás,
a pesar del rechazo y de las desventajas,
y será mejor que cualquier cosa que hayas imaginado.*

*Si vas a intentarlo, ve hasta el final.
No hay otro sentimiento como ese.
Estarás a solas con los dioses
y las noches se encenderán con fuego.*

*Hazlo, hazlo, hazlo.
Hazlo.
Hasta el final,
hasta el final.*

*Llevarás la vida directo a la perfecta carcajada.
Es la única buena lucha que hay*

“Lanza los dados” Charles Bukowski

Resumen

El siguiente documento describe el tema “Diseño de Sistema de Protección contra descargas atmosféricas de hospital de Queilen”.

El capítulo I hace una descripción del marco teórico asociado a las descargas atmosféricas, las teorías de su formación, los distintos fenómenos y factores asociados, para comprender la importancia de los elementos y consideraciones de un sistema de protección.

El capítulo II realiza una descripción de las normativas asociadas y las disposiciones más relevantes para la implementación del proyecto que se han de tener en consideración.

El capítulo III describe el sistema de protección contra el rayo, definiendo cada uno de los elementos asociados a éste y el papel que desempeña.

El capítulo IV proyecta un sistema de protección del hospital de Queilén, donde se dan distintas alternativas posibles, variando principalmente el tipo de captor, pasivo u activo.

Luego de un análisis económico y los factores asociados, se concluye que el sistema más adecuado corresponde a uno con captadores de tipo activo, principalmente por su simplicidad, disminución de elementos adicionales y bajos costos generales frente al resto de las alternativas propuestas.

Palabras clave: Descarga atmosférica, predicción de tormentas, evaluación del riesgo, sistema de protección contra descargas, captador activo, captador pasivo, protección contra sobretensiones, zonas de protección, nivel de protección, pararrayos con dispositivo de cebado.

Abstract

The following document describes the theme "Design of Protection System against atmospheric discharges of Queilen hospital".

Chapter I describes the theoretical framework associated with atmospheric discharges, the theoretical ones of their formation, the different phenomena and associated factors, to understand the importance of the elements and considerations of a protection system.

Chapter II provides a description of the associated regulations and the most relevant provisions for the implementation of the project that must be taken into consideration.

Chapter III describes the system of protection against lightning, defining each of the elements associated with it and the role it plays.

Chapter IV projects a protection system for Queilén hospital, where alternative alternatives can be used, mainly varying the type of captor, passive or active

After an economic analysis and the associated factors, it is concluded that the most suitable system corresponds to one with active type sensors, mainly due to its simplicity, decrease of additional elements and low overhead costs compared to the rest of the proposed alternatives.

Keywords: Atmospheric discharge, storm prediction, risk assessment, discharge protection system, early streamer emission, air terminals, surge protection, protection zones, protection level, early streamer emission lightning rod.

Índice general

Introducción.....	1
1 Marco teórico	5
1.1 Conceptos eléctricos previos	5
1.1.1 Carga eléctrica	5
1.1.2 Carga puntual	6
1.1.3 Campo eléctrico.....	6
1.2 El Campo eléctrico de la tierra.....	6
1.3 Conducción en la atmósfera	7
1.3.1 La electrósfera.....	7
1.4 La Tormenta eléctrica.....	8
1.4.1 Células de tormenta	8
1.4.2 Electrificación de las nubes de tormenta	9
1.4.3 Tipos de descargas atmosféricas.....	13
1.4.4 Índice cerámico	17
1.5 Predicción de tormentas eléctricas	18
2 Normativa asociada.....	21
2.1 IEC 62305 “Protection against lightning”	21
2.2 Principios generales.....	21
2.2.1 Zonas de protección contra el rayo (ZPR)	21
2.2.2 Nivel de protección contra el rayo (NPR)	23
2.2.3 Caracterización de la descarga.....	25
2.2.4 Efectos adversos producto de una descarga atmosférica	26
2.3 Evaluación del riesgo - IEC 62305-2 [7].....	27
2.3.1 Parámetros de evaluación del riesgo	27
3 Sistema de Protección Contra el Rayo (SPCR).....	32
3.1 Construcción del SPCR externo	32
3.1.1 Captadores de tipo pasivo	33
3.1.2 Captador de tipo activo, pararrayos con dispositivo de cebado (PDC)	41
3.1.3 Conductores de bajada	48

3.1.4 Características de la toma de tierra	55
3.2 Construcción del SPCR interno	61
3.2.1 Zonas de protección contra el rayo.....	62
3.2.2 Dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS)	65
3.2.3 Protección contra campos magnéticos radiados	68
4 Aplicación del modelo de protección, Hospital de Queilén.	71
4.1 Características estructurales	71
4.2 Alternativas de protección	73
4.2.1 Caso 1: Captador pasivo, nivel 1 de protección	75
4.2.2 Caso 2: Captador pasivo, nivel 2 de protección	76
4.2.3 Caso 3: Captador activo, combinación Nimbus 15 y Nimbus 30, nivel 1 de protección	77
4.2.4 Caso 4: Captador activo Nimbus 45, nivel 1 de protección	78
4.2.5 Caso 5: Captador activo, combinación Nimbus 15 y Nimbus 60, nivel 1 de protección	79
4.3 Evaluación de costos	79
4.3.1 Costos de los materiales.....	80
4.3.2 Costos de instalación	83
4.3.3 Gastos generales	84
4.3.4 Resumen de costos.....	84
4.4 SPCR Hospital de Queilén	85
4.5 Mantenimiento de un SCPR.....	85
4.5.1 Inspecciones de en un SCPR	85
4.5.2 Ensayos de mantención	86
4.5.3 Plan de mantenimiento	86
Discusión y conclusiones.....	88
Bibliografía	91

Introducción

Desde tiempos primitivos el hombre ha mirado el cielo maravillado con su extensión y grandeza, asombrado por los fenómenos sucedidos, éstos por muchos siglos no tuvieron una respuesta clara del por qué sucedían, aludidos en culturas antiguas a dioses o poderes sobrenaturales, no fue sino hasta hace algunos siglos atrás cuando tuvo el conocimiento para comenzar a explicar la naturaleza de dichos fenómenos.

Uno de los fenómenos de mayor controversia correspondía a las descargas atmosféricas, manifestadas en forma de rayos y/o relámpagos, acontecimientos que no dejaban indiferente a ningún testigo, por las características únicas del fenómeno en cuanto a su presentación deslumbrante, de sonido estruendoso y alto poder de devastación.

El desarrollo industrial y tecnológico en un principio en edificaciones de materiales y formas de construcción cada vez más robustos, promovió el uso del fierro en distintos tipos de aleaciones como refuerzo estructural, permitiendo erguir construcciones progresivamente más altas y de mayor envergadura trayendo consigo un nuevo problema, las diferencia de nivel respecto a la superficie y los materiales asociados al uso de metal dotaban a las estructuras de una menor resistencia eléctrica, lo que aumentaba las posibilidades de descargas atmosféricas a través de las mismas, el fenómeno que anteriormente se daba de forma aislada comenzó a transformarse en un problema grave en zonas donde había con recurrencia tormentas eléctricas.

Comienza así una de las aristas del estudio de las descargas atmosféricas en búsqueda de la protección y mitigación de sus efectos. Hoy en día las descargas eléctricas atmosféricas son fenómenos naturales de difícil predicción, pueden presentarse en cualquier lugar y en cualquier tiempo de acuerdo a la estación del año. El principal problema de las descargas atmosféricas radica en las altas corrientes que pueden circular por estructuras o materiales conductores con que cuentan los edificios y que en su trayectoria puede destruir y afectar permanentemente estos componentes, teniendo así el riesgo de muerte o problemas en la integridad de la salud de las personas que lo habiten.

El establecimiento de disposiciones de uso común para determinados procesos y/o la solución de problemáticas representa un factor clave en el desarrollo, bajo éste contexto las normativas sientan las bases para solución de problemas y el desarrollo en base a procedimientos seguros y de calidad.

En la actualidad todo proceso debe ser realizado de alguna forma en base a una o más reglas y/o normas, el cumplimiento de éstas valida dicho proceso ante la institución regente, al mismo tiempo las carencias o no cumplimiento de éstas disposiciones invalida la legitimidad del proceso y hace vulnerable al responsable de sanciones según corresponda.

Las protecciones eléctricas salvaguardan las personas e instalaciones. Existen diversas normas asociadas al uso e implementación de éstas en los establecimientos, enfocadas en proteger tanto a los equipos y estructuras como a los ocupantes del mismo. En la actualidad las instalaciones de toda índole deben cumplir con estándares que se rigen en base a normas de manera de prever un estándar uniforme y un nivel de protección satisfactorio para cualquier instalación.

La superintendencia de electricidad y combustibles (SEC) es el organismo regulatorio a nivel nacional, encargado de la normativa y fiscalización de actividades relacionadas a materias energéticas a desarrollar en el territorio nacional. Básicamente la superintendencia de electricidad y combustibles tiene un carácter regulatorio al mercado de la energía, corresponde a un organismo gubernamental, enlazado a través del ministerio de energía, es por tanto avalado y facultado de poder sancionar a personas jurídicas y/o naturales.

La SEC define los aspectos técnicos de las instalaciones eléctricas desde su transporte hacia las subestaciones, continuando hacia las redes de distribución, hasta el empalme con los clientes finales, para cumplir con éste cometido dispone de reglamentación en gran medida basada en estándares internacionales con las debidas adaptaciones al contexto nacional.

Para resguardar instalaciones y personas se puede tomar como referencia válida la norma IEC 62305 “Protection against lightning” de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). La norma IEC 62305 proporciona los principios generales a seguir para la protección contra el rayo. Existen otras importantes normas relativas a las protecciones ante descargas eléctricas como por ejemplo la NFPA 780, sin embargo ésta última no es tan completa y robusta como su contra parte de la IEC, en base a esto se opta por la normativa entregada por la IEC.

La IEC62305 describe y establece la protección de los recintos según el nivel de riesgo asociado. Esta norma europea ha sido aprobada en su primera publicación por los miembros de la CENELEC el 01-02-2006. Los miembros de la CENELEC son los comités electrotécnicos nacionales de normalización de 29 países europeos, entre ellos Alemania, Francia, Grecia, Italia, Reino Unido y Suiza.

La norma descrita es válida para las siguientes instalaciones:

- Estructuras, incluyendo sus instalaciones y su contenido, así como las personas.
- Servicios conectados a una estructura.

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

- Ferrocarriles.
- Vehículos, barcos, aviones, instalaciones en el mar.
- Canalizaciones subterráneas.
- Canalizaciones, líneas de potencia y de telecomunicación no conectadas a una estructura.

Ésta se divide en cuatro incisos que a modo de descripción general abarcan principios generales, la gestión de los riesgos, la protección de las estructuras y personas, los sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

Las dificultades existentes del punto de vista de la predicción de una descarga eléctrica en una instalación determinada hacen que sea difícil poder dimensionar un sistema de protecciones o incluso saber si acaso éste es necesario dadas las condiciones del lugar. Un factor importante al momento de analizar ésta condición es el índice ceraúnico, éste alude a la cantidad de descargas atmosféricas durante el año en una zona, sin embargo éste dato por sí sólo no resulta suficiente, la proyección de los sistemas de protección se realiza en base a un análisis de riesgo, éste incluye parámetros como las dimensiones, el uso de la estructura, las dificultades para evacuación, el riesgo de pérdida de vida humanas, entre otros.

El análisis de riesgo establece un margen base de protección sobre el cual dimensionar la cantidad de elementos de protección necesarios para salvaguardar una instalación, se definen niveles de riesgo, donde cada nivel de riesgo asocia un nivel predeterminado de protección, lógicamente a mayor riesgo, más robusto ha de ser el sistema de protección.

El sistema de protección contra el rayo (SPCR) debe ser capaz de mitigar los efectos directos así como los indirectos del rayo. Para cumplir con éstos requerimientos un sistema de protección se divide en dos sistemas que han de operar en conjunto, un sistema externo que capta y dirige la descarga de forma segura a tierra y un sistema interno, capaz de mitigar los efectos de una descarga que impacte el circuito eléctrico de la instalación, produciendo efectos transitorios de riesgo para los equipos, así como de brindar las disposiciones para evitar los daños por los efectos inducidos.

Actualmente los sistemas de protección contra descarga existentes en el mercado comparten características similares en cuanto al sistema de protección interno y el sistema externo respecto a las bajantes y derivación a tierra, las principales diferencias radican en el captador de descargas que puede ser de tipo pasivo u activo. Los captadores de tipo pasivo captan la descarga en forma natural por efectos físicos, mientras los captadores activos se basan en el principio de la atracción o repulsión de las cargas eléctrica a través de la polarización de los mismos, para lograr esto se valen de elementos electrónicos internos que les permiten acumular carga en una condición de tormenta.

Las principales críticas hacia los principios del captador activo están asociadas a que el campo eléctrico natural con el cual éstos se cargan no es constante ni mucho menos homogéneo en la superficie, éste puede variar según las condiciones físicas y naturaleza del lugar, por tanto las

ventajas que presenta el sistema estarían sujetas al lugar de instalación. Básicamente por ésta condición la Comisión Electrotécnica Internacional IEC no reconoce éste tipo de captador, sin embargo existen una serie de normativas que si los validan, las cuales son usadas en diversos países, éste es el caso de la UNE 21186, la cual regula los aspectos asociados a éste tipo de captador.

Existen diversos métodos de proteger una estructura contra las descargas, cuando la estructura a proteger es de grandes dimensiones como un hospital, resulta conveniente proyectar alternativas y evaluar la mejor para las necesidades del lugar, buscando protección y a la vez simplificación de la instalación.

Queilén corresponde a una comuna del archipiélago de Chiloé en el sur de Chile, en la región de Los Lagos, ubicada en un sector costero, tiene una superficie de 332 [km²] y alrededor de 6000 habitantes, el clima de la zona es templado, marítimo y lluvioso, con temperaturas medias de unos 10°C y precipitaciones durante todo el año que promedian aproximadamente los 180[mm] mensuales. Estas condiciones dan a lugar un alto nivel de corrosión, tanto por su cercanía al mar, como por el nivel de precipitaciones. Se ha de tener ésta condición presente al momento de seleccionar los materiales y elementos del sistema de protección, éstos han de ser resistentes a la corrosión.

Objetivo General

- Diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas para el hospital de Queilén, provincia de Chiloé, de forma de proteger el recinto contra posibles descargas atmosféricas.

Objetivos Específicos

- Desarrollar el marco teórico sobre cómo y porqué se producen las descargas eléctricas sobre la tierra.
- Desarrollo del marco teórico de cómo se protege el establecimiento de las descargas atmosféricas y determinar qué tipo de pararrayos se debe ocupar, activo o pasivo.
- Calcular los elementos necesarios para disipar la corriente del rayo de forma segura a tierra.
- Desarrollar el marco teórico para determinar si es posible predecir la descarga de tal manera de dar aviso a la comunidad que se aproximan descargas.

1 Marco teórico

Las descargas atmosféricas corresponden a un fenómeno físico de extremadamente corta duración, generalmente de 100 a 500 [µs], pero de gran intensidad, llegando como tope hasta los 200 [kA], que puede resultar mortal para los seres vivos en las cercanías del fenómeno y altamente dañinos para estructuras y/o elementos que reciben el impacto.

El fenómeno ocurre cuando se produce circulación de corrientes que circulan de una nube a otra o sobre la tierra, formando trayectorias de mínima resistencia, su formación se debe principalmente a nubes cargadas, cuya polaridad es opuesta a la de tierra; los edificios altos, las torres, los árboles, las líneas aéreas proporcionan estos puntos de impacto de baja resistencia.

En promedio siempre hay 2000 tormentas en marcha ocupando el 10% de la superficie terrestre y en ellas se producen un estimado de 100 a 300 descargas por segundo, de las cuales el 25% son rayos nube-tierra.

Dado el potencial de daño del fenómeno, resulta necesario estudiar la naturaleza del mismo de forma de comprender los factores de importancia y los alcances de éstos en el marco de la formulación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas.

1.1 Conceptos eléctricos previos

En éste apartado se describen conceptos de naturaleza eléctrica necesarios para dar entendimiento a las variables asociadas a la creación y comportamiento de las descargas atmosféricas, descritas posteriormente.

1.1.1 Carga eléctrica

Propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas a través de campos electromagnéticos. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos, siendo a su vez generadora de ellos.

Una de las principales características de la carga eléctrica es que, en cualquier proceso físico, la carga total de un sistema aislado siempre se conserva, es decir, la suma algebraica de las cargas

positivas y negativas no varía en el tiempo. Por razones históricas, a los electrones se les asignó carga negativa y a los protones carga positiva.

La unidad de medida de la carga eléctrica se denomina coulomb, que corresponde a la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor eléctrico en un segundo cuando la corriente tiene un valor de 1 [Ampere]. Un coulomb equivale a $6,25 \times 10^{18}$ electrones libres.

1.1.2 Carga puntual

Corresponde a una carga eléctrica hipotética, de magnitud finita, contenida en un punto geométrico de dimensión, volumen y superficie despreciable.

1.1.3 Campo eléctrico

Una carga eléctrica puntual “q” (carga de prueba) sufre, en presencia de otra carga “ q_1 ” (carga fuente), una fuerza electrostática. Si se elimina la carga de prueba, se puede esperar que el espacio que rodea a la carga fuente ha sufrido algún tipo de perturbación, ya que una carga de prueba situada en ese espacio sufrirá una fuerza.

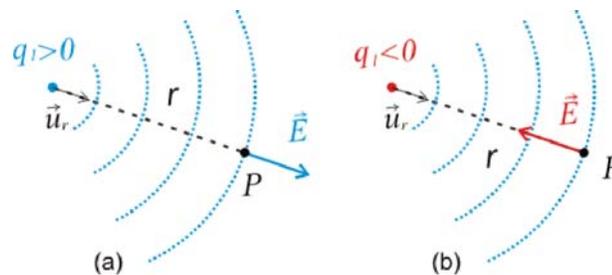


Figura 1-1 a y b Campo eléctrico E creado en el punto P por una carga de fuente q_1 positiva (a) y por una otra negativa (b) a una distancia “r” en la dirección de un vector unitario “ u_r ”.

(Fuente: <http://acer.forestales.upm.es>)

El campo eléctrico E creado por la carga puntual q_1 en el punto cualquiera P se define como:

$$\vec{E} = K \frac{q_1}{r^2} \vec{u}_r \quad (1-1)$$

La ecuación 1-1 describe la perturbación que crea la carga fuente en torno a ella, se representa mediante un vector denominado campo eléctrico \vec{E} . La dirección y sentido del vector campo eléctrico en un punto vienen dados por la dirección y sentido de la fuerza que experimentaría una carga positiva colocada en ese punto \vec{u}_r : si la carga fuente es positiva, el campo eléctrico generado será un vector dirigido hacia afuera (figura 1-1 a) y si es negativa, el campo estará dirigido hacia la carga (figura 1-1 b).

1.2 El Campo eléctrico de la tierra

La atmósfera en las proximidades de la tierra, hasta algunos km de distancia y en buenas condiciones de tiempo tiene un campo eléctrico uniforme E, vertical y orientado hacia abajo, de

100 a 130 [V/m], éstos valores se dan a modo de referencia pero el campo no es constante en toda la superficie de la tierra y sobre todo decrece cuadráticamente (aproximadamente) con la distancia a la misma.

Los conductores desconectados de tierra, al cabo de un tiempo adquieren el potencial correspondiente a la altura a la que están sobre la tierra, de acuerdo al campo uniforme mencionado.

Si la atmósfera fuera absolutamente aislante la carga de la superficie de la tierra permanecería en ella y no se produciría ningún cambio, para que exista conducción eléctrica en la atmósfera debe haber portadores de carga, a mayor densidad de portadores, mayor conducción.

1.3 Conducción en la atmósfera

En la atmósfera los portadores de carga se clasifican en dos grupos

- Pequeños iones: Moléculas ionizadas. Al unirse a partículas de polvo, se transforman en grandes iones.
- Grandes iones: Se producen en la superficie de la tierra. Se generan por partículas de contaminación ambiental, bruma de las olas al romper, etc. Se trata de agrupamientos de moléculas con carga neta y su movimiento es mucho más lento que el de los pequeños iones.

El aire cerca de la tierra es menos conductor que en las capas más altas, esto se debe a que a medida que aumenta la distancia respecto a la superficie predominan los pequeños iones, los grandes iones están presentes especialmente cerca de la tierra y contribuyen de manera despreciable a la corriente producida por el campo eléctrico, esto se debe a que su gran masa hace que se aceleren de manera más lenta cuando se encuentran sometidos a una determinada fuerza siendo los pequeños iones los que dominan el movimiento de carga que crean las corrientes en condición de buen clima.

1.3.1 La electrósfera

A partir de los 50 - 60 kilómetros de altura, la diferencia de potencial media oscila entre 2×10^5 [V] a 5×10^5 [V], lo cual implica un campo eléctrico medio a través de la atmosfera de entre 6 y 7 [V/m]. A esta zona se le da el nombre de electrósfera, que corresponde a la zona de interés desde el punto de vista del estudio de los rayos, la zona entre la superficie y la electrósfera es donde se forma la tormenta.

Como se mencionó anteriormente, las partículas cargadas en presencia de un campo eléctrico E son forzadas a desplazarse, produciendo una densidad de corriente. Esta densidad de corriente en buen tiempo se ha medido experimentalmente, y se obtiene un valor de $J = 2$ a 4 [pA/m²], valor que corresponde a aire efectivamente aislante. Si se calcula la corriente total entre tierra y electrósfera considerando este valor de J , la corriente total es de aproximadamente 1000 [Amperes], considerando la carga de la Tierra próxima a los -6×10^5 [Coulomb], la tierra se

descargaría completamente en un tiempo menor a 10 minutos, sin embargo esto no sucede, la tierra se mantiene cargada por efecto de las descargas atmosféricas.

1.4 La Tormenta eléctrica

La tormenta eléctrica es un fenómeno meteorológico caracterizado por la presencia de rayos y sus efectos sonoros denominados truenos, por lo general están acompañadas de fuertes vientos, lluvia y en ocasiones nieve. Es posible caracterizar su formación en base a células de tormenta, así como el tipo de descarga según los puntos de inicio y fin, y las teorías respecto a la electrificación de éstas.

1.4.1 Células de tormenta

Una célula es una nube elemental que comprende en algún momento de su desarrollo como mínimo una corriente ascendente bien establecida y una descendente, una tormenta está formada por uno o varios centros activos de éstas. Existen diversos tipos de células de tormenta, a continuación se describe el proceso de formación de una célula de tormenta por convección cuya característica de interés es que contiene todos los elementos asociados al rayo.

El comportamiento del aire a distintos niveles de altura en la atmosfera es fundamental para entender la formación de la nube de tormenta por convección, la figura 1-2 describe 5 curvas:

- Curva **a**: variación de la temperatura del aire seco con la altura en buen tiempo y en estado de equilibrio, describe la variación estática y en reposo, ninguno de los tipos de aire que se describirán evoluciona siguiendo ésta curva.
- Curva **b**: Variación de la temperatura del aire seco en la superficie terrestre que por aumento de temperatura asciende y se enfría a medida que se eleva por efectos de expansión adiabática, a determinada altura llega a estar más frío que el aire que lo rodea correspondiente a la curva estática, por lo que vuelve a bajar hasta el punto de origen.
- Curva **c**: Variación de la temperatura de aire húmedo (con un contenido de vapor de agua importante) que se calienta y sube, a medida que se expande y se enfría el vapor de agua se condensa y el agua al condensarse libera calor, se aprecia que el aire húmedo no se enfría tanto como el aire seco.
- Curva **d**: Excedente de la curva c, la masa de aire húmedo que se va expandiendo y condensando, también arrastra una importante masa de aire seco generando ésta curva intermedia.

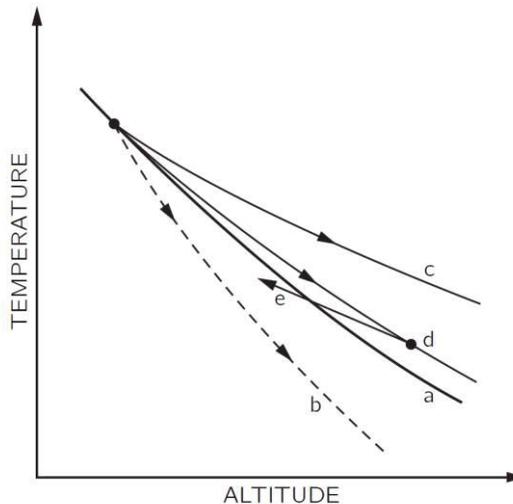


Figura 1-2 Dependencia de la temperatura del aire con la altura.
(Fuente: The Feynman "Lectures on Physucs" Vol II [1])

Al ir avanzando el proceso, el aire húmedo que sube lo hace con tal velocidad que genera una corriente ascendente que es del orden de 100 [km/h] y el aire que asciende puede alcanzar los 10.000 a 15.000 metros sobre el nivel del mar. A medida que la humedad del aire se condensa y forma pequeñísimas gotas, éstas se enfrían rápidamente a temperaturas por debajo de cero grado, pero no se congelan sino que se sobre-enfrían a falta de partículas presentes para iniciar la cristalización.

Cuando las gotas de agua sobre-enfriadas entran en contacto con alguna partícula, como ser un cristal de NaCl, se forma un pequeño cristal de hielo, si entran en contacto con un cristal de hielo se congelarán instantáneamente, de ésta forma alcanzado un cierto punto en el desarrollo de la célula, hay una rápida acumulación de grandes partículas de hielo.

Al principio, cuando los cristales de hielo y las gotas de agua sobre-enfriadas son pequeñas, no caen debido a la fuerza opuesta que ejerce la corriente ascendente, pero al ir creciendo en tamaño, ya la corriente no los puede sostener y comienzan a caer arrastrando algo de aire con ellas y así se inicia una corriente descendente, al cabo de 30 a 60 minutos, ya no hay suficiente aire caliente para mantener la corriente ascendente, caen las últimas precipitaciones y luego todo termina.

1.4.2 Electrificación de las nubes de tormenta

Como se observa en la figura 1-3 una célula de tormenta eléctrica presenta diferentes regiones de carga eléctrica, básicamente considerando dos regiones de carga, una negativa en la base de la nube y otra positiva en la cima, se logra un modelo simplificado que en general es suficiente para el estudio de la protección contra descargas atmosféricas.

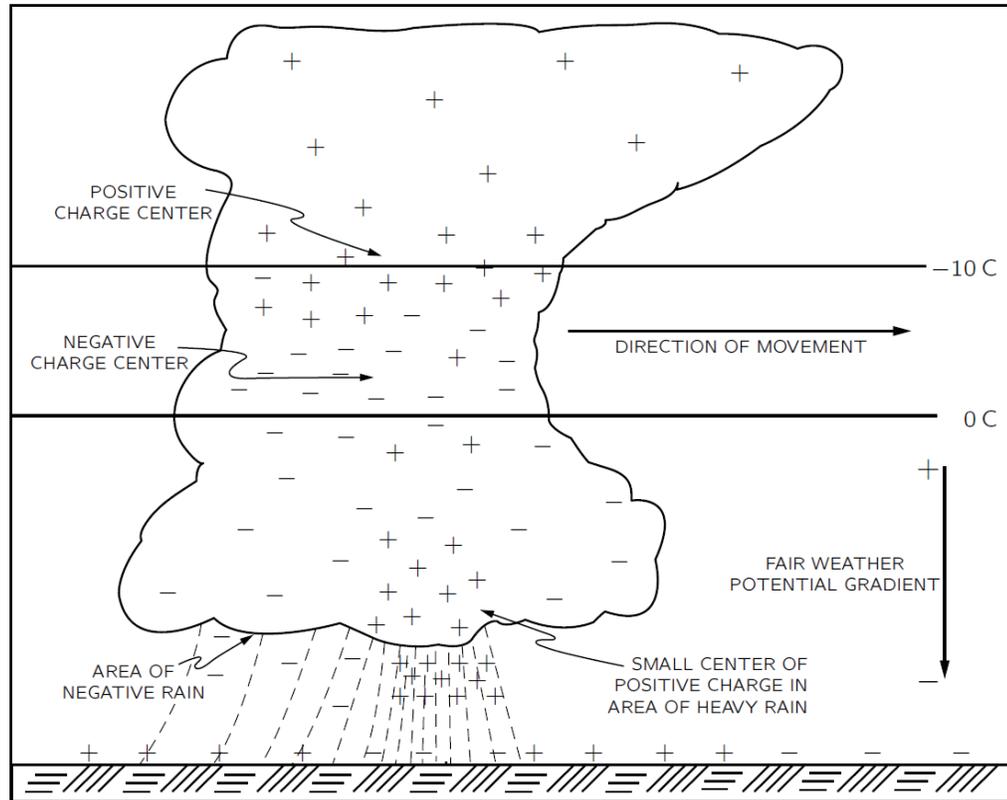


Figura 1-3 Distribución de cargas eléctricas en una célula madura de tormenta eléctrica.
(Fuente: The Feynman "Lectures on Physucs" Vol II [1])

Los procesos de carga de la nube no se conocen con exactitud, si bien existen varios fenómenos que se producen dentro de la nube y existen varias teorías acerca de cómo éstos fenómenos producen carga eléctrica, ninguna logra explicar por sí sola la formación de la totalidad de la carga que existe dentro de la nube, no es necesario que exista agua para que existan cargas, hay rayos incluso en tormentas de arena y nubes de ceniza volcánica.

A continuación se describen algunas de las teorías más usuales, de forma simplificada que explican la electrificación de una nube.

Teoría de Elster y Greitel (influencia eléctrica).

También conocida como teoría de la influencia eléctrica. Una nube contiene gotas de diferentes tamaños; las más grandes se precipitan y las más pequeñas son llevadas por el viento hacia arriba, las gotas se polarizan por la acción del campo eléctrico existente, el cual se llega a apreciar en la figura 1-4, donde se observa la dirección que toma hacia tierra. Esto conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma. El roce de una gota grande con una pequeña, al caer, trae como consecuencia un intercambio de cargas como se observa en la transición de (a) a (b).

En gotas más pequeñas predomina carga positiva y en las grandes la negativa. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. Mientras tanto en la nube, se acumulan poco a poco cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en su parte inferior. El campo eléctrico que así se forma favorece la separación de cargas por influencia eléctrica.

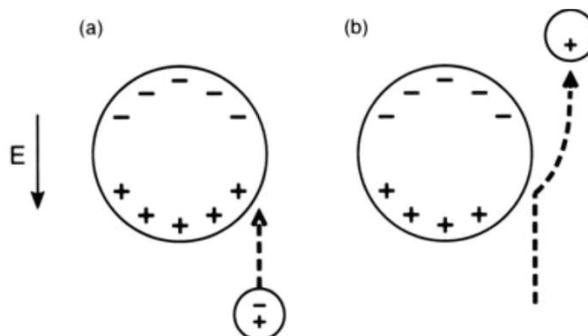


Figura 1-4 Modelo Inductivo gota de lluvia según Elster y Geitel.
(Fuente: The Feynman "Lectures on Physucs" Vol II [1])

Estudios recientes le restan importancia a esta teoría desde el punto de vista del interés hacia las descargas atmosféricas, ya que el roce entre gotas parece ser importante sólo en la formación de la lluvia y no en la distribución espacial de las cargas eléctricas.

Teoría de los cristales de hielo.

Ésta teoría explica la importancia que representan los cristales de hielo (granizo), en las partes superiores de las nubes y también en las regiones árticas, Simpson y Robinsón describen la formación de cargas eléctricas al chocar un granizo con otro, permitiendo que el aire adquiera carga positiva y el hielo quede cargado negativamente. Elster y Greitel opinan que la separación de cargas eléctricas se debe a la fricción entre vapor de agua con granizos o con gotas de agua. En las tormentas recién formadas con un gran cúmulo de nubes y en las que no existen precipitaciones pluviales con temperaturas de 10°C pueden ocurrir descargas eléctricas en el interior de la nube.

Teoría de Willson.

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia, ésta teoría asume al igual que la de Elster y Geitel una influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico, entonces la parte superior de la gota se carga negativamente y la inferior de carga positiva, el viento, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota (figura 1-5). Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, evitando así la atracción de la mitad superior de la gota,

la cual continúa su caída, sólo con carga negativa. La nube queda cargada positivamente en su mitad superior y una negativa en la inferior.

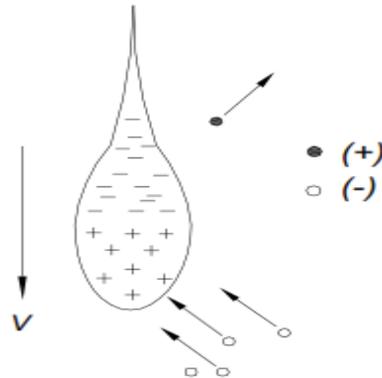


Figura 1-5 Gota de lluvia según teoría de Wilson.
(Fuente: Gómez, P. y Guevara, B. (2013). Descargas atmosféricas. [2])

Esta teoría tropieza con algunas dificultades que se derivan de observaciones prácticas, el tiempo medio de formación de una carga eléctrica de 1 [Coulomb/km] por la acción de un gradiente eléctrico de 1 [kV/cm] es de 170 minutos, para la formación de la tormenta atmosférica esta carga resulta ser muy pequeña, con un tiempo de formación muy largo. Esto le resta importancia a la teoría de Wilson, aunque la misma contribuye a explicar la distribución de cargas eléctricas en la nube.

Teoría de Simpson

Simpson manifestó que la formación de cargas eléctricas en las nubes se debe a las corrientes de aire que se encuentran en su interior, las corrientes de aire ascendentes transportan vapor húmedo del mar o de la superficie terrestre, este vapor al encontrarse a determinada altura y bajo condiciones atmosféricas propicias se condensa transformándose en gotas de agua cuando se inicia la lluvia en su caída, las gotas encuentran corrientes de aire ascendentes que provocan el rompimiento de las mismas, formándose gotas más pequeñas, estas gotas por un procedimiento parecido vuelven a fraccionarse en tamaños menores, al ocurrir el rompimiento de las gotas, se desprenden iones negativos; generando así cargas eléctricas que se dispersan en la atmósfera y al mismo tiempo son llevados por las corrientes de aire ascendentes a la parte superior en la nube, en tanto la parte inferior de la nube se carga en forma positiva.

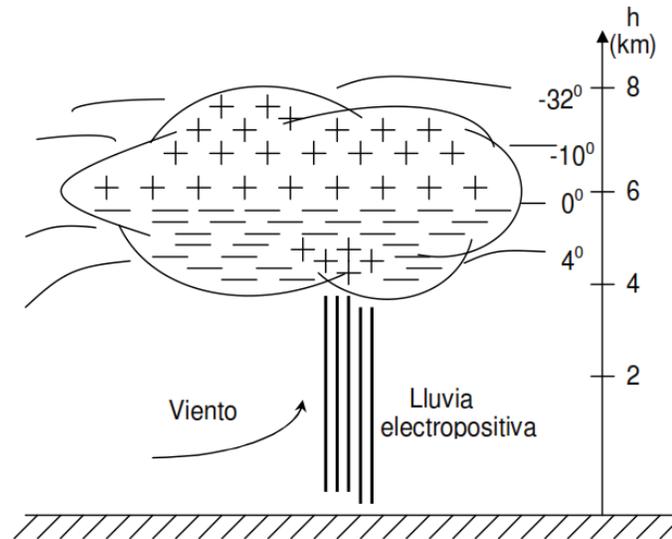


Figura 1-6 Nube según Simpson con alturas e isotermas usuales.
(Fuente: Gómez, P. y Guevara, B. (2013). Descargas atmosféricas. [2])

En la figura 1-6 se muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda. Las partes inferiores de la nube denotan una temperatura promedio de + 4°C, la parte superior alcanza valores de hasta -32°C.

1.4.3 Tipos de descargas atmosféricas

Hay tres tipos de descargas:

- Intranube (la más frecuente).
- Entre nube y tierra.
- Entre dos nubes (menos frecuente).

Nos concentraremos fundamentalmente en las descargas entre nube y tierra, ya que es nuestro objeto de estudio para aplicar protecciones. Dentro de la descarga entre nube y tierra existen cuatro tipos de rayos, dependiendo de la dirección de propagación de la guía escalonada y de la polaridad de la carga efectivamente transferida de la nube a tierra. Se llaman ascendentes o descendentes según la dirección de propagación y positivas o negativas según la polaridad. En la figura 1-7 se observan los cuatro tipos, siendo (de izquierda a derecha):

- Descendente negativo.
- Ascendente negativo.
- Descendente positivo.
- Ascendente positivo.

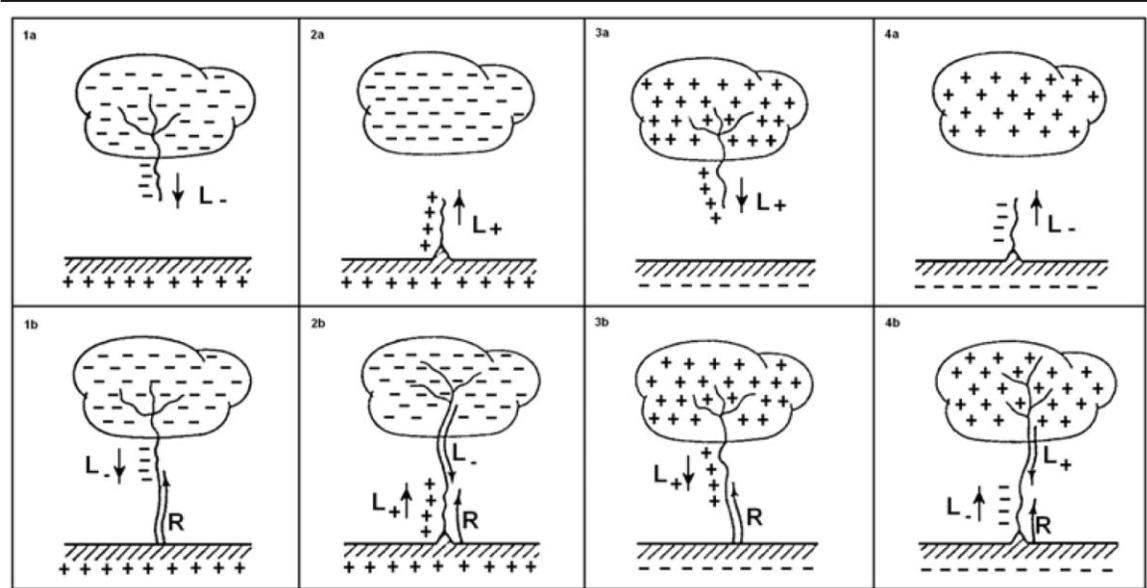


Figura 1.7 Tipos de rayos según Mazur y Ruhnke.
(Fuente: MacGorman, D., Rust, W. D. "The Electrical Nature of Storms" [3])

Como se aprecia, la descarga consta de dos o tres etapas de transferencia de carga entre nube y tierra, los rayos nube-tierra descendentes negativos representan el 90% de los rayos totales.

Rayos nube-tierra descendentes negativos

El desarrollo de éste puede dividirse en 9 etapas.

1. Ruptura preliminar

Una descarga de este tipo se inicia en un fenómeno llamado "Ruptura Preliminar", una descarga electrostática en el interior de la nube, en la zona de carga negativa, típicamente a una altura de unos 5 a 8 kilómetros. La ruptura preliminar es seguida por un proceso de descarga dentro de la nube que dura algunos milisegundos a partir del cual se comienza a formar la llamada "Guía Escalonada" de la nube a tierra.

2. Guía escalonada descendente

Si el campo asociado a la ruptura preliminar es suficientemente grande, se produce un fenómeno de propagación de un canal de aire ionizado cargado negativamente, llamado guía escalonada o trazador descendente.

Desde el extremo de la guía, donde hay un determinado campo E, se produce una descarga de cierta luminosidad con una corriente de 100 a 1000 [Amperes] a continuación se produce otro salto cuya dirección no está relacionada con el salto anterior, pudiendo incluso ramificarse y cada rama desarrollarse independientemente de las otras, también a saltos. Este proceso no es detectado por la vista humana.

3. Trazador ascendente

Al acercarse la guía escalonada a tierra, cuando el campo promedio entre la punta de la guía y los puntos salientes de tierra (que son múltiples en cualquier entorno normal) llega a unos 500 [kV/m], las corrientes corona de dichos puntos aumentan y se transforman en canales ionizados que se propagan hacia arriba de manera análoga a la propagación de la guía escalonada, impulsados por el propio campo eléctrico. Esos canales se llaman “guías o trazadores ascendentes”.

4. Proceso de enlace

Cuando el campo entre la punta de uno de esos trazadores ascendentes y la punta de la guía descendente llega a un valor suficientemente alto se completa el canal conductor entre la tierra y la nube y se produce la primera descarga de retorno entre la nube y el objeto que emitió el trazador ascendente. En esta fase sí hay ruptura dieléctrica del aire entre las dos puntas de las guías. El objeto se convierte entonces en el punto de impacto.

5. Primera descarga de retorno

Al formarse el canal, los electrones en la guía se transfieren a tierra, produciéndose lo que se llama primera descarga de retorno. Esta descarga se propaga a lo largo del canal formado por la guía escalonada a una velocidad aproximada de 108 [m/s]. En el canal, la presión asciende a 10 [atm] y la temperatura asciende a 30.000 [°K], lo cual produce una expansión muy violenta en el aire, que se traduce en la onda sonora que se conoce como trueno.

6. Proceso de reconstitución de la carga de la nube

Después de la primera descarga, tenemos dentro de la nube una zona sin carga, pero con una conductividad mayor que el aire circundante y se produce la sexta etapa de la descarga que consiste en procesos de reconstitución de la carga.

7. Guía dardo

En el caso de que la carga se haya reconstituido a un nivel suficientemente alto, se produce otra transferencia de carga en forma continua por el canal original. Como el canal ya formado queda débilmente ionizado, la nueva descarga se propagará por el mismo. Por lo tanto su carga tiene características diferentes a la de la guía escalonada. Se observa una zona del canal, débilmente luminoso, de algunos metros de largo, que se desplaza a una velocidad de 107 [m/s] por el camino establecido por la primera descarga. Esta guía recorre solamente el canal principal, porque las ramificaciones ya fueron neutralizadas. Cuando esta guía llega a tierra, queda establecido un canal conductor ionizado entre nube y tierra y su carga se transfiere a tierra formando una segunda descarga de retorno. La guía descrita se llama guía dardo.

8. Segunda descarga de retorno y descargas subsiguientes

La transferencia de carga correspondiente a la segunda descarga de retorno se produce sobre el mismo punto del impacto principal. En este segundo retorno, si bien la corriente es, en general, de menor valor de pico, la pendiente de la corriente de subida, es mayor que la del primer retorno. En la mayor parte de los rayos ocurren más de dos descargas de retorno. La segunda y las subsiguientes tienen características similares. Se han registrado rayos con decenas de

descargas que siguen al primer retorno, todas recorriendo solamente el canal principal. Si uno observa un rayo a simple vista constata frecuentemente que el rayo principal es de gran luminosidad y pulsante mientras que las ramificaciones son fijas y más débiles.

9. Corriente continua

A veces, luego de una descarga de retorno, se observa la circulación de una corriente continua de un valor promedio de algunas centenas de Ampere durante decenas a centenas de ms. Estas descargas son las que producen los incendios, ya que si bien la intensidad de corriente no es alta, sí lo es la duración, por lo que la energía suministrada es mucho mayor. La figura 1-8 esquematiza las etapas del rayo en etapas, mientras que la figura 1-9 se observa un diagrama temporal incluyendo una descarga con corriente continua.

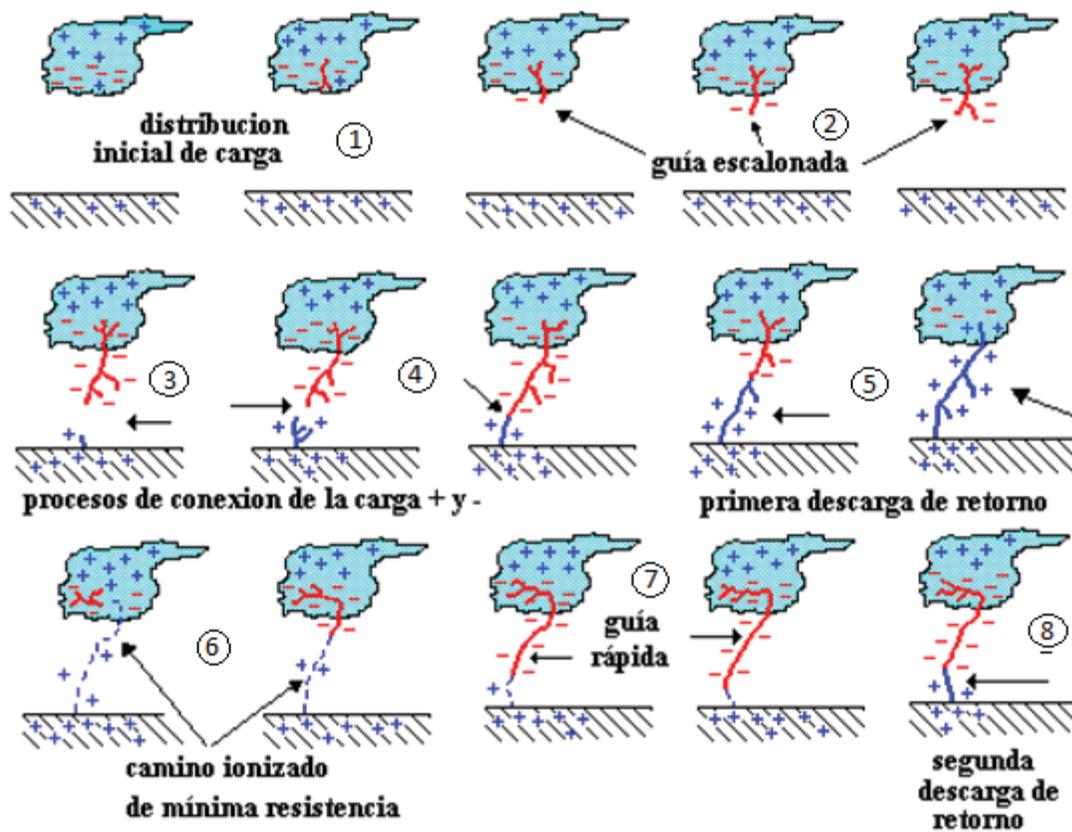


Figura 1-8 Etapas en la descarga de un rayo nube-tierra negativo.
 (Fuente: adaptación, Uman M., "Atmospheric Electricity Lightning" [4])

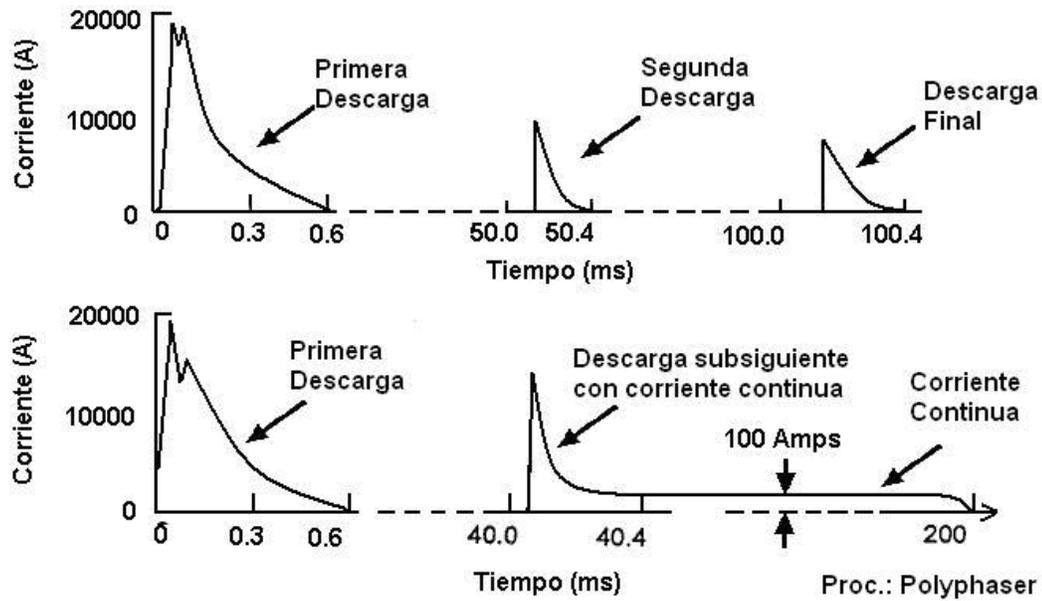


Figura 1-9: Diagrama temporal de una descarga completa.
(Fuente: Block, Roger., "The Ground of Lightning and EMP Protection") [5]

Es posible observar que la corriente máxima para una primera descarga bordea los 20 [kA], mientras que la segunda descarga se reduce alrededor de un 60% tanto en intensidad como en duración.

1.4.4 Índice cerámico

La distribución de las tormentas eléctricas en la tierra no es en absoluto uniforme. La actividad eléctrica tiene su máxima intensidad en zonas cercanas al ecuador y sobre tierra firme. La frecuencia de descargas disminuye con latitudes crecientes y es muy escasa sobre los océanos.

La actividad eléctrica de la atmósfera en una zona se caracteriza tradicionalmente por el llamado índice cerámico (TD) que corresponde al número de días al año en que en algún momento se escuchó un trueno. La figura 1-10 muestra un mapa isocerámico, las curvas delimitan zonas según niveles del índice cerámico.

Este índice puede variar desde 0 hasta llegar a 300 en algunos lugares, indica la cantidad de días al año en que hubo actividad eléctrica en esa zona. Cabe destacar que éste índice no toma en cuenta la intensidad de la tormenta, así se haya escuchado un trueno o diez, para ese día solo se computa como uno.

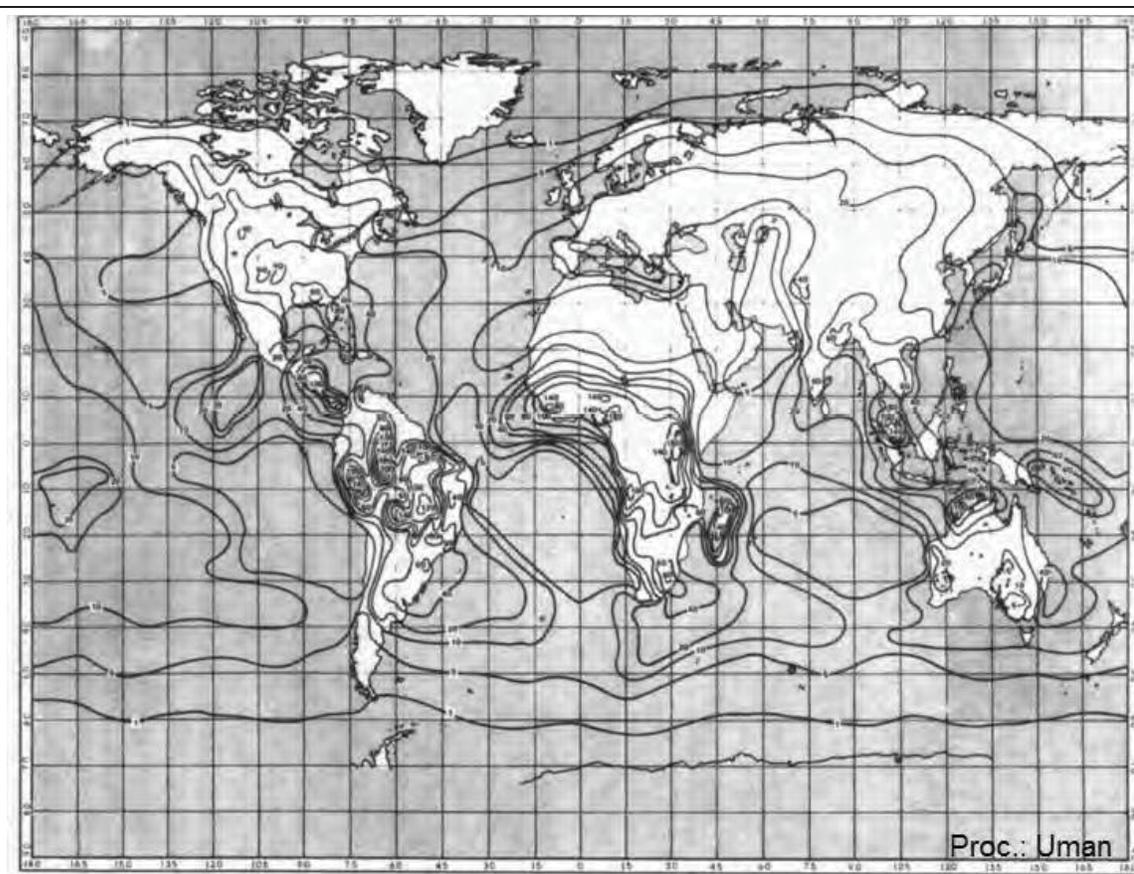


Figura 1-10: Mapa isoceránico mundial
(Fuente: Uman M., "Atmospheric Electricity Lightning" [4])

1.5 Predicción de tormentas eléctricas

Las tormentas eléctricas se componen de diferentes procesos físicos asociados a su ciclo de vida. Estas varían en escalas de espacio y tiempo, caracterizándose por presentar fenómenos en diferentes rangos de frecuencias y propagarse en diferentes formas.

Para poder detectar y correlacionar los distintos fenómenos que suceden previo y durante una tormenta, es necesario implementar diversos dispositivos capaces de asociar y registrar en gran medida el comportamiento de la actividad atmosférica y de esta forma emprender un extenso trabajo en la caracterización de sus parámetros.

En la actualidad, diversos sistemas de medición indirecta permiten la caracterización de los parámetros físicos del fenómeno del rayo por medio de una gama de sensores con resoluciones de baja frecuencia (LF), muy baja frecuencia (VLF) y muy alta frecuencia (VHF), de tal forma que puedan registrar las variaciones radiadas y/o inducidas del campo electromagnético debido a la transferencia o neutralización de carga eléctrica.

La norma Europea prEN 50536 [14], clasifica los sistemas de detección de tormentas eléctricas dependiendo de su ciclo de vida en 4 clases diferentes:

- Clase I: Capaz de detectar el ciclo de vida completo de una tormenta eléctrica.
- Clase II: Capaz de detectar la actividad total de rayos intranube (IC) y descargas a tierra (CG).
- Clase III: Solo detecta la actividad de rayos a tierra (CG).
- Clase IV: Detecta rayos CG y otras perturbaciones electromagnéticas con eficiencia muy limitada.

Además, cada sistema de medición asocia sus respectivos rangos de frecuencias y diferentes técnicas empleadas para estimar sus parámetros físicos y de localización.

Tabla 1-1 Características de los Sistemas de detección y localización de tormentas [14].

Dispositivo de medida	Proceso físico detectado	Frecuencia	Clasificación	Rango de detección [km]	Aplicaciones
Electric Field Mill (EFM)	Procesos de electrificación	DC	Clase I	20	Rango de detección muy bajo, alta confiabilidad.
Magnetic Direction Findig (MDF)	Momento de carga eléctrica	VLF (3Khz - 30 KHz)	Clase III		Baja eficiencia en la detección y localización. Rango muy elevado de detección.
MDF, Time of Arrival (TOA)	Campo electromagnético radiado por el rayo	LF (30Khz - 300Khz)	Clase III	600-900	Rango de detección alto, alta eficiencia de detección de rayos GC.
Time of Arrival (TOA)	Encendido de la descarga y proceso del líder	VHF (30MHz - 300Mhz)	Clase II	200	Rango de detección medio, alta eficiencia de detección de rayos GC, IC.
Interferometry (RFI)	Encendido de la descarga y proceso del líder	VHF (30 MHz - 300 MHz)	Clase II	300	Rango de detección medio, alta eficiencia de detección de rayos GC, IC.
Radio Frequency (RF)	Campo magnético radiado	LF (30Khz - 300Khz)	Clase IV	100	Aplicaciones de meteorología

La normativa indica en forma detallada las consideraciones y las disposiciones para por ejemplo, con un arreglo de algunos de los dispositivos descritos en la tabla 1-1 poder lograr cierto grado de confiabilidad en la predicción de tormentas.

La capacidad de predicción está directamente relacionada a la cantidad de sensores que se puedan instalar en una zona y la capacidad del algoritmo implementado, de forma de poder diferenciar conjunto de valores que son un detonante de tormenta de los falsos positivos.

Estudios experimentales como asociados a la predicción de descargas [15] establecen que la eficiencia máxima lograda en un área de 4000 [km²], el tamaño de una ciudad grande, utilizando 36 sensores distribuidos, es cercana al 65%, con un tiempo de respuesta no menor a 15-30 minutos.

En base esto se puede establecer que es posible predecir una tormenta con un rango no menor a 15 minutos, con cierto grado de precisión, la cual estará directamente ligada a la cantidad y calidad de sensores utilizados y la calidad del algoritmo de búsqueda.

2 Normativa asociada

Para resguardar instalaciones y personas se puede tomar como referencia válida la norma 62305 “Protection against lightning” de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). La norma IEC 62305 proporciona los principios generales a seguir para la protección contra el rayo. Existen otras importantes normas relativas a las protecciones ante descargas eléctricas como por ejemplo la NFPA 780, sin embargo ésta última no es tan completa y robusta como su contra parte de la IEC, en base a esto se opta por la normativa entregada por la IEC.

2.1 IEC 62305 “Protection against lightning”

Ésta se divide en cuatro incisos que a modo de descripción general abarcan principios generales, la gestión de los riesgos, la protección de las estructuras y personas, los sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

En términos generales al uso de las disposiciones de ésta norma en términos de aplicación, se definen niveles de protección asociados a la probabilidad de descarga y el nivel de seguridad mínimo de acuerdo a las características de la zona a proteger, se inicia con una evaluación del riesgo, la cual permite seleccionar un nivel de protección seguro para la misma y con ello seleccionar la serie de disposiciones de acuerdo al nivel de protección establecido.

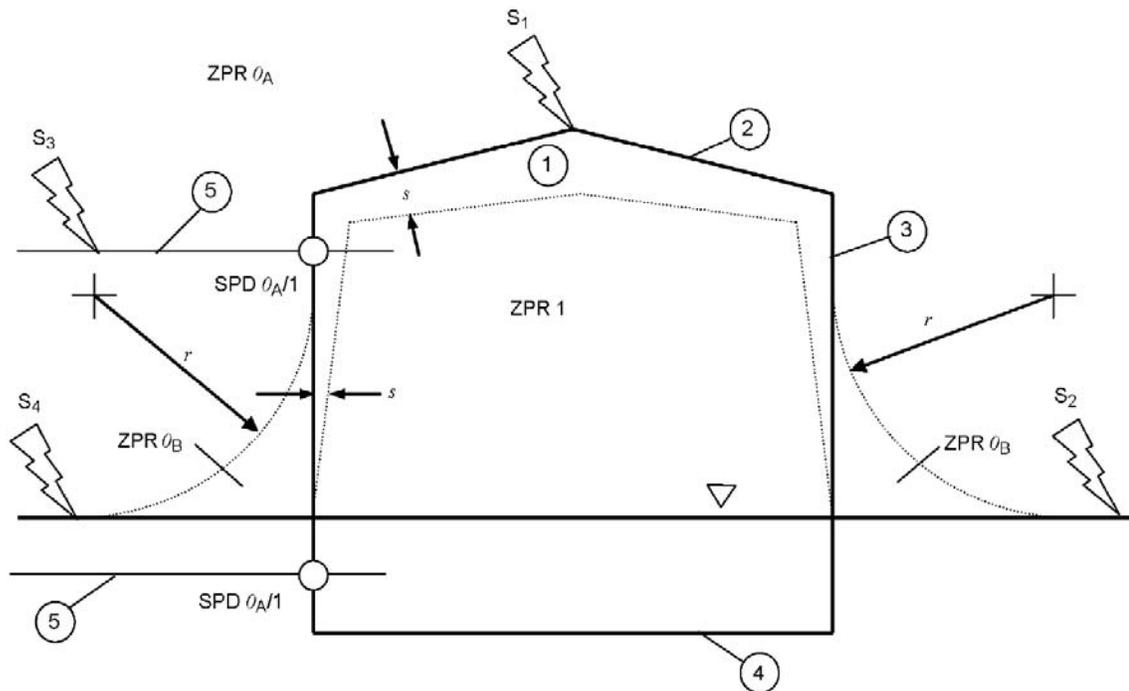
2.2 Principios generales

Éste apartado establece los márgenes sobre los cuales es válida la normativa, define las zonas de protección, el alcance en cuanto a la modelación del rayo y su corriente máxima, entre otros aspectos que actúan como base para las consideraciones posteriores, los aspectos tratados están basados en las consideraciones entregadas por la norma IEC-62305-1[6].

2.2.1 Zonas de protección contra el rayo (ZPR)

La descarga eléctrica de un rayo produce efectos directos e indirectos en el punto de impacto y su cercanía, por tanto es necesario definir las zonas de protección según la vulnerabilidad a sufrir daños producto de una descarga. Los efectos causados por efecto de inducción en la

estructura, definen zonas y elementos adicionales para su atenuación, éstas se verán en detalle en el apartado correspondiente a la norma IEC 62305-4[12].



1	Estructura	S1	Impacto sobre la estructura
2	Dispositivo Captor	S2	Impacto cerca de la estructura
3	Conductor de bajada	S3	Impacto sobre un servicio conectado a la estructura
4	Toma de tierra	S4	Impacto cerca de un servicio conectado a la estructura
5	Servicios entrantes	r	Radio de la esfera ficticia
		s	Distancia de separación para evitar chispas peligrosas

▽ Nivel del suelo

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

ZPR 0_A Descargas directas, corriente total del rayo

ZPR 0_B Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida

ZPR 1 Descargas no directas, corriente del rayo limitada o corriente inducida.

El volumen protegido en el interior de ZPR 1 debe respetar la distancia de separación s

Figura 2-1 Zonas de protección contra el rayo.
(Fuente: IEC 62305-1 [6])

Zonas exteriores (expuestas a descargas directas del rayo)

ZPR 0 Zona en la que amenaza es debida al campo electromagnético del rayo no atenuado y en la que los sistemas internos pueden estar sometidos a la corriente de onda tipo impulso total o parcial del rayo. La ZPR 0 se subdivide en:

ZPR 0_A Zona en la que la amenaza es debida al impacto directo de la descarga y al campo electromagnético total del rayo. Los sistemas internos pueden estar sometidos a la onda tipo impulso de corriente total.

ZPR 0_B Zona protegida contra las descargas directas pero en la que la amenaza es el campo electromagnético total del rayo. Los sistemas Internos pueden estar sometidos a comentes de onda tipo impulso parciales.

Zonas interiores (protegidas contra las descargas directas del rayo)

ZPR 1 Zona en la que la corriente de onda tipo impulso está limitada por la distribución de la comente y por los DPS en las zonas límites. El apantallamiento espacial puede atenuar el campo electromagnético del rayo.

ZPR 2...n Zona en la que la corriente de onda tipo impulso puede limitarse más mediante la distribución de la comente y DPS adicionales en la zonas límites. Puede emplearse apantallamiento espacial adicional para atenuar más el campo electromagnético del rayo.

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

2.2.2 Nivel de protección contra el rayo (NPR)

Para el objeto de esta norma, se consideran cuatro niveles de protección contra el rayo I (máximo nivel de protección, alta probabilidad de descarga) a IV (mínimo nivel de protección, baja probabilidad de descarga), cada NPR está sujeto a un conjunto de parámetros de corriente del rayo máximo y mínimo.

Los valores mínimos de la corriente del rayo se emplean en los diferentes NPR para calcular el radio de una esfera ficticia de protección, las disposiciones sobre ésta se verán en detalle posteriormente, con el fin de definir la zona de protección ZPR 0_B que no pueden ser alcanzada por el rayo directamente. Los valores mínimos de los parámetros de la corriente del rayo asociados al radio de la esfera ficticia están indicados en la tabla 2-1. Se emplean para determinar el emplazamiento de los dispositivos captadores y para definir la zona de protección ZPR 0_B.

Tabla 2-2 Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de esfera ficticia asociada a los niveles de protección. (Fuente: IEC 62305-1 [6])

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

Los valores máximos de los parámetros de la corriente del rayo para los diferentes niveles de protección contra el rayo se indican en la figura 2-2 y se emplean para el diseño de los componentes de protección contra el rayo (por ejemplo, sección de los conductores, espesor de las hojas metálicas, capacidad de corriente de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias, distancias de separación contra chispas peligrosas), y para definir los parámetros de ensayo que simulen en estos componentes los efectos del rayo.

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

Figura 2-2 Valores máximos de los parámetros del rayo correspondiente a los NPR. (Fuente: IEC 62305-1 [6])

No es objeto de esta norma aquella protección contra el rayo en la que se sobrepasan los valores máximos y mínimos de los parámetros de la corriente del rayo que corresponde al NPR I, no obstante la probabilidad de que aparezca un rayo cuyos parámetros máximos o mínimos de corriente sobrepasen a los que corresponde al NPR I es inferior al 2%.

Para el NPR I los valores máximos de los parámetros de comente no serán sobrepasados con una probabilidad del 99%.

2.2.3 Caracterización de la descarga

Como se vio en el capítulo anterior, existen cuatro tipos de descargas, de los cuales dos resultan de especial interés:

- Descargas descendentes, iniciadas por un precursor descendente desde la nube hacia tierra
- Descargas ascendentes, iniciadas por un precursor ascendente desde una estructura en tierra hacia la nube.

Las descargas descendentes aparecen principalmente en terrenos llanos y a estructuras poco elevadas, mientras que las ascendentes son dominantes en estructuras expuestas y/o elevadas. La probabilidad de impacto directo aumenta con la altura de las estructuras y con el cambio de las condiciones físicas.

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

- Impactos de corta duración menor a 2 [ms] (figura 2-3)
- Impactos de larga duración superior a 2 [ms] (figura 2-4).

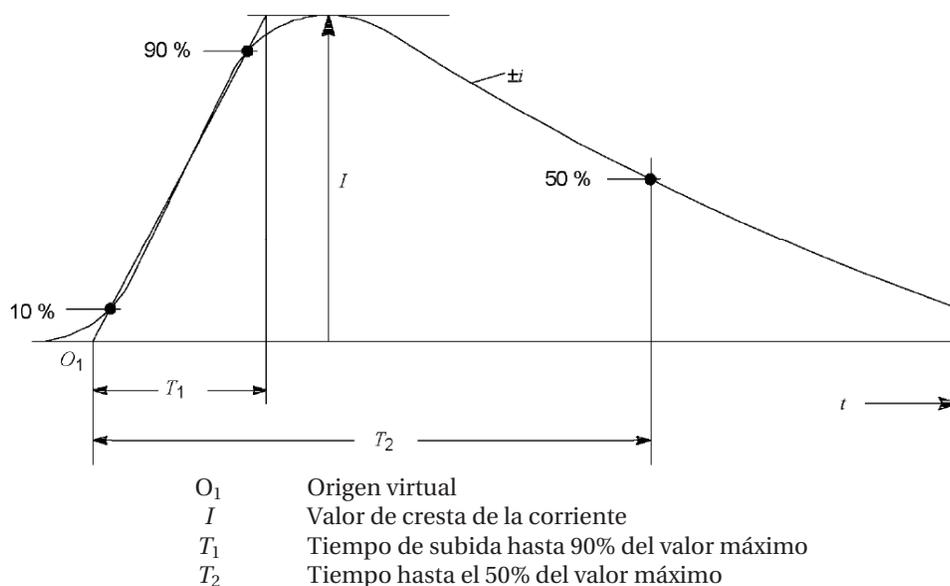


Figura 2-3 Curva característica de un impulso de corriente de corta duración.
(Fuente: IEC62305-1 [6])

Los valores de las constantes de tiempo I , T_1 y T_2 están establecidos en la figura 2-2, éstos dependen del nivel de protección y el tipo de impulso.

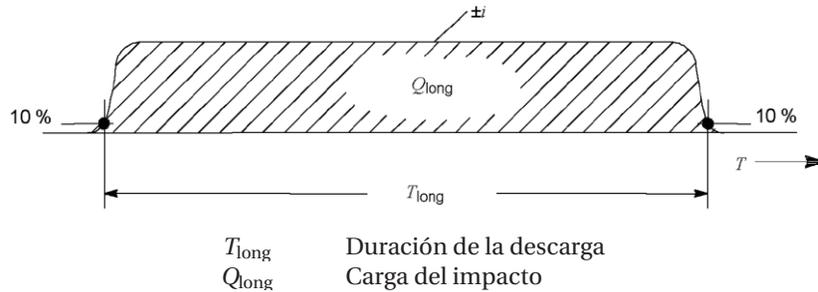


Figura 2-4 Curva característica de un impulso de corriente de larga duración.
(Fuente: IEC62305-1 [6])

Los impactos de larga duración generalmente van a continuación de un impacto corto, a pesar de que la magnitud de corriente es mucho menor a la de un impacto corto, al prolongarse durante un mayor tiempo, puede causar incendios y otros efectos adversos.

2.2.4 Efectos adversos producto de una descarga atmosférica

Los efectos adversos asociados a una descarga atmosférica están asociados a la corriente transferida a través de elemento de descarga, el conocimiento de estos efectos es importante para conocer las implicancias y la forma de atenuarlos, dentro de los principales se puede destacar:

Efectos térmicos

La conducción elevada de corriente produce un calentamiento resistivo de conductores, partes metálicas o el sistema de protección mismo, al mismo tiempo el calor generado por arcos eléctricos en el punto de impacto y otros, generan temperaturas que debilitan los materiales y pueden dañarlos de forma irrecuperable.

- Calentamiento resistivo: La sección mínima de los conductores debe ser suficiente para que no se produzca un sobrecalentamiento de los mismos, evitando riesgos de inflamación.
- Daño térmico en el punto de impacto: La mayor parte de la energía térmica se genera en la superficie del material o en las proximidades, debido a la alta densidad de corriente, en el punto de impacto puede producirse fusión y erosión de los materiales, la severidad del proceso está relacionada con la amplitud de la corriente y su duración.

Efectos mecánicos

Los efectos mecánicos producidos por la corriente del rayo dependen de la amplitud y duración del mismo, así como de las características elásticas de la estructura afectada y los esfuerzos de rozamiento entre las distintas partes en contacto.

- Interacción magnética: Las fuerzas magnéticas se producen cuando dos conductores cercanos son recorridos por corrientes eléctricas, éste efecto puede darse para el caso de

dos o más conductores o en el caso de un conductor, cuando éste forma un bucle o esquina.

- **Fuerzas electrodinámicas:** La fuerza electrodinámica aplicada es proporcional al cuadrado de la corriente instantánea, las deformaciones del material aparecen cuando el esfuerzo de la tensión es superior al límite elástico del mismo. Para evitar estos efectos, se evitan materiales blandos y en particular cambios abruptos de dirección de los conductores de bajada que puedan acrecentar estos efectos.

Chispas

En forma general, las chispas son sólo importantes en ambientes inflamables. Existen dos tipos de chispas asociadas al fenómeno:

Chispa térmica: La chispa térmica ocurre cuando una alta corriente atraviesa una junta entre dos materiales conductores, 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, se produce éste efecto.

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.

Chispa eléctrica: Las chispas eléctricas ocurren cuando el circuito eléctrico presenta bucles, en el caso de una junta se puede producir la chispa si la tensión inducida en el bucle que forma el circuito es superior a la rigidez dieléctrica existente entre las partes metálicas de las bridas.

La tensión inducida es proporcional a la autoinducción propia multiplicada por la pendiente de la corriente del rayo, el componente de la corriente del rayo más crítico para la chispa eléctrica es por tanto, el subsiguiente impacto negativo.

2.3 Evaluación del riesgo - IEC 62305-2 [7]

En el marco de la implementación de un sistema de protección contra el rayo, parte inicial corresponde a la evaluación del riesgo asociado en la zona de interés, éste apartado indica las consideraciones y la forma de evaluar dicho riesgo a modo de saber qué nivel de protección mínimo es el que se necesita.

2.3.1 Parámetros de evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo se evalúa en base una serie de parámetros definidos según la fuente de daño, el tipo de daño y los tipos de pérdidas, tales como:

Fuentes de daño

La principal fuente de daño es la corriente eléctrica, dependiendo del punto de impacto se clasifican en:

- S1: Descarga contra una estructura.

- S2: Descarga cerca de una estructura.
- S3: Descarga sobre un servicio.
- S4: Descarga cerca de un servicio.

Tipos de daños

Una descarga puede causar daños en función de las características del objeto protegido. Algunas de las características más importantes para éste punto son el tipo de contenido, construcción, tipos de servicios y medidas de protección previstas.

Resulta útil distinguir para aplicaciones prácticas de evaluación de riesgo tres tipos básicos de daño que pueden ocurrir como resultado de una descarga, estas son:

- D1: Daño a seres vivos
- D2: Daño físico
- D3: Falla de los sistemas

Tipos de pérdidas

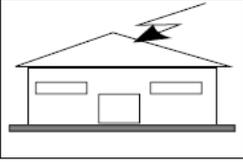
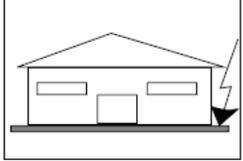
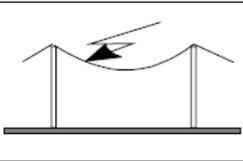
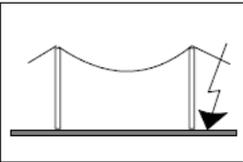
Cada tipo de daño por si sólo o en combinación puede producir diferentes tipos de pérdidas. Los tipos de pérdidas que pueden ocurrir dependen de las características del objeto o su contenido, se identifican los siguientes:

- L1: Pérdida de vidas humanas
- L2: Pérdida de servicios públicos
- L3: Pérdida de patrimonio cultural
- L4: Pérdida de valor económico

Estos tipos de pérdida pueden ser asociados al daño de una estructura. A su vez, los tipos de pérdidas que pueden estar asociados a un servicio corresponden a:

- L'2: Pérdida de servicios públicos
- L'4: Pérdida de valor económico (de servicio o pérdida de actividad)

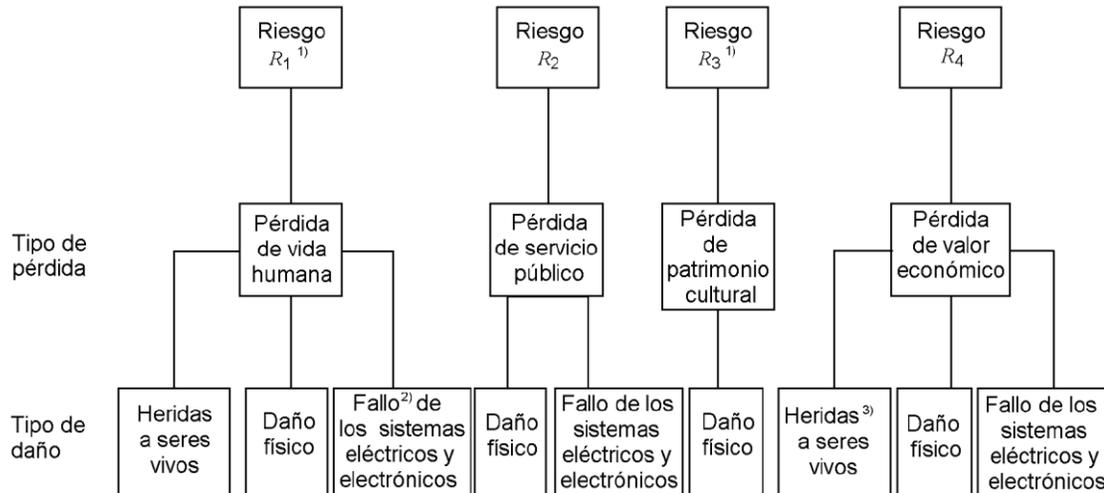
Luego el punto de descarga determina las fuentes de daño, los tipos de daños posibles, con las consiguientes pérdidas posibles como se ilustra en la figura 2-5.

Lightning flash		Structure	
Point of strike	Source of damage	Type of damage	Type of loss
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4

- a) Para estructuras en que el fallo del sistema interno resulte en un riesgo inmediato a la vida humana.
- b) Para propiedades donde pueden ocurrir pérdidas de ganado.

Figura 2-5 Fuentes de daño, tipo de daño y pérdida según punto de impacto.
(Fuente: IEC62305-2 [7])

Los tipos de pérdida en función de los tipos de daños y riesgos correspondientes se indican en la figura a continuación.



- 1) Solamente para las estructuras.
- 2) Solamente para los hospitales o estructuras análogas en las que un fallo de los sistemas internos pone en peligro la vida humana Inmediatamente.
- 3) Solamente en el caso de pérdidas de animales.

Figura 2-6 Tipos de pérdida y riesgos asociados debido a diferentes tipos de daños
(Fuente: IEC62305-2 [7])

En cuanto a los riesgos probables, R_4 representa los riesgos de menor gravedad con daños de tipo económicos y daños físicos a animales, pasando por R_3 y R_2 , pérdidas de patrimonio cultural y prestaciones de servicio público, hasta llegar a R_1 el cual posee hace referencias a interrupciones de servicio que atenten directamente a la vida humana o que dañen éstas directamente.

Evaluación de riesgos

El proceso de la evaluación del riesgo considera parámetros propios del entorno y características de la estructura de para definir la magnitud del riesgo, a cada tipo de riesgo se le asigna una variable con cierto margen de movilidad, éstas se agrupan, operan con algunos factores definidos y se obtiene un factor asociado al riesgo respectivo tanto de forma directa como de forma indirecta.

En los parámetros de evaluación se puede destacar:

- Dimensiones de la estructura: A mayor área, más robusto ha de ser el sistema de protección. Resulta de especial interés la altura del techo en general y la altura de la mayor saliente y/o punto de más altura respecto al techo, una saliente pronunciada actúa como pararrayos natural, aumentando el riesgo.
- Características de la estructura: Relativa a al riesgo de incendio, vulnerabilidad a daños físicos, el tipo de cableado interno y las conexiones equipotenciales implementadas.
- Influencias del ambiente: El principal factor ambiental de interés corresponde al índice cerámico, éste hace referencia a la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado en la

zona durante un año. Otras características de interés corresponden a las condiciones respecto al entorno en cuanto a si se trata de una instalación rural o urbana y si esta se encuentra inmersa entre otras estructuras, parcialmente aislada u totalmente aislada. Es de esperar que mientras más aislada esté la estructura, mayor sea el riesgo de recibir un impacto.

- Tipo de instalación eléctrica: Los factores de interés corresponden a la forma en que se alimenta la estructura, los servicios aéreos con transformadores externos y conductores no aislados presentan riesgos superiores que instalaciones que se alimentan de forma subterránea, sin equipos eléctricos a la intemperie y con conductores aislados.
- Tipo de pérdida según naturaleza de la estructura.
 - Pérdidas humanas: se incluyen parámetros de riesgo en base a dificultades de evacuación, tipo de establecimiento y posibilidad de daños a los mismos por sobretensiones.
 - Pérdidas de servicios esenciales: Los servicios esenciales son aquellos que su cese puede atentar directamente contra la vida humana, se valoriza el riesgo de sufrir daños a éstos servicios por concepto de incendio u sobretensiones.
 - Pérdida de patrimonio cultural: Se aplica un factor en caso de que corresponda.
 - Pérdidas económicas: Se evalúan las posibles implicancias de una descarga en cuanto al daño por incendio, sobretensiones, tensión de paso, características especiales del lugar y tolerancia a pérdidas económicas. El enfoque de las pérdidas económicas va hacia la actividad del recinto y los elementos en su interior.

Una vez ponderados los riesgos por cada categoría en cuanto a los riesgos directos e indirectos ante una descarga, operando la suma de ambos se obtiene el riesgo total para cada categoría, el nivel de protección seleccionado ha de ser suficiente para mantener los riesgos bajo márgenes previamente estipulados.

Para simplificar éste proceso, la IEC proporciona un software mediante el cual a partir de la topología del lugar y una serie de características del recinto a proteger, proporciona un indicador de las distintas probabilidades de daño ante descargas, también define en base a la información entregada, el nivel mínimo de protección válido para el recinto a proteger. En forma análoga algunos fabricantes ofrecen plataformas gratuitas donde se puede evaluar el riesgo usando parámetros análogos a los de la norma IEC, tal es el caso del fabricante Ciprotec con la plataforma web “Nimbus Project”.

3 Sistema de Protección Contra el Rayo (SPCR)

Un sistema de protección contra el rayo evita que las descargas atmosféricas impacten en la estructura que se desea proteger, captando la descarga y conduciéndola a tierra en forma segura y aislada respecto a la instalación. El sistema se compone fundamentalmente de tres partes, un captador, una puesta a tierra equipotencial y un conductor eléctrico de bajada, también denominado “bajante” que uno el captador con la malla a tierra, en éste apartado se verá las características de cada una de éstas y los parámetros que deben cumplir en el marco de la normativa, para asegurar una protección satisfactoria.

Un SPCR se compone de una serie de elementos eléctricos, las características que cada uno de éstos debe tener, las restricciones para su instalación, entre otros aspectos están sujetas al riesgo involucrado y el tipo de SPCR, para ello se describe algunas de las características de carácter general del sistema de protección.

3.1 Construcción del SPCR externo

La descarga de un rayo provoca efectos directos e indirectos, cuando una descarga impacta un edificio desprotegido pueden presentarse riesgos debido a tensiones de contacto y de paso, por ello el SPCR, está formado normalmente por un sistema externo y otro interno.

Un SPCR externo tiene como fin

- Interceptar descargas de los rayos en la estructura
- Conducir con seguridad, la corriente de los rayos a tierra
- Dispersar la corriente de los rayos en tierra

Las características de un SPCR se determinan por las de la estructura a proteger y el nivel de protección contra el rayo, cada nivel protección establece un nivel de SPCR y con ello define ciertos parámetros a implementar, la clase del SPCR requerido debe seleccionarse en base a la evaluación del riesgo.

Tabla 3-1 Correspondencia entre los niveles de protección contra el rayo (NPR) y las clases de los SPCR.
(Fuente: IEC 62305-3 [9])

NPR	Clases de SPCR
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Existen criterios en la implementación de un SPCR que dependen del nivel de protección contra el rayo, así como otros que se cumplen para cualquier SPCR pues no dependen de la clase del SPCR.

Datos que dependen de la clase del SPCR

- Parámetros del rayo
- Radio de la esfera rodante, tamaño de la malla y ángulo de protección
- Distancias normales entre los conductores de bajada y entre los anillos conductores
- Distancia de separación para evitar la formación de chispas peligrosas
- Longitud mínima de los electrodos de tierra

Datos que no dependen de la clase del SPCR

- Conexiones equipotenciales
- Espesores mínimos de las chapas o de las tuberías metálicas en los sistemas de captura
- Materiales y condiciones de empleo de los SPCR
- Materiales, configuraciones y dimensiones mínimas de los captadores, conductores de bajada y tomas de tierra
- Dimensiones mínimas de los conductores de conexión

A continuación, se describen los elementos que conforman el SPCR externo, junto a las principales disposiciones para su implementación, basados en la norma IEC62305-3[9], IEC62305-4[12] y UNE 21186-2011[10].

3.1.1 Captadores de tipo pasivo

La probabilidad de que una corriente del rayo penetre en una estructura disminuye de una manera notoria con la presencia de un sistema de captura debidamente diseñado. Los sistemas de captura pueden estar formados por cualquier combinación de los elementos siguientes:

- Varillas (Punta Franklin)
- Conductores mallados
- Pararrayo con dispositivo de Cebado (PDC)

Las varillas y conductores mallados corresponden a captadores de tipo pasivo, atraen la descarga por efectos naturales, la carga positiva asciende del suelo, a través de la conexión de toma de tierra, hasta la punta del pararrayos, que al situarse en una altura predominante, se convierte en un punto favorable a la caída del rayo, evitando que la descarga se produzca en otra parte de la instalación. En tanto los PDCs son de tipo activo, es decir, se polarizan de forma de conseguir una mayor efectividad en la captura de la descarga.

Los captadores instalados en una estructura deben colocarse en la parte superior de las estructuras, en esquinas, puntos salientes y en los ángulos, para el caso de los captadores pasivos, éstos se dimensionan de acuerdo con uno o varios de los siguientes métodos:

- Método del ángulo de protección
- Método de la esfera rodante
- Método de la malla

El método de la esfera rodante es apropiado para todos los casos. El método del ángulo de protección es adecuado para edificios con formas simples, pero está sometido a limitaciones, en la altura del sistema captador. El método de la malla es de aplicación cuando se van a proteger superficies planas.

Método de la esfera rodante

Cuando la descarga se inicia aparece el llamado “trazador descendente” con dirección nube a tierra, cuando el trazador se aproxima a la superficie, el campo eléctrico en la punta del pararrayos alcanza un valor crítico, lanzando un trazador ascendente. La distancia que hay entre el trazador descendente y la punta del pararrayos cuando se alcanza el valor crítico se denomina “Striking Distance, d_s ” [8] o “radio de captura” y está directamente relacionada con la corriente del rayo, ésta descripción es válida para descargas descendientes negativas, las cuales corresponden al 90% de la ocurrencia a nivel mundial.

Éste método considera como variables principales una esfera de cierto radio y el nivel de corriente para el cuál se quiere resguardar, para ello se citan algunas probabilidades de la corriente peak I_k de la primera descarga [9]:

- 1% de los rayos tienen una intensidad mayor que 200[kA]
- 10% de los rayos tienen una intensidad mayor que 80[kA]
- 50% de los rayos tienen una intensidad mayor que 28[kA]
- 90% de los rayos tienen una intensidad mayor que 8[kA]
- 99% de los rayos tienen una intensidad mayor que 3[kA]

Experimentalmente se llegó a la siguiente relación:

$$d_s = a * I_k^p \quad (3-1)$$

Dónde:

d_s : Radio en metros, equivalente a la distancia desde el pararrayos a la superficie

I_k : Corriente en kilo-amperes

Los valores de a y b varían según distintos resultados de investigaciones, los valores indicados por la IEC corresponden a $a = 10$ y $b = 0,65$. A partir de d_s se desarrolla el modelo electrogeométrico para las zonas expuestas y protegidas. Al elegir una corriente de peak cualquiera I_k , se halla el d_s , cualquier otra corriente mayor a I_k tendrá una distancia de impacto mayor a d_s . Esto implica que al ubicar las protecciones usando I_k se estará protegiendo también para cualquier corriente mayor, pero sin embargo no necesariamente para corrientes menores a I_k .

Por tanto ningún rayo puede impactar un objeto que se encuentra fuera de la esfera de radio d_s con centro en la punta del líder descendente. El proceso descrito se esquematiza en la figura 3-1.

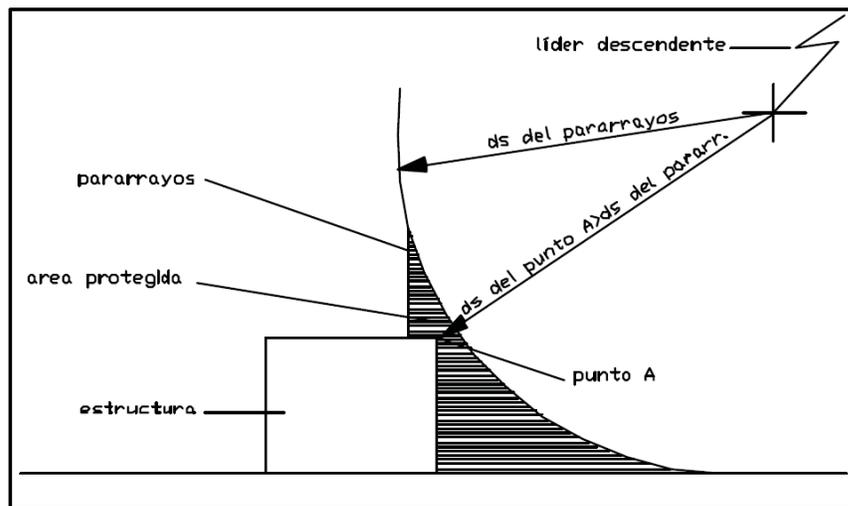


Figura 3-1 Zona de protección de un pararrayos según el método de la esfera rodante.

(Fuente: "Application of the Rolling Sphere Method" [8])

En base a esto se infiere que a mayor corriente, mayor será el radio de la esfera y por lo tanto más espacio puede haber entre pararrayos. Una situación indeseada ocurre para corrientes de 3 [kA] o menores, donde el radio de la esfera resulta de sólo 20 metros y va a requerir una mayor cantidad de pararrayos para proteger la estructura. No obstante, la norma estandariza el radio de la esfera según el nivel de protección del SCPR como se indica en la tabla 3-2.

Tabla 3-2 Valores máximos del radio de la esfera rodante para cada clase de SPCR.
(Fuente: IEC62305-3 [9])

Clases de SPCR	Radio de la esfera rodante r [metros]
I	20
II	30
III	45
IV	60

Aplicando este método, el posicionamiento de un sistema de captura es adecuado si ningún punto del volumen a proteger está en contacto con una esfera de radio d_s , rodando sobre el suelo, alrededor y en la parte superior de la estructura en todas las direcciones posibles. Por lo tanto, la esfera sólo debería tocar la tierra y/o el sistema de captura., la figura 3-2 ejemplifica un caso simple con captadores.

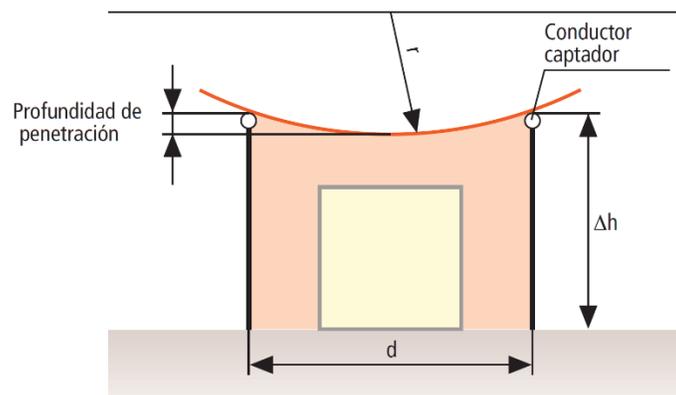


Figura 3-2 Zona de protección de dos pararrayos según el método de la esfera rodante.
(Fuente: www.dehn.es)

Se observa en la figura 3-2 que la separación d entre los captadores induce una penetración por parte de la esfera, como se mencionó anteriormente, cuanto menor sea el radio de la esfera, mayor será la penetración entre los captadores, por tanto se requirieran más de éstos para proteger la misma área.

El método es aplicable en estructuras irregulares, como se observa en la figura 3-3.

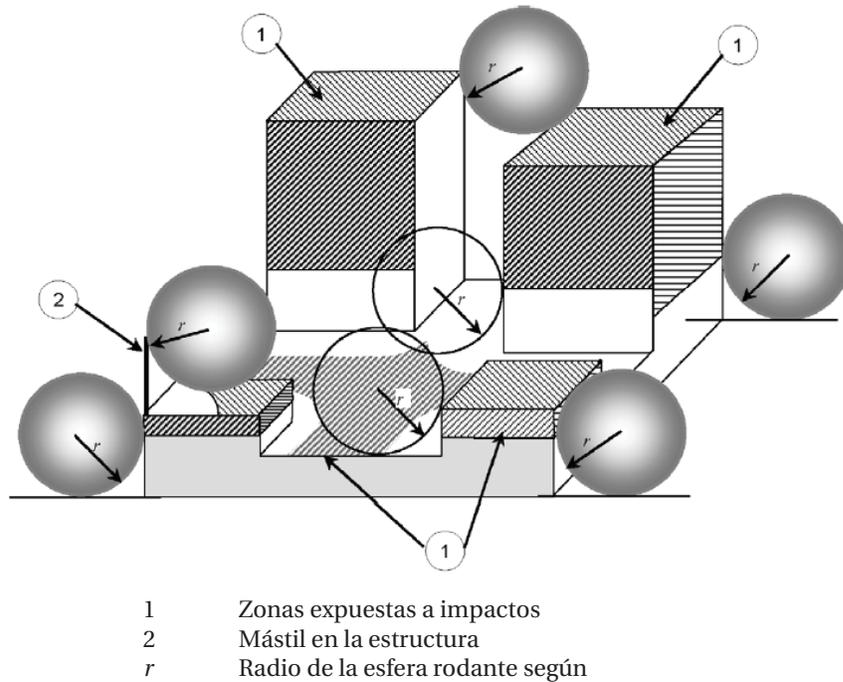


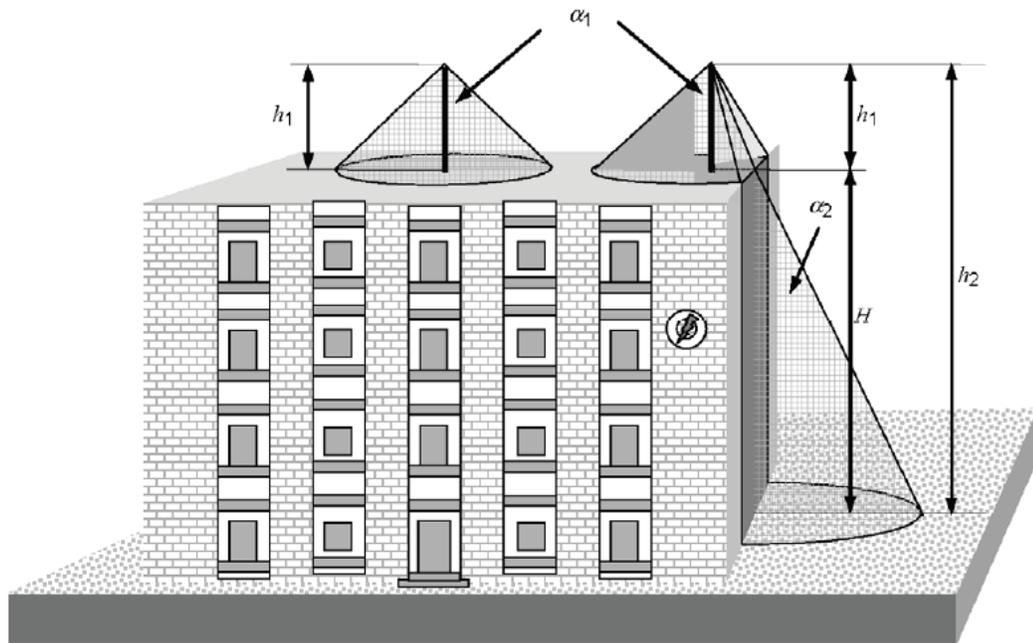
Figura 3-3 Aplicación del método de la esfera en superficie irregular
(Fuente: IEC 62305-3 [9])

Se puede apreciar que el método de la esfera es capaz de otorgar las herramientas para determinar la cantidad de protecciones en instalaciones complejas como la figura 3-3, además el complemento de éste con el método de mallas flexibiliza aún más su aplicación.

Método del ángulo de protección

El método del ángulo de protección consiste en que al posicionar el captador a una altura superior a dos metros sobre al punto más alto de la estructura, mediante un mástil u elemento similar, éste genera una suerte de “paraguas”, dónde el área que éste cubre representa la zona protegida por el captador. El área protegida dada por el ángulo de apertura o ángulo de protección α depende principalmente de la altura a la cual se posiciona por sobre la estructura y el nivel de protección que se utiliza.

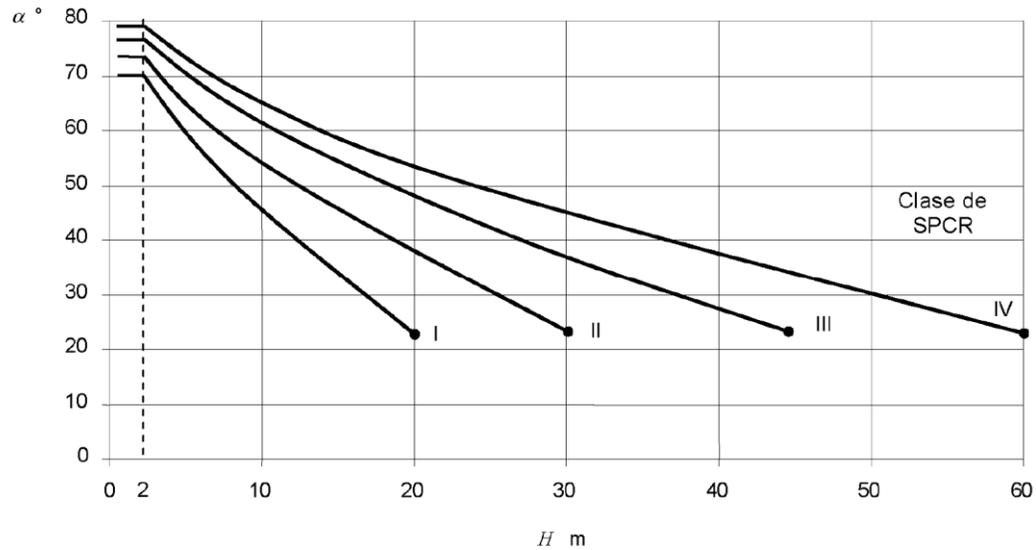
La figura 3-4 ilustra en forma genérica la variación del ángulo de protección tomando como referencia la altura de desde el punto más alto y la altura desde la superficie.



H	Altura de edificio sobre el plano de referencia de tierra
h_1	Altura física de una varilla captadora
h_2	$h_1 + H$ altura de la varilla captadora sobre el plano de tierra
α_1	Ángulo de protección correspondiente a la altura del sistema captador $h = h_1$, medido sobre el plano del techo (plano de referencia)
α_2	Ángulo de protección correspondiente a la altura h_2

Figura 3-4 Diseño de un SPCR según el método del ángulo para diferentes alturas.
(Fuente: IEC 62305-3 [9])

El método del ángulo de protección está basado en los principios del método de la esfera rodante y está sujeto a límites geométricos, éste no puede aplicarse si h es mayor que el radio de la esfera rodante r correspondiente al nivel de protección seleccionado, el ángulo de protección en función de la altura y nivel del SCPR se indica en la figura 3-5.



Nota 1: No es aplicable para valores superiores a los marcados con °. En estos casos sólo se aplican los métodos de la esfera rodante y de la malla

Nota 2: H es la altura del captador por encima del plano de referencia de la zona a proteger.

Nota 3: El ángulo de protección no cambia para valores de H inferiores a 2 m.

Figura 3-5 Ángulo de protección según la altura del captador y clase de SPCR.
(Fuente: IEC62305-3 [9])

En forma general, el método del ángulo de protección resulta conveniente para ser aplicado en estructuras de formas simples, que no sobrepasen los 20 metros de altura.

Método de la malla

La malla captadora es una red metálica conectada a tierra que cubre todo el edificio, cuando el rayo impacta la descarga se distribuye por toda la red, reduciendo el daño que puede causar a la instalación.

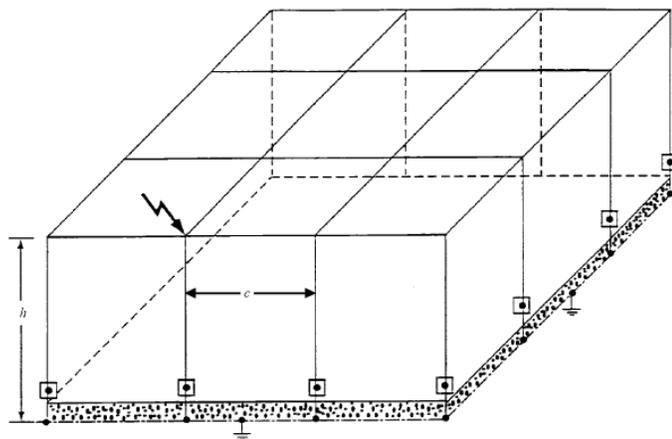


Figura 3-6 Malla captora referencial
(Fuente: IEC 62305-3 [9])

La malla captora cubre la zona a proteger, aislando la instalación interior, la densidad de la malla determina la capacidad de proteger la instalación que cubre, se busca un equilibrio entre el nivel de protección y el costo de la implementación.

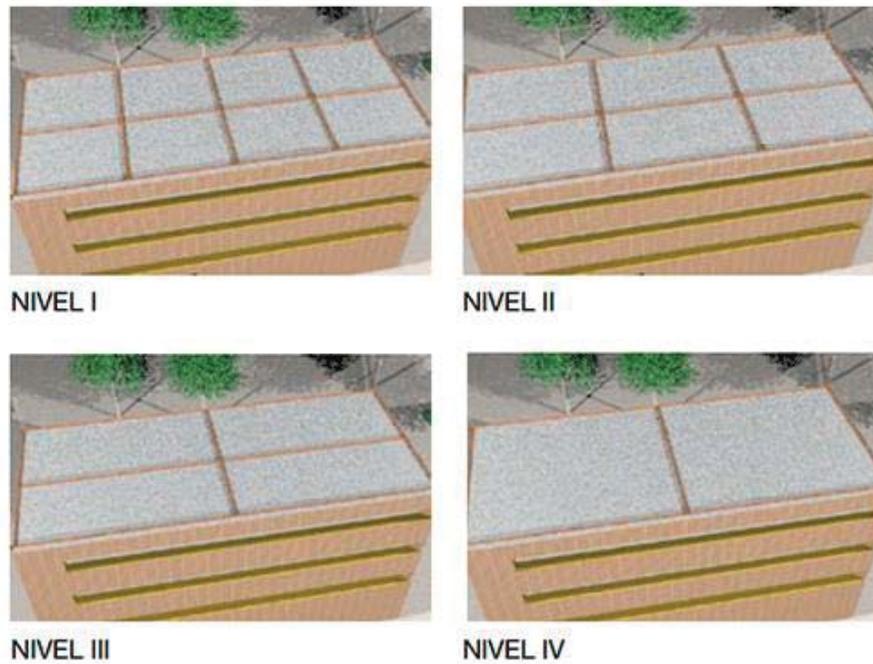


Figura 3-7 Malla captadora de referencia según nivel de protección.
(Fuente: <https://www.ingesco.com>)

En forma estandarizada la malla debe cubrir toda la superficie a proteger, el nivel de protección determina la densidad de la misma según las disposiciones de la tabla 3-3.

Tabla 3-3 Tamaño de la malla para cada clase de SPCR.
(Fuente: IEC62305-3 [9])

Clases de SPCR	Tamaño de la malla W [metros]
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Este método resulta conveniente cuando la superficie a proteger es plana y extensa u en complemento de alguno de los otros métodos descritos.

3.1.2 Captador de tipo activo, pararrayos con dispositivo de cebado (PDC)

Los pararrayos con dispositivo de cebado corresponden básicamente a captadores de descarga que incorporan un sistema eléctrico autónomo, que en condiciones atmosféricas de riesgo se polariza y logra capturar las descargas atmosféricas.

Éste tipo de protecciones se caracteriza principalmente por el rango de protección ofrecido frente a un dispositivo clásico de tipo pasivo, donde el alcance del mismo en este caso depende también de las especificaciones electrónicas del captador.

Actualmente no existe una regulación a nivel nacional para éste tipo de protecciones, sin embargo existen un sin número de normativas extranjeras que las regulan, en forma particular para cualquier efecto relativo a éste trabajo, se optó por la norma UNE 21186 – 2011[10], la cual toma como base antecedentes de la norma IEC 62305[6], entre otras, añadiendo las restricciones correspondientes en materia de pararrayos activos.

Normativa asociada: UNE 21186 – 2011

Toda instalación está sujeta a distintos parámetros tales como los asociados al diseño propio de la estructura, así como el medio tanto climatológico como físico en el cual se encuentra ubicado. Los tipos de materiales empleados, así como la utilidad de la instalación determinan distintas configuraciones bajo las cuales se puede asegurar cierto nivel de resguardo ante descargas atmosféricas.

Esta normativa toma como referencia un análisis del riesgo análogo al de la IEC 62305-2[7] y bajo ésta premisa establece el dimensionamiento y cobertura de los elementos de protección.

A continuación se describen algunos de los principios generales que aplican a éste tipo de captadores de descarga.

Eficacia de un PDC

Como se mencionó anteriormente, un PDC se caracteriza por su mayor radio de cobertura frente a los captadores de tipo pasivo, éste efecto se logra por el tiempo que el PDC es capaz de “adelantarse” al trazador de bajada, de forma de presentar un punto de descarga virtualmente por sobre el punto físico real de anclaje, ésta característica resulta ser un parámetro clave respecto a las prestaciones del PDC, se mide en tiempo y generalmente su valor es de algunas decenas de micro-segundos.

A destacar algunas de las características bajo las cuales se certifica el delta de tiempo corresponden a:

- Temperatura de Funcionamiento: de $-20[^\circ\text{C}]$ a $60 [^\circ\text{C}]$.
- Velocidad del viento menor a $122 [\text{km/h}]$.
- Sin condiciones de Nieve y/o Hielo.
- Impulso de rayo de hasta $100[\text{kA}]$ (onda 10/350) [3]
- Condiciones ambientales adversas, tales como ambientes salinos o sulfurosos y contaminación industrial.

Medida del avance en el cebado de un PDC

Se define el avance en el cebado o cebado propiamente tal, como la capacidad de generar un trazador ascendente que intercepta el trazador descendente de la descarga a una mayor altura del punto de impacto del rayo, aumentando así el área de cobertura.

Éste proceso se vio anteriormente en el apartado de las etapas en la formación del rayo, sin embargo, al tratarse de un procedimiento clave en el funcionamiento del PDC, a continuación se describe en detalle la evolución del proceso electro-físico, éste consta de cuatro fases.

Fases del trazador ascendente [11]

1. Primera fase

Es una fase cuasi estática donde se crean campos eléctricos por debajo de una nube tormentosa, estos campos eléctricos hacen que se exciten eléctricamente los objetos que están sobre la superficie del suelo y puedan emitir descargas por el efecto corona según sean sus alturas y sus formas geométricas. Así se crea una carga eléctrica espacial en el campo eléctrico inmediatamente cercano ubicado hacia arriba de cada objeto, los iones de ésta carga espacial ascienden con velocidades típicas de $1 [\text{m/s}]$ en campos de $10 [\text{kV/m}]$ y crean alinealidades en el campo a alturas de varios centenares de metros, por este fenómeno, la intensidad del campo eléctrico observado a nivel del suelo se modifica antes de que ocurra algún evento dinámico con valores medianos a $[50\text{kV/m}]$ que se reducen a valores menores que $5 [\text{kV/m}]$ cerca del suelo.

2. Segunda fase

Esta fase corresponde al acercamiento de un trazador descendente que desciende desde la nube hacia el suelo a velocidades medias del orden de $0,1 [\text{m}/\mu\text{s}]$ pero con pausas de 20 a 50 $[\mu\text{s}]$. Las velocidades del trazador descendente entre dos pausas sucesivas pueden exceder de $1 [\text{m}/\mu\text{s}]$.

La convergencia de cargas hacia la tierra provoca un aumento exponencial de la intensidad del campo eléctrico que se observa en puntos a tierra, es decir, hay un pequeño cambio inicial en la intensidad del campo eléctrico observado en la tierra cuando el trazador está a gran altitud, cerca del encuentro con la tierra, los valores del campo crecen a razón de $1 [\text{kV}/\text{m}/\mu\text{s}]$, aproximadamente.

3. Tercera fase

La tercera fase ocurre cuando las intensidades del campo eléctrico ambiental alcanzan el valor crítico necesario para crear la interrupción dieléctrica del aire por avalanchas (iónicas y/o

electrónicas) que se originan a partir de un efecto corona en la punta del pararrayos (o de cualquier otro cuerpo u objeto de la tierra).

Este efecto corona inicial puede llegar hasta provocar la emisión de un trazador corona y, finalmente, al desarrollo de un trazador ascendente efectivo que se desarrolla desde la tierra hacia la nube, en una transición crítica del trazador corona al trazador ascendente estable que tiene lugar unos dos metros arriba del pararrayos o del lugar de impactos efectivo del rayo a tierra.

4. Cuarta fase

Esta cuarta fase es la propagación continuadora del trazador ascendente estable efectivo que partió desde el presunto punto de impacto o punto de impacto virtual (PIV) hacia la nube.

La aptitud de intercepción de un trazador ascendente “lanzado” desde un pararrayos, o desde otro punto de impacto virtual de un rayo a tierra (PIV), hacia la nube tormentosa depende de la relación:

$$R_v = \frac{V_d}{V_a} \quad (3-2)$$

Donde

Vd: Velocidad de los trazadores descendentes que convergen al PIV.

Va: Velocidad de los trazadores ascendentes que emergen al PIV.

Rv: Relación entre las velocidades de los trazadores descendentes y ascendentes.

Por lo tanto, cuando comienza la propagación del trazador ascendente que sale de un PIV hacia la nube tormentosa, la relación entre las velocidades de todos los eventuales trazadores descendentes que convergen hacia un PIV y la velocidad del trazador ascendente que emerge de ese PIV al posible encuentro con alguno de esos trazadores convergentes a ese PIV, deben ser tales que

$$R_v = \frac{V_d}{V_a} \leq 1 \quad (3-3)$$

Ésta condición determina el efectivo radio de atracción de un pararrayos o de otro punto de un objeto puesto a tierra (por ejemplo, vértices de triedros de paredes, cúpulas, agujas arquitectónicas y ejes de diedros de paredes, barandas metálicas, bordes, etc.).

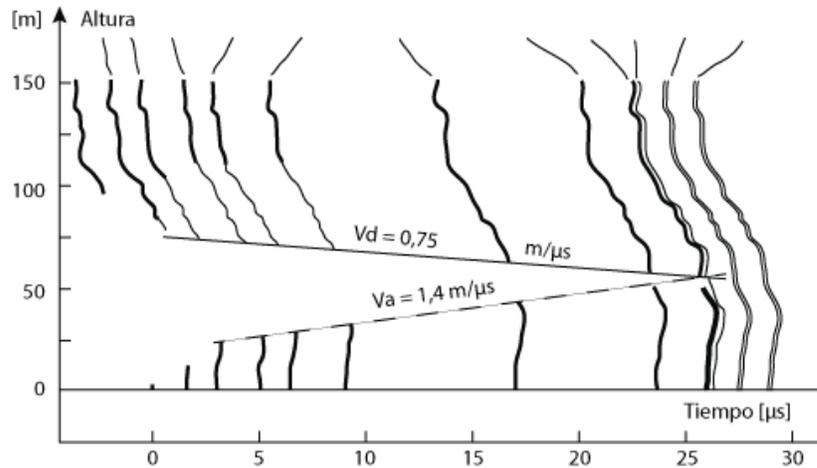


Figura 3-8 Fotografía del proceso espacio-temporal de caída de un rayo durante una tormenta en Japón [11]

La figura 3-8 corresponde a una fotografía del proceso espacio-temporal de caída de un rayo en Japón [11], siendo $V_d/V_a = 0,75 \text{ [m/}\mu\text{s]}/1,4 \text{ [m/}\mu\text{s]} = 0,54$.

En tanto, según la norma UNE 21186 [10], un PDC debe validar un delta de tiempo entre 10 y 60 micro segundos. Aunque los ensayos de laboratorio pudiesen sugerir un mayor delta, no existe ninguna normativa que certifique un alcance superior al límite mencionado.

Condiciones de experimentales

Para emular las condiciones de una descarga, la normativa indica que los ensayos correspondientes deben realizarse en referencia a las estipulaciones de la norma UNE-EN 61180-1 [13].

Los ensayos efectuados corresponden a comparaciones bajo laboratorio de un captador pasivo o punta referencial (PR) con un captador activo PDC, éstos se ubican bajo una placa conductora la cual es conectada a un generador de tensión continua y un generador de impulsos.

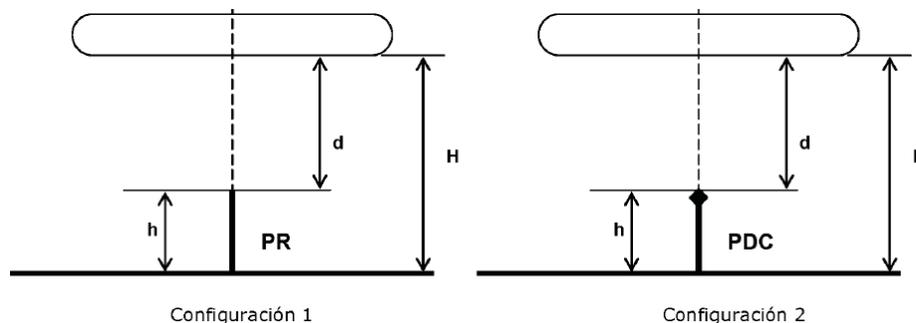


Figura 3-9 Esquema ensayo de medición PDC
(Fuente: UNE 21186-2011 [10])

Las condiciones impuestas por esta norma establecen estrictas restricciones con relación a las dimensiones del montaje, condiciones eléctricas y geométricas, además del ambiente controlado de forma de recrear escenarios similares para cada pararrayos.

Los aspectos asociados a las características eléctricas tanto de la descarga, como de las condiciones asociadas al campo eléctrico a nivel de suelo. Éste último tiene consecuencias directas sobre el efecto corona y las cargas espaciales preexistentes, por ello su valor se normaliza en un rango comprendido entre 10 [kV/m] a 25 [kV/m].

De forma análoga, las condiciones de tormenta afectan el campo eléctrico a nivel de superficie, aumentando su valor a medida que se aproxima una descarga a tierra, éste fenómeno es simulado mediante el crecimiento del campo a nivel de suelo usando una onda de maniobra con un tiempo de subida comprendido entre 100 [µs] a 1000 [µs].

En cuanto a los parámetros eléctricos de la descarga simulada, en cuanto a corriente los PDCs deben ser capaces de soportar un impulso de rayo de 100 [kA], usando como base la onda 10/350.

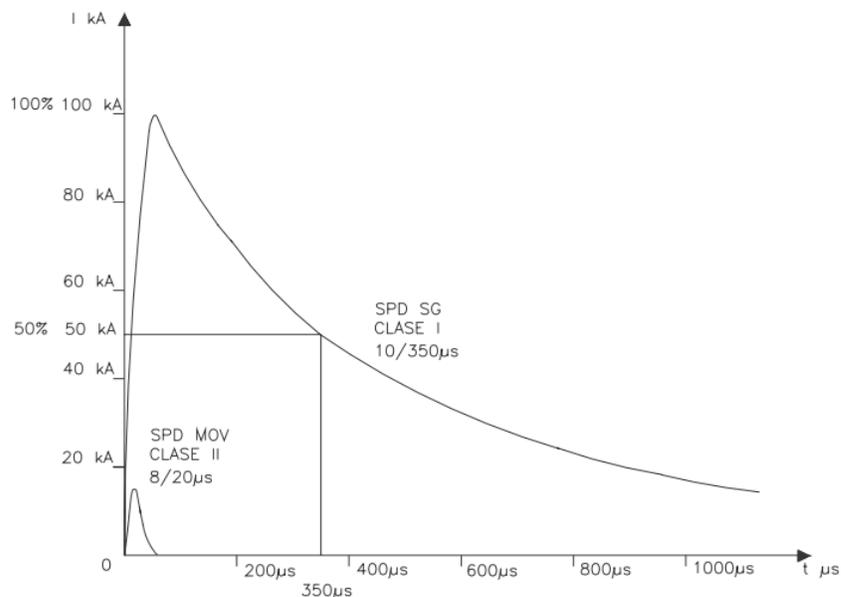


Figura 3-10 Característica de corriente ensayo 10/350
(Fuente: IEC 61643-1[14])

El nombre del ensayo descrito hace alusión al tiempo en que tarda la onda en llegar al 90% de su valor máximo, (10 [µs]) y el transcurso de tiempo en el que el valor disminuye al 50% de su valor máximo (350 [µs]).

Existe un consenso internacional en que ésta forma de onda modela aceptablemente bien la corriente de pico conducida y la transferencia de carga y energía durante el impacto directo de

un rayo. Por este motivo, los dispositivos protectores se testean con esta forma de onda. Por otro lado, las corrientes inducidas se representan con una forma de onda del tipo 8/20 [µs].

Resultados de los experimentos

El criterio escogido para evaluar la eficacia de mi PDC es su capacidad para iniciar reiteradamente el cebado de un trazador ascendente antes que un PR situado en las mismas condiciones.

Se mide el valor del tiempo de emisión del trazador ascendente para cada impacto utilizable sobre el PDC y sobre la PR. Este tiempo se mide entre el punto de intersección del eje de tiempos con la curva de tensión impulsional y el tiempo correspondiente al cambio brusco de la pendiente de la tensión impulsional correspondiente a una emisión.

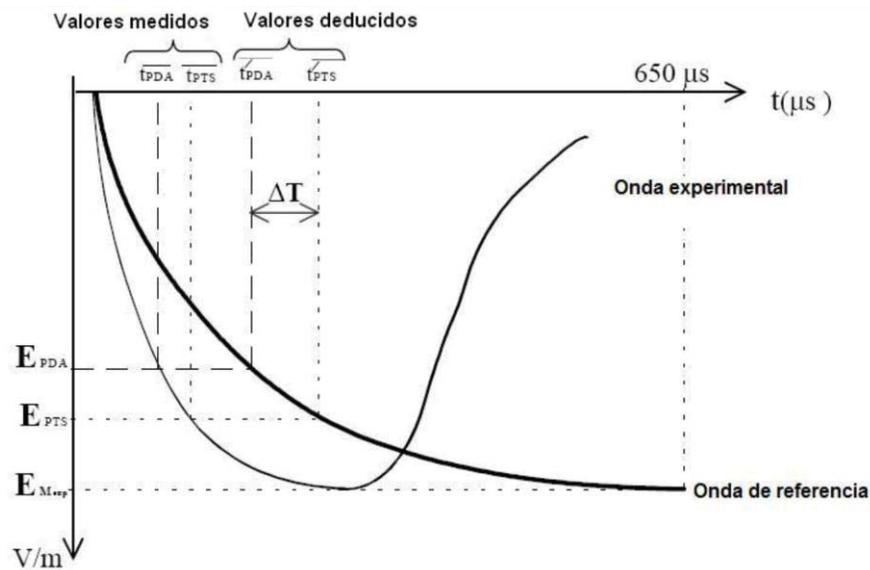


Figura 3-11 Deducción del adelanto temporal a partir de los resultados del ensayo según la figura 1-2 (Fuente: IEC 61643-1[14])

Se mide el tiempo para el PR desde el inicio del impulso al momento de la descarga entre la placa superior y la punta, y se registra el valor del campo en el momento de la descarga. Posteriormente se efectúa el mismo procedimiento para el PDC, se mide el tiempo y el campo correspondiente.

Los valores de los campos eléctricos registrados se llevan a una curva de referencia (dada por la norma), normalizada al campo máximo del impulso experimental que llega a dicho máximo en $650[\mu s]$, los valores se proyectan, obteniendo nuevos valores de tiempo para el PR y PDC, la diferencia entre los valores obtenidos se asocia la ventaja temporal asociada al dispositivo ensayado.

Zona de protección de un PDC

La zona de protección ofrecida por un PDC está delimitada por la superficie de revolución que está definida por los radios de protección correspondientes a las diferentes alturas consideradas y cuyo eje es el mismo que el del PDC.

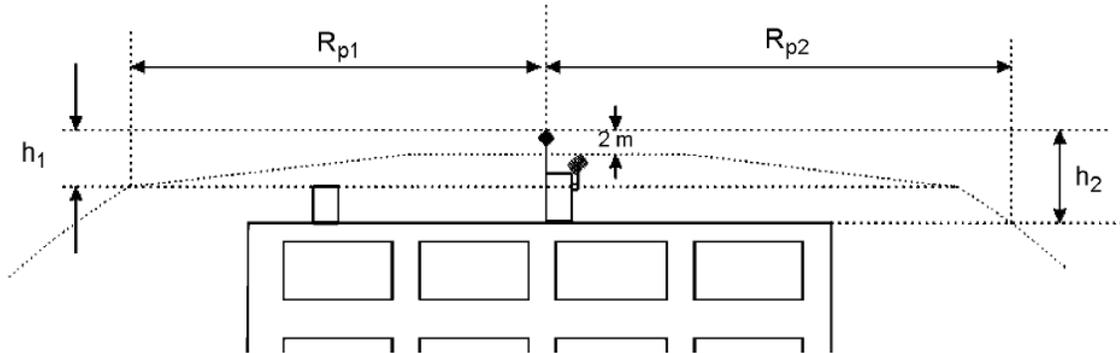


Figura 3-12 Cobertura de protección (hipótesis $h_1 = 5$ [m]) de un PDC vista superior.
(Fuente: UNE 21186-2011 [10])

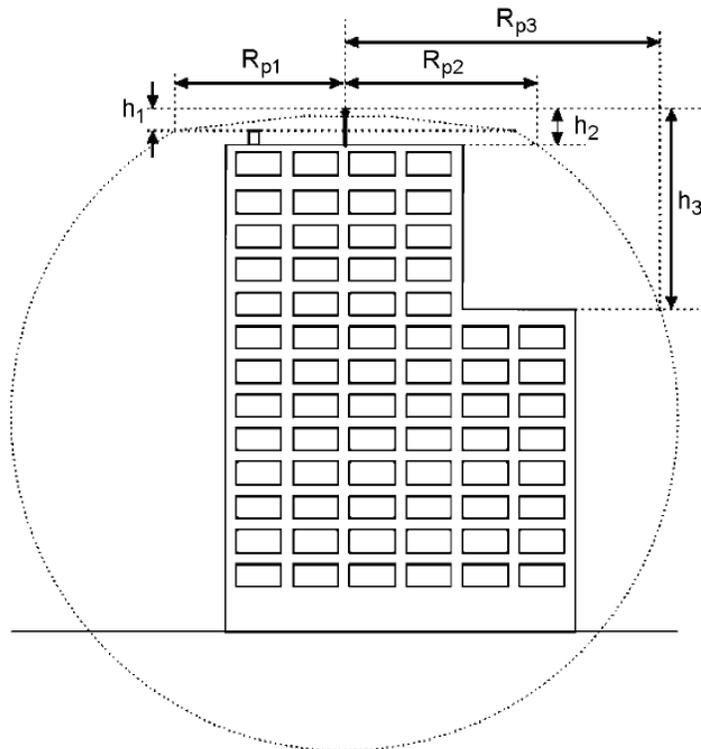


Figura 3-13 Cobertura de protección (hipótesis $h_1 = 5$ [m]) de un PDC vista general.
(Fuente: UNE 2118-2011[10])

Dónde:

h_n : Altura de la punta del PDC sobre el plano horizontal del punto a proteger más lejano.

R_{pn} : Radio de protección del PDC a la altura considerada h_n .

Como se observa en las figuras 3-12 y 3-13, el radio de protección de un PDC depende de su altura respecto a la superficie a proteger, de su tiempo de avance y del nivel de protección seleccionado.

3.1.3 Conductores de bajada

La función de los conductores de bajada es conducir la corriente del rayo desde el pararrayos hasta la toma de tierra, éstos deben situarse en el exterior de la estructura salvo casos específicos.

Principios generales

El conductor de bajada se debe fijar al PDC por medio de un sistema de conexión mecánico que asegure un contacto eléctrico permanente que se encuentre en el mástil.

Si los conductores de bajada se instalan sobre paredes de materiales inflamables, se debe respetar al menos alguno de los siguientes requisitos a fin de evitar un aumento peligroso de la temperatura:

- Separación mínima de 0,1 [m]
- Sección del conductor de al menos 100 [mm²]

Las bajantes deben ser independientes entre sí, se entiende paralelo como una distancia en línea recta menor o igual a 2 metros entre los conductores, excepcionalmente se admite que dos bajantes puedan compartir una trayectoria de hasta un 5% de la longitud total de la bajante más corta.

Cuando varios PDCs están instalados en el mismo edificio pueden compartir las bajantes, de ésta forma no es necesario que existan el doble de bajantes, sino un mínimo igual al número de PDCs, éste criterio es aplicable sólo si las distancias de separación para el sistema completo lo permiten.

Trayectoria

El conductor de bajada debe instalarse de tal forma que su recorrido sea lo más directo y rectilíneo posible, en caso de haber curvaturas, el radio de ésta no debe ser inferior a 20 [cm].

Se han de evitar cornisas o elevaciones, de resultar inevitable, se admite una elevación de un máximo de 40 [cm] para franquear una elevación con una pendiente de un ángulo máximo de 45 grados.

El trazado de bajada debe estar alejado de conductores eléctricos así como evitar el cruce con los mismos, cuando ésta condición no sea posible de realizar, el conductor eléctrico debe ubicarse al interior de un blindaje metálico que se prolongue 1 metro a cada parte del cruce, posteriormente el blindaje debe unirse a la bajante.

Los conductores deben tener 3 fijaciones por metro, éstas deben ser apropiadas para los soportes, no deben afectar la impermeabilidad del tejado y deben permitir una posible dilatación de los conductores.

Los conductores deben estar protegidos contra eventuales choques mecánicos mediante un tubo de protección hasta una altura superior a 2 metros a partir del nivel del suelo.

Con el fin de reducir la probabilidad de daños debidos a las corrientes del rayo que circulan por el SPCR, los conductores de bajada deben disponerse de tal manera que desde el punto de impacto a tierra:

- Existan varios caminos en paralelo para la corriente;
- La longitud de los caminos de corriente se reduzca al mínimo;
- Se realicen, conforme a los requisitos del apartado 6.2, conexiones equipotenciales a las partes conductoras de la estructura.

Se considera como una buena práctica, la interconexión lateral de los conductores de bajada a nivel de tierra y cada 10 a 20 metros de altura, según la tabla 3-3.

La geometría de los conductores de bajada y la de los anillos de unión afecta a la distancia de separación.

La instalación de tantos conductores de bajada como sea posible, espaciados de forma equidistante alrededor del perímetro y conectados mediante anillos equipotenciales, reduce la probabilidad de que se produzcan chispas peligrosas y facilita la protección de las instalaciones internas. Esta condición se cumple en estructuras metálicas y en estructuras de hormigón armado en las que el acero interconectado es eléctricamente continuo.

En la tabla 3-3 figuran los valores típicos de las distancias entre los conductores de bajada y entre los conductores horizontales en anillo.

Tabla 3-3 Valores típicos de distancias entre los conductores de bajada o entre anillos conductores en función de la clase del SPCR. (Fuente: IEC62305-3 [9])

Clase del SPCR	Distancias típicas en metros
I	10
II	10
III	15
IV	20

Es recomendable instalar un conductor de bajada en cada esquina expuesta de la estructura, cuando sea posible.

Otros elementos

Juntas de control: corresponde una unión, también llamada toma de control que permite desconectar la toma de tierra a fin de efectuar mediciones, ésta se logra mediante un elemento denominado arqueta de registro.

Contador de Impactos de Rayo (opcional): En caso de que la instalación esté provista de contadores, se recomienda su instalación en el conductor de bajada más directo y que esté instalado preferentemente justo por encima de la junta de control.

Construcción de los conductores de bajada

Los conductores de bajada deben instalarse, siempre que sea posible, de manera que sean una continuación directa de los conductores del sistema de captura.

La figura 3-14 muestra la instalación óptima de un conductor de bajada en una instalación simple, se observa que la trayectoria es una continuación directa del captador hasta la toma de tierra, así como los elementos involucrados.



Figura 3-14 Partes de un sistema de bajada.
(Fuente: www.ciprotec.com)

Los conductores de bajada deben instalarse de manera rectilínea y vertical, siguiendo el camino más corto y directo a tierra.

Los radios de curvatura no serán inferiores 20 [cm] y se respetará la relación $d > 0,05 l$ en los casos indicados en la figura 3-15.

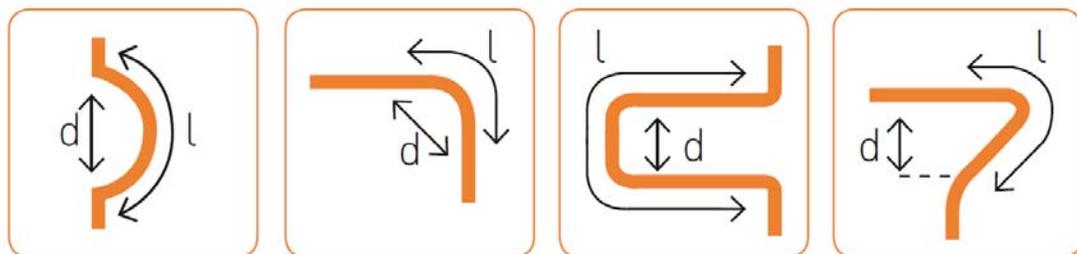


Figura 3-15 Bucle en un conductor de bajada.
(Fuente: www.ciprotec.com)

Los conductores de bajada no deben instalarse en canalones o en tuberías de drenaje, incluso si se encuentran cubiertos con material aislante.

Los conductores de bajada de un SPCR no aislado de la estructura a proteger pueden instalarse de la siguiente manera:

- Si la pared es de material no combustible, los conductores de bajada pueden situarse en la superficie o en el interior de la pared
- Si la pared es de material combustible, los conductores de bajada pueden colocarse en la superficie de la pared, siempre que su elevación de temperatura producida por el paso de la corriente del rayo no sea peligrosa para el material de la pared;
- Si la pared es de material combustible y la elevación de temperatura de los conductores de bajada es peligrosa, los conductores deben instalarse de manera que la distancia entre ellos y la pared sea siempre superior a 0,1[m]. Las abrazaderas de montaje pueden estar en contacto con la pared.

Cuando no se puede asegurar la distancia desde los conductores de bajada a un material combustible, la sección de los conductores no debe ser inferior a 100 [mm²], como un conductor AWG 4/0 o superior.

Cabe destacar que el dimensionamiento proporcionado por la normativa de los conductores de bajada y puesta a tierra no guarda relación directa con las corrientes nominales soportadas por los mismos, sino con la corriente máxima admisible de cortocircuito, la cual se puede obtener en forma simplificada según la expresión de la ecuación 3-4

$$I = \frac{K S}{\sqrt{t}} \quad (3-4)$$

Donde

I: Corriente máxima admisible por el conductor

K: Constante dependiente del material del conductor, la aislación y el cambio de temperatura en el mismo durante la descarga

S: Sección transversal del conductor en milímetros

t: Duración de la corriente de descarga en segundos

Mediante ésta expresión se puede obtener que para un conductor AWG 1/0 (53.5 [mm²]) de cobre cubierto con polietileno reticulado (K=143), la corriente de descarga máxima soportada (típicamente entre los primeros 30 a 50 [μs] de iniciada la descarga), corresponde a 1011 [kA], muy por sobre el peak de descarga máxima de un rayo.

Materiales y dimensiones de los conductores

Los materiales y sus dimensiones deben seleccionarse teniendo en cuenta las posibilidades de corrosión tanto de la estructura a proteger como del SPCR.

En la tabla 3-4 se indican las configuraciones y las dimensiones mínimas de las secciones de los conductores y de las puntas captadoras de los sistemas de captura, así como las de los conductores de bajada.

Tabla 3-4 Dimensiones mínimas de las secciones de los conductores y de las varillas de los sistemas de captura así como de los conductores de bajada. (Fuente: IEC62305-3 [9])

Material	Configuración	Sección mínima [mm]	Comentarios ¹⁰⁾
Cobre	Pletina	50 ⁸⁾	Espesor mínimo 2 [mm]
	Redondo ⁷⁾	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
	Redondo ^{3), 4)}	200 ⁸⁾	Diámetro de 16 [mm]
Cobre estañado ¹⁾	Pletina	50 ⁸⁾	Espesor mínimo 2 [mm]
	Redondo ⁷⁾	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
Aluminio	Pletina	70	Espesor mínimo 3 [mm]
	Redondo	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
Aleación de aluminio	Pletina	50 ⁸⁾	Espesor mínimo 2,5 [mm]
	Redondo	50	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
Acero galvanizado en caliente ²⁾	Redondo ³⁾	200 ⁸⁾	Espesor mínimo 16 [mm]
	Pletina	50 ⁸⁾	Espesor mínimo 2,5 [mm]
	Redondo ⁹⁾	50	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	50 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
Acero Inoxidable ⁵⁾	Redondo ^{3), 4), 9)}	200 ⁸⁾	Espesor mínimo 16 [mm]
	Pletina ⁶⁾	50 ⁸⁾	Espesor mínimo 2,5 [mm]
	Redondo ⁶⁾	50	Diámetro mínimo de 8 [mm]
	Cable trenzado	70 ⁸⁾	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
	Redondo ^{3), 4)}	200 ⁸⁾	Espesor mínimo 16 [mm]

1) Espesor mínimo del revestimiento 1 [μm], galvanizado en caliente o electrolisis.

2) El revestimiento debe ser liso, continuo y libre de manchas, y con un espesor mínimo de 50 [μm].

3) Solamente se aplica a las puntas captadoras. En lugares donde los esfuerzos mecánicos tales como los debidos a la carga del viento no es crítica, pueden emplearse puntas captadoras de 1 [m] de largo (máximo) y 10 [mm] de diámetro, con fijaciones adicionales.

4) Solamente aplicable a las banas de penetración.

5) Cromo $\geq 16\%$, níquel $\geq 8\%$, carbono $\leq 0,07\%$.

6) Para aceros Inoxidables embebidos en hormigón, y/o en contacto directo con materiales inflamables, los tamaños mínimos deberían aumentarse hasta los 78[mm²] (10[mm] de diámetro) para los redondos y a 75[mm²] (3[mm] mínimo de espesor) para las pletinas.

7) En aquellas aplicaciones en las que el esfuerzo no es un requisito esencial los 50[mm²] (8[mm] de diámetro) puede reducirse hasta los 28[mm²] (6[mm] de diámetro). En este caso debe tenerse en cuenta la reducción de distancia entre fijaciones.

8) Si los aspectos térmicos y mecánicos son importantes, estas dimensiones pueden aumentarse hasta 60[mm²] en las pletinas y 78[mm²] en los redondos.

9) La sección mínima para que no se produzca fusión para una energía específica de 10000 [kJ/Ω] es de 16[mm²] (cobre), 25[mm²] (aluminio), 50[mm²] (acero) y 50[mm²] (acero inoxidable).

10) Los espesores, anchos y diámetros están definidos con $\pm 10\%$.

3.1.4 Características de la toma de tierra

A fin de minimizar cualquier sobretensión peligrosa cuando se dispersa en el terreno la comente del rayo (comportamiento a alta frecuencia), la forma y las dimensiones de los electrodos de puesta a tierra son los criterios de importancia. En general, se recomienda una resistencia de tierra de valor bajo (si es posible inferior a 10 $[\Omega]$ cuando se mide a baja frecuencia).

Desde el punto de vista de la protección contra el rayo es preferible y adecuada en todos los casos (es decir, protección contra el rayo, sistemas de potencia y de telecomunicación), una sola puesta a tierra integrada en la estructura.

Los sistemas de puesta a tierra deben conectarse equipotencialmente.

- Las condiciones de separación y de conexión equipotencial con otros sistemas de puesta a tierra vienen determinadas, normalmente, por las autoridades nacionales competentes.
- Pueden producirse problemas graves de corrosión cuando se conectan entre sí sistemas de puesta a tierra de diferentes materiales.

Disposiciones de puestas a tierra en condiciones generales

Se consideran, básicamente, dos sistemas de puesta a tierra según su disposición.

Disposición tipo A

Este tipo de puesta a tierra está formado por electrodos horizontales o verticales Instalados en el exterior de la estructura a proteger y conectados con cada conductor de bajada.

En esta disposición, el número de conductores no debe ser inferior a dos.

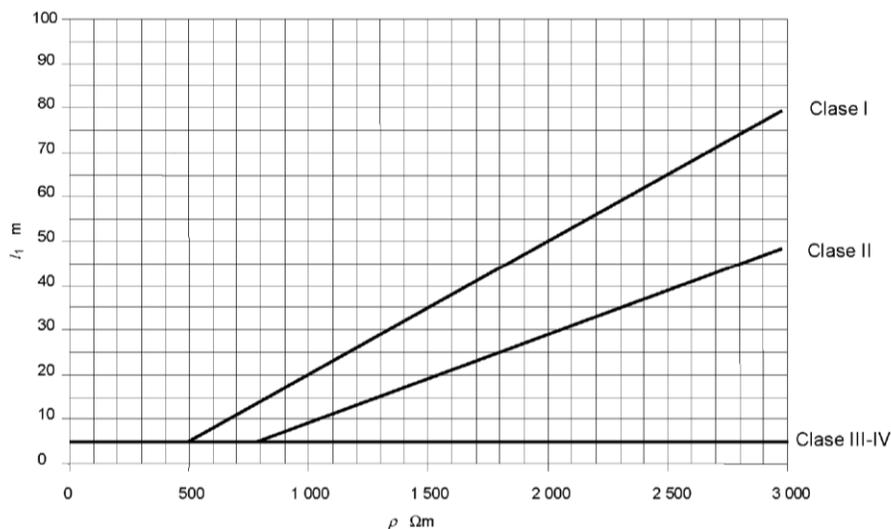


Figura 3-16 Longitud mínima l_1 de cada electrodo de tierra en función de la clase de SPCR. (Fuente: IEC62305-3 [9])

Las clases III y IV son independientes de la resistividad del terreno.

La longitud mínima de cada electrodo de tierra en la base de cada conductor de bajada es:

- l_1 para los electrodos horizontales.
- $0,5 l_1$ para los electrodos verticales (o inclinados),.

Siendo l_1 la longitud mínima de los electrodos horizontales indicada en la parte relevante de la figura 3-16. Para combinaciones de electrodos (horizontales o verticales), debe considerarse la longitud total.

Las longitudes mínimas de los electrodos indicadas pueden no tomarse en consideración si la resistencia de puesta a tierra del sistema de puesta a tierra es inferior a $10 [\Omega]$ (medida a una frecuencia diferente de la frecuencia Industrial y de sus múltiplos, con el fin de evitar interferencias).

Disposición tipo B

Esta disposición comprende o bien un anillo conductor exterior a la estructura a proteger, en contacto con el suelo al menos en el 80% de su longitud, o un electrodo de cimentación. Estos electrodos de tierra también pueden ser mallados.

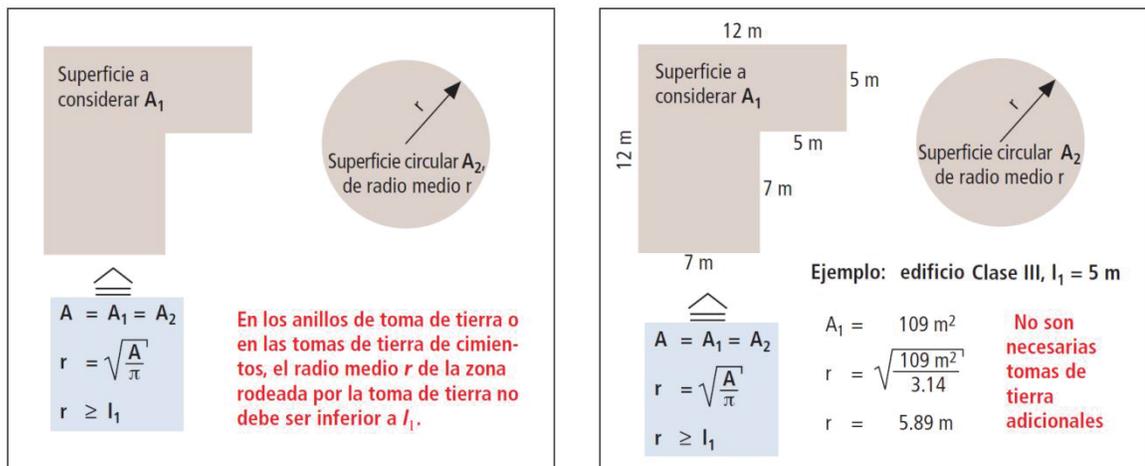


Figura 3-17a y 3-17b Toma de tierra tipo B, determinación del radio medio.
(Fuente: www.dehn.de)

En las tomas de tierra del tipo B, el radio medio r de la zona rodeada por la toma de tierra no puede ser inferior a la longitud mínima l_1 . Para determinar el radio medio "r", la superficie a considerar se traslada a una superficie circular equivalente y se determina el radio de acuerdo con las figuras 3-17a y 3-17b.

$$r \geq l_1 \quad (3-5)$$

Donde l_1 está indicando en la figura 3-16 en función de las clases I II III IV, de los SPCR, cuando se requiere un valor de l_1 superior al valor correspondiente a r , deben añadirse electrodos horizontales o verticales (o inclinados) con longitudes individuales l_r (horizontales) y l_v (verticales) dados por las siguientes expresiones:

$$l_r = l_1 - r \quad (3-6)$$

$$l_v = \frac{l_1 - r}{2} \quad (3-7)$$

Se recomienda que el número de electrodos no sea inferior al de conductores de bajada, con un número mínimo de dos.

En el electrodo en anillo deberían conectarse los electrodos adicionales en los puntos en los que se conectan los conductores de bajada y de ser posible equidistantes.

Dimensionamiento de los electrodos

Los electrodos de puesta a tierra están normados por la IEC 62305 -2 [7], la tabla 2-1 hace referencia a las dimensiones mínimas que deben tener los electrodos de puesta a tierra según los materiales aceptados.

Tabla 2-1 Materiales, configuraciones y dimensiones mínimas de los electrodos de puesta a tierra.
(Fuente: IEC62305-3 [9])

Material	Configuración	Dimensiones mínimas			Comentarios
		Pica [mm]	Conductor de tierra	Placa de tierra [mm]	
Cobre	Cable trenzado ³⁾		50 [mm ²]		Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
	Redondo ³⁾		50 [mm ²]		Diámetro de 8 [mm]
	Pletina ³⁾		50 [mm ²]		Espesor mínimo de 2 [mm]
	Redondo	15 ⁸⁾			Espesor mínimo de la pared 2 [mm]
	Tubo	20			Espesor mínimo de 2 [mm]
	Placa			500 x 500	Sección de 25 x 2 [mm]
	Placa enmallada			600 x 600	Longitud mínima de la placa mallada 4,8[m]
Acero	Redondo galvanizado ^{1), 2)}	16 ⁹⁾	Diámetro 10[mm]		
	Tubo galvanizado ^{1), 2)}	25			Espesor mínimo de la pared 2 [mm]
	Plenita galvanizada ¹⁾		90 [mm ²]		Espesor mínimo 3 [mm]
	Placa galvanizada ¹⁾			500 x 500	Espesor mínimo 3 [mm]
	Placa enmallada galvanizada ¹⁾			600 x 600	Sección de 30 x 3 [mm]
	Redondo con	14			Contenido de cobre 99% y

	revestimiento de cobre ⁴⁾		espesor radial mínimo de 250 [µm]
	Redondo desnudo ⁵⁾	Diámetro 10[mm]	
	Pletina galvanizada o desnuda ^{5), 6)}	75 [mm ²]	Espesor mínimo 3 [mm]
	Cable trenzado galvanizado ^{5), 6)}	75 [mm ²]	Diámetro mínimo de cada hilo 1,7 [mm]
	Perfil en cruz galvanizado ¹⁾	50 x 50 x 3	
Acero inoxidable ⁷⁾	Redondo	Diámetro 10[mm]	
	Pletina	100 [mm ²]	Espesor mínimo 2 [mm]

- 1) El revestimiento debe ser liso, continuo y libre de manchas con un espesor mínimo de 50 [µm] para los redondos y de 70 [µm] para las chapas.
- 2) Las roscas deben mecanizarse antes del galvanizado.
- 3) También puede estañarse.
- 4) El cobre deberla estar unido intrínsecamente al acero.
- 5) Solamente se admite cuando está embebido completamente en hormigón.
- 6) Solamente se admite si está conectado correctamente al menos cada 5 [metros] con las armaduras naturales de acero en contacto con la cimentación.
- 7) Cromo ≥ 16%, níquel ≥ 5%, molibdeno ≥ 2%, carbono ≤ 0,08%.
- 8) En algunos países se admite 12 [mm].
- 9) En algunos países se utilizan banas de penetración para conectar los conductores de bajada al punto de entrada en el terreno.

Instalación de los electrodos de tierra

El electrodo en anillo (disposición tipo B) deberá enterrarse preferentemente a una profundidad al menos de 0,5[m] y a una distancia aproximada de 1 [m] de las paredes externas.

Los electrodos de tierra (disposición tipo A) deben instalarse a una profundidad de su extremo superior de al menos 0,5[m] y distribuidos tan uniformemente como sea posible para minimizar los acoplamientos eléctricos en el terreno.

Los electrodos de tierra deben instalarse de tal manera que permitan su inspección durante la construcción, siempre que sea posible deben conectarse las tierras de todas las bajantes mediante elementos especiales que permita su interconexión durante una descarga, éstos elementos se llaman comúnmente “vía chispas”.

La profundidad de colocación y el tipo de electrodo debe ser tal que se minimicen los efectos de la corrosión, de la sequedad y de la congelación del terreno y así conseguir estabilizar la resistencia convencional a tierra. Se recomienda que la parte superior de un electrodo vertical, de longitud igual al espesor de la capa del terreno congelado, no se considere efectiva para el cálculo en condiciones de congelación.

Las tomas de tierra deben unirse entre sí y a la toma de tierra de baja tensión del edificio, preferiblemente, mediante un vía chispas.

Electrodos de grafito rígido

El electrodo de grafito está indicado para terrenos con un alto índice de corrosión, o en condiciones extremas de temperatura. Puede instalarse como único electrodo de puesta a tierra, o para la mejora de tomas de tierra de electrodos de pica o placa.

Características y beneficios

- Electrodo de alto rendimiento y alta conductividad.
- Se suministra en el interior de un saco de algodón orgánico relleno de grafito en polvo, y sales conductoras.
- Presenta un buen comportamiento frente a corrosiones químicas típicas de los sistemas de puesta a tierra (reacción de reducción-oxidación, óxido reducción o reacción redox).
- Mayor vida útil que la mayoría de electrodos metálicos, debido a su mínima degradación por corrosión.
- Mejora de las propiedades de contacto eléctrico entre el electrodo de grafito y el terreno mediante sales conductoras y polvo de grafito, haciendo que las fisuras del terreno alrededor de dicho electrodo queden firmes.
- Fuerte disminución de la impedancia en alta frecuencia comparado con electrodos de tierra convencionales utilizados a 50 [Hz], lo que lo hace muy indicado para disipar corrientes tipo rayo.

Instalación

- Realizar una perforación en el terreno de 200 [mm] de diámetro y un mínimo de 2 [m] de longitud.
- Insertar el cable en el manguito de conexión y fijarlo de forma segura.
- Colocar en el interior de la perforación el electrodo verticalmente, sin retirar el saco de algodón que lo envuelve.
- Rellenar la perforación añadiendo capas alternativas de compuesto mineral (aditivo) y tierra de relleno (utilizar tierra vegetal cuando la tierra extraída no ofrezca un nivel adecuado de conductividad).
- Compactar el terreno procurando que la tierra de relleno y el compuesto mineral aseguren un buen contacto con el saco que contiene el electrodo.
- Instalar un sistema de registro (arqueta y puente de comprobación) que permita realizar futuras revisiones

La figura 3-18a y 3-18b muestran en forma simplificada un electrodo de grafito con los rellenos intercalados de tierra de relleno y compuesto mineral aditivo, con arqueta enterrada o a la vista.

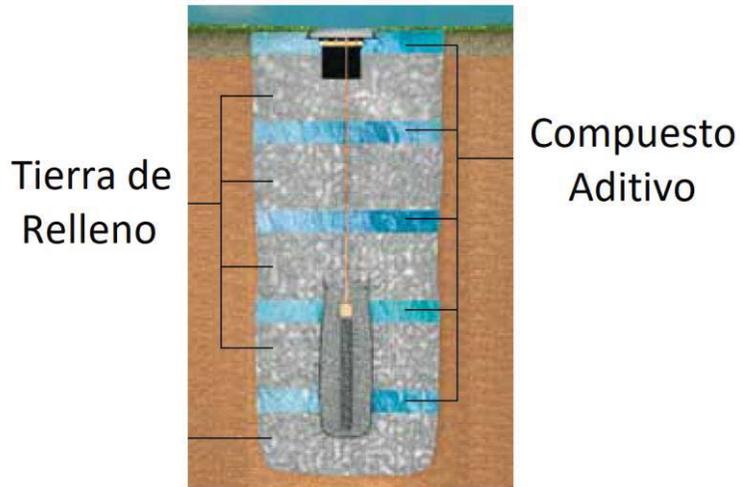


Figura 3-18a Instalación de un electrodo de grafito, arqueta enterrada.
(<https://www.plcmadrid.es>)

Según la topología del terreno, la arqueta de registro puede quedar enterrada (figura 3-18a) o sobresalir hasta 0.5 [m] sobre el nivel del suelo, siempre y cuando la estructura de la base a la misma esté completamente aislada. (figura 3-18b).

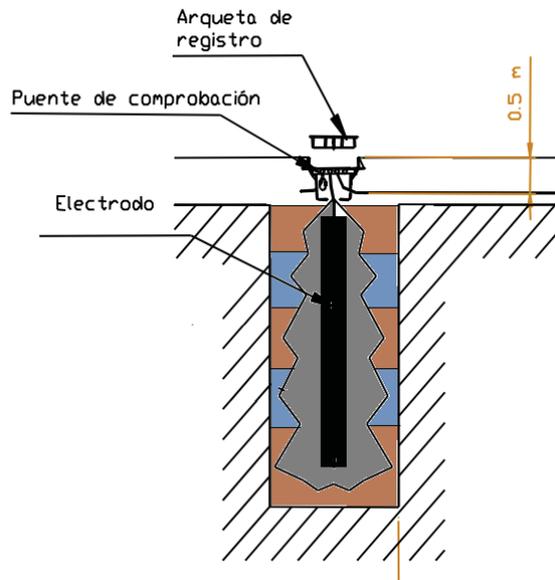


Figura 3-18b Instalación de un electrodo de grafito, arqueta a la vista.
(<https://www.plcmadrid.es>)

La figura 3-19 resume en forma simplificada las consideraciones generales para el diseño de un SPCR externo.

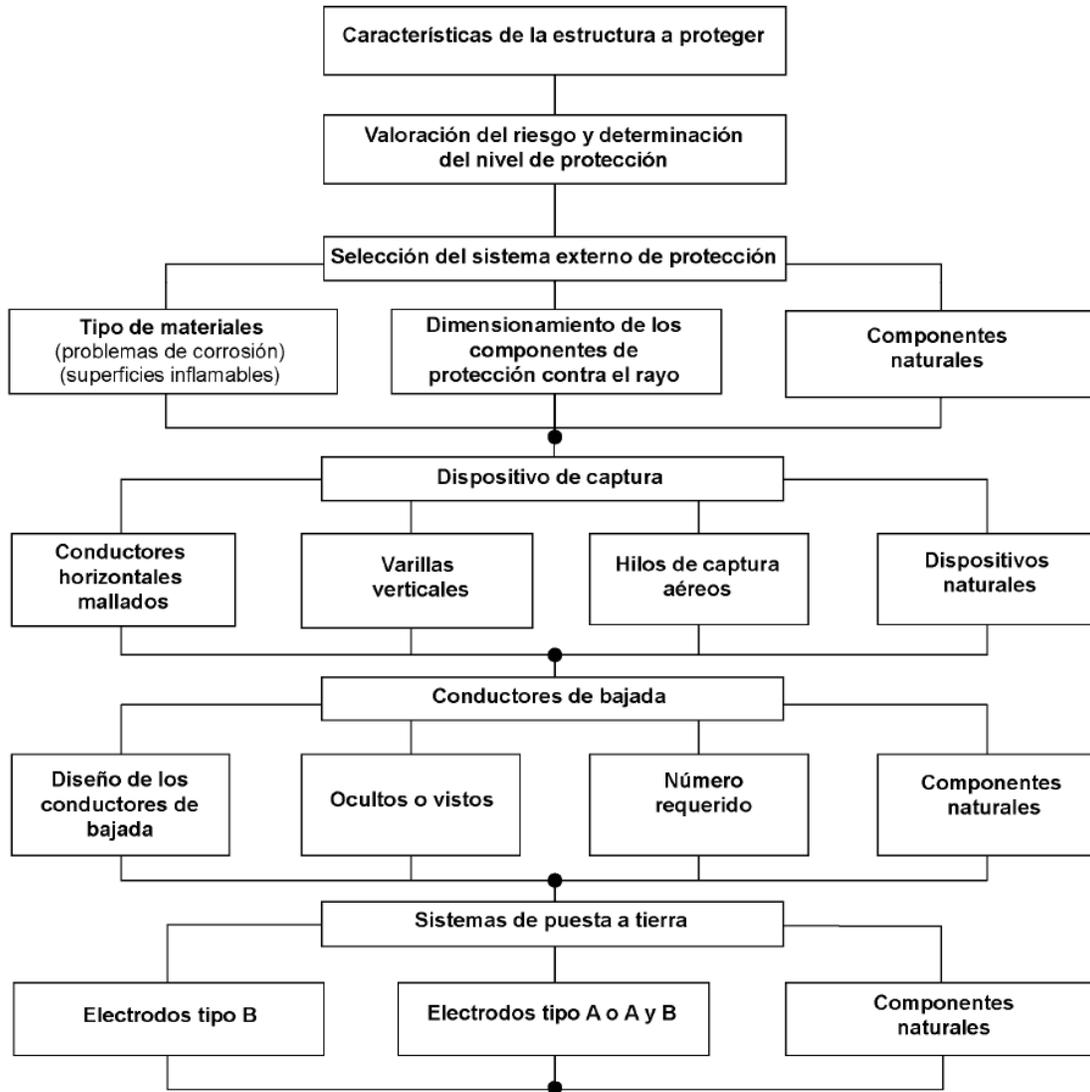


Figura 3-19 Diagrama de diseño de un SPCR Externo.
(Fuente: IEC62305-3 [9])

3.2 Construcción del SPCR interno

Un SPCR interno previene de los riesgos debidos a chispas peligrosas en el interior de la estructura mediante conexiones equipotenciales o mediante distancias de separación (y por tanto mediante un aislamiento eléctrico) entre los componentes externos del SPCR y otros elementos conductores que se encuentran en el interior de la estructura. Las disposiciones aquí señaladas están basadas en la norma IEC 62305-4 [12].

Las principales medidas de protección contra los daños a los seres vivos por tensiones de contacto y de paso están destinadas a:

- Reducir la corriente que circula a través de los cuerpos, aislando las partes externas conductoras y/o aumentando la resistividad de la superficie del suelo
- Reducir la posibilidad de que se produzcan tensiones de contacto y de paso

Los fallos permanentes en los sistemas eléctricos y electrónicos pueden producirse por el impulso electromagnético del rayo (IEMR) según las siguientes vías:

- Ondas tipo impulso conducidas o inducidas, transmitidas a los aparatos a través de los cables de conexión
- Efectos directos de los campos electromagnéticos radiados sobre los aparatos.

En una estructura las ondas tipo impulso pueden producirse externa o internamente:

- Las ondas tipo impulso externas a la estructura son producidas por las descargas de rayos que impactan en las líneas entrantes o en el terreno cerca de las líneas, y son transmitidas por medio de estas líneas a los sistemas eléctricos y electrónicos
- Las ondas tipo impulso internas a la estructura están producidas por impactos directos en la estructura o en el terreno próximo.

El acoplamiento puede producirse por diferentes mecanismos:

- Acoplamiento resistivo (por ejemplo, la impedancia de puesta a tierra del sistema de puesta a tierra o la resistencia de la pantalla de los cables)
- Acoplamiento por campo magnético (por ejemplo, producido por los bucles de los cables en los sistemas eléctricos y electrónicos o por inductancia de los conductores equipotenciales)
- Acoplamiento por campo eléctrico (por ejemplo, producido por la varilla de la antena de captación)

Los efectos del acoplamiento por campo eléctrico son por lo general muy pequeños en comparación con los del acoplamiento magnético, por lo que pueden no tomarse en cuenta.

3.2.1 Zonas de protección contra el rayo

Adicionalmente a los elementos de protección ya vistos en el sistema de protección externo, el sistema de protección interno utiliza un elemento específico adicional llamado “dispositivo de protección contra sobretensiones” (DPS), cuya función es limitar las sobretensiones transitorias y dispersar las corrientes de impulso.

Las zonas de protección contra el rayo (ZPR) se implementan por la Instalación del SPCR por ejemplo instalación de DPS y/o pantallas magnéticas. En función del número, tipo y nivel de tensión soportada del equipo a proteger, puede definirse la ZPR apropiada, estas zonas pueden

incluir pequeñas zonas locales (por ejemplo, envolventes de los equipos) o grandes zonas (por ejemplo, el volumen total de la estructura).

La figura 3-20 muestra un caso general donde se dividen las zonas interiores de protección en una instalación.

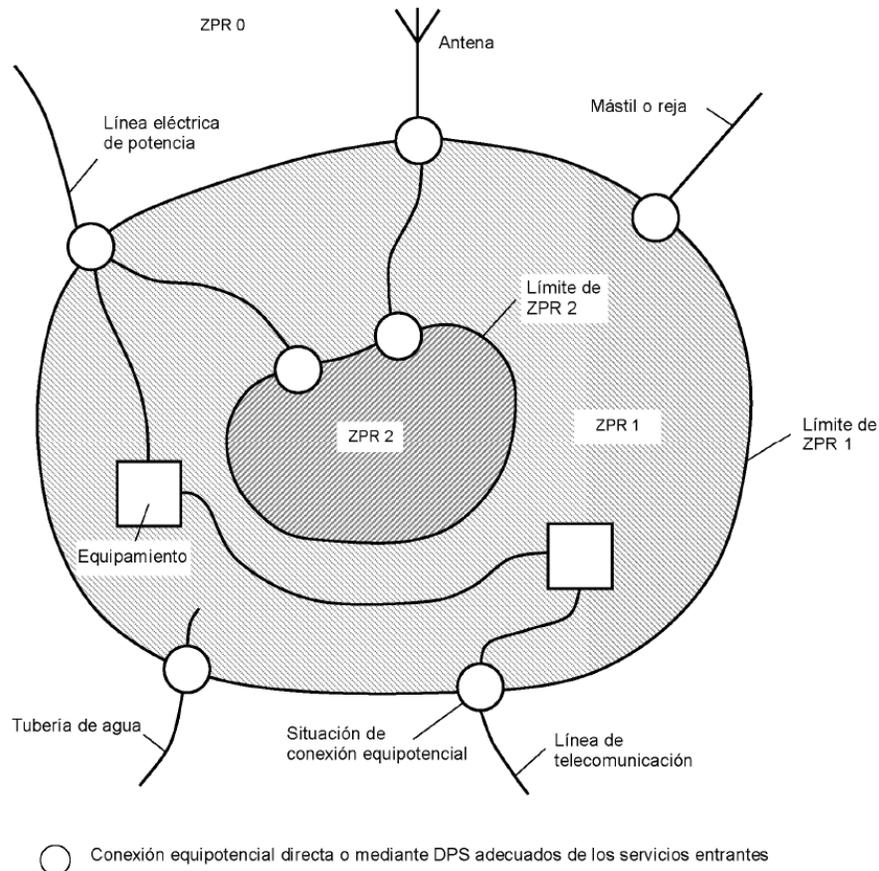
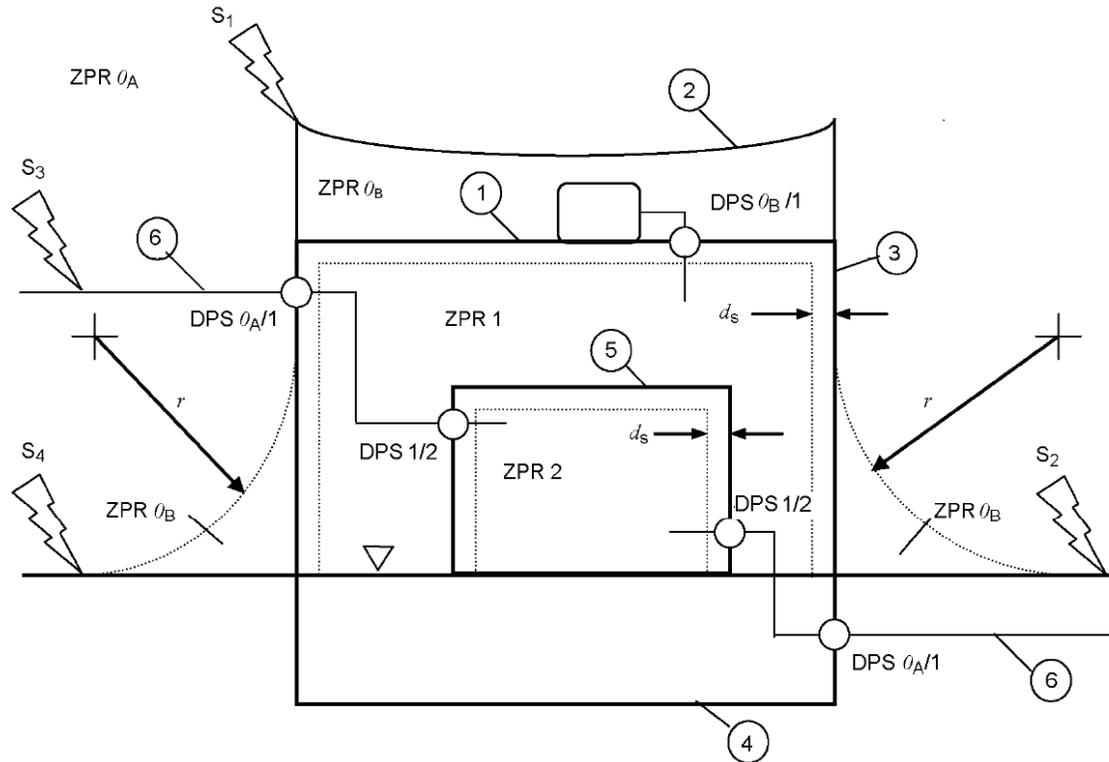


Figura 3-20 Principio general de división en diferentes ZPR
(Fuente: IEC62305-4 [12])

Todos los servicios metálicos que entran en la estructura son conectados equipotencialmente a través de barras equipotenciales en la frontera de la ZPR 1, además los servicios conductores que entran en la ZPR 2 (por ejemplo, sala de ordenadores) están conectados equipotencialmente a través de barras equipotenciales en la frontera de la ZPR 2.

La topología de la instalación afecta el dimensionamiento de los DPS, la figura 3-21 ejemplifica la aplicación en una estructura con forma definida expuesta a una descarga.



1	Estructura (Pantalla de ZPR 1)	S1	Impacto sobre la estructura
2	Dispositivo Captor	S2	Impacto cerca de la estructura
3	Conductor de bajada	S3	Impacto sobre un servicio conectado a la estructura
4	Toma de tierra	S4	Impacto cerca de un servicio conectado a la estructura
5	Servicios entrantes	r	Radio de la esfera ficticia
6	Servicios conectados a la estructura	d_s	Distancia de seguridad contra campos magnéticos muy altos
			Nivel del suelo

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

ZPR 0_A Descargas directas, corriente total del rayo

ZPR 0_B Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida

ZPR 1 Descargas no directas, corriente del rayo limitada o corriente inducida, campo magnético atenuado

ZPR 2 Descargas no directas, corriente del rayo parcial o corriente inducida
Los volúmenes protegidos en el interior de las ZPR 1 y ZPR2 deben respetar la distancia de seguridad d_s

Figura 3-21 Zonas de protección contra el rayo por efectos de IEMR

(Fuente: IEC 62305-1 [6])

Se observa que para las distintas zonas de protección, se asocia un DPS específico, en forma general esto ocurre porque la intensidad y efectos de la descarga son distintos según el punto de impacto, para esto cada DPS debe soportar los efectos a los cual se ve expuesta la zona donde se instala.

Adicionalmente se observa que las ZPR se interconectan entre sí mediante DPS, con el fin de lograr equipotencialidad ante una descarga, evitando diferencias de potencial que pudiesen ser de peligro para instalaciones o personas.

3.2.2 Dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS)

Un dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias actúa como un conmutador controlado por tensión y se halla instalado entre los conductores activos y tierra, en paralelo a los equipos a proteger y en cascada entre las instalaciones interiores.

En la conexión cascada, cuando la tensión de la red es inferior a su tensión de activación, el protector actúa como un elemento de alta impedancia, de forma que por él no circula intensidad. Por el contrario, cuando la tensión de red es superior a la tensión de activación el protector actúa como un elemento de impedancia próxima a cero, derivando la descarga a tierra, evitando el daño hacia equipos y personas.

Cuando se quiere proteger un equipo o instalación en particular, el DPS se instala en paralelo a ésta, como se observa en la figura 3-22.

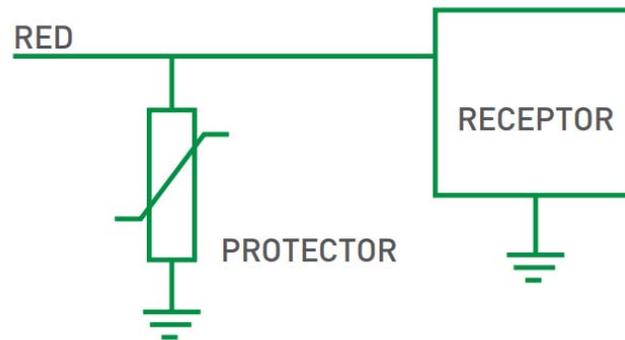


Figura 3-22 Instalación de un DPS para proteger un equipo
(Fuente: www.ciprotec.com)

El nivel del DPS a instalar dependerá de la zona en que se ubique el equipo a proteger.

Parámetros de un protector

Los principales parámetros que definen las capacidades de un DPS corresponden a:

- *Up*: Nivel de protección: Máximo valor de tensión residual entre los bornes del dispositivo de protección durante la aplicación de una corriente de cresta.
- *In*: Corriente nominal: Corriente de cresta en onda 8/20 μ s que el dispositivo de protección puede soportar en 20 ocasiones sin llegar a final de vida.
- *I_{max}*: Intensidad de descarga: Corriente de cresta en onda 8/20 μ s que el dispositivo de protección puede soportar sin llegar a final de vida.
- *Uc*: Tensión máxima de servicio: Máxima tensión eficaz o en corriente continua que puede aplicarse de forma permanente a los bornes del dispositivo de protección.
- *I_{imp}*: Corriente de impulso: Corriente de cresta en onda 10/350 μ s que el dispositivo de protección puede soportar sin llegar a final de vida.

Tipos de DPS

Los equipos de protección contra sobretensiones se fabrican según la zona de protección a la cual están destinados, sin embargo las capacidades dependen netamente del fabricante, éste puede añadirle características para el dispositivo sea capaz de funcionar individualmente de forma correcta en más de una zona.

En forma genérica, los tipos de DPS descritos según la ubicación y tipo de descarga en la estructura están clasificados en la siguiente forma:

Tipo 1: Ensayados con un impulso en onda 10/350 μ s (ensayo clase I), que simula la corriente que se produce en caso de un impacto directo de rayo. Poseen la capacidad de derivar a tierra corrientes muy elevadas, ofreciendo un nivel de protección *Up* elevado. Concebidos para utilización en cuadros generales de instalaciones donde el riesgo de impacto de rayo es elevado.

Tipo 2: Ensayados con un impulso en onda 8/20 μ s (ensayo clase II), que simula la corriente que se produce en caso de una conmutación o de un impacto de rayo sobre la línea de distribución o en sus proximidades. Capacidad de derivar a tierra corrientes elevadas, ofreciendo un nivel de protección *Up* medio. Concebidos para utilización en sub-cuadros aguas abajo de protectores tipo 1 o en cuadros generales de instalaciones donde el riesgo de impacto de rayo es reducido.

Tipo 3: Ensayados con un impulso en onda combinada 1,2/50 μ s - 8/20 μ s (ensayo clase III), que simula la corriente y la tensión que pueden llegar a los equipos a proteger. Capacidad de derivar a tierra corrientes medias, ofreciendo un nivel de protección *Up* bajo. Instalados siempre aguas abajo de una protección tipo 2 y concebidos para la protección de equipos sensibles o separados de éstos una distancia superior a 20 [m].

La tecnología permite ofrecer soluciones de protectores que combinan distintos tipos de protección. La colocación de estos dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias en la instalación sigue la siguiente estructura:

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

- Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con corriente impulsional de tipo 10/350 [uS] (Clase I).
- Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con corriente impulsional de tipo 8/20 [uS] (Clase II).

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

- Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con corriente impulsional de tipo 8/20 [uS] (Clase II).
- Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias ensayados con una onda combinada (Clase III).

La figura 3-23 ilustra en términos simples el esquema de la colocación de los DPS en una instalación.

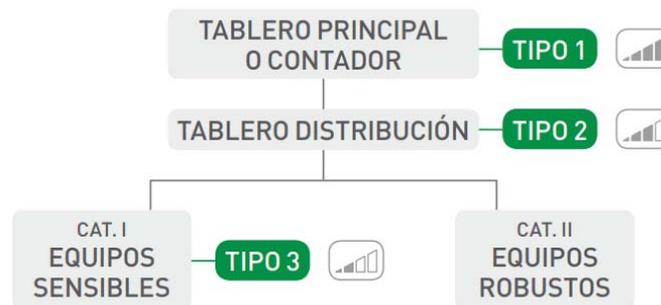


Figura 3-23 Ejemplo Instalación con tres tipos de DPS.

(Fuente: www.ciprotec.com)

Coordinación de los DPS

En muchas instalaciones se necesita más de un paso de protección. De esta forma se consigue una mayor capacidad de descarga asegurando al mismo tiempo una tensión residual reducida.

Para conseguir una actuación coordinada de etapas de protección basadas en distintas tecnologías, debe respetarse una distancia mínima de 10 [m] entre los dispositivos de protección. De este modo se asegura que el primer escalón de protección (P1) se active primero y derive la mayor parte de la energía. El segundo escalón (P2) realizará posteriormente la

función de reducir la tensión residual a la salida del primer dispositivo de protección. La figura 3-24 ilustra ésta situación.

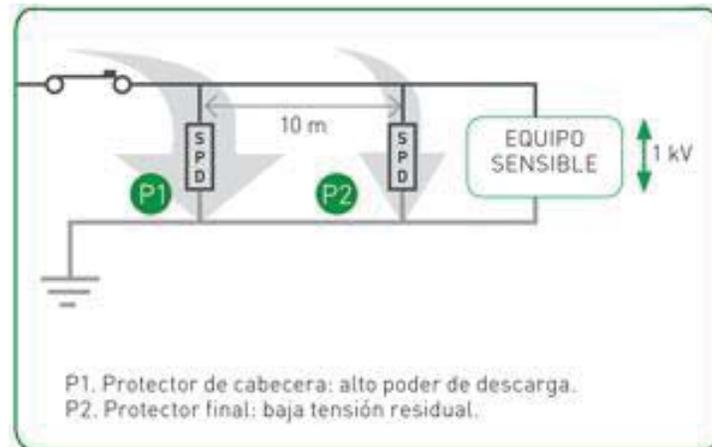


Figura 3-24 Coordinación de las etapas de los DPS
(Fuente: www.ciprotec.com)

En los cuadros donde se centralicen los dos escalones de protección y no existan los 10[m] de separación, deberán utilizarse dispositivos de protección combinados o deberán colocarse bobinas de desacoplo para simular la distancia de cable.

3.2.3 Protección contra campos magnéticos radiados

Un SPCR que sólo emplee conexiones equipotenciales mediante DPS, no proporciona protección efectiva contra los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos sensibles [12]. El SPCR puede mejorarse reduciendo las dimensiones de la malla y seleccionando los DPS apropiados, de manera que constituyan un componente efectivo del SPCR.

Un SPCR interno debe proteger los equipos contra las ondas tipo impulso y contra los campos electromagnéticos. Los DPS proporcionan la protección contra las ondas de tipo impulso conducido, sin embargo no protegen a los equipos e instalaciones contra los campos magnéticos radiados.

Un SPCR externo en el que se empleen apantallamientos espaciales y protección coordinada de los DPS protegerá contra los campos magnéticos radiados y contra las ondas tipo impulso conducidas (figura 3-25). Las pantallas espaciales en cascada y la coordinación de los DPS pueden reducir el campo magnético y las ondas tipo impulso a un nivel de amenaza menor.

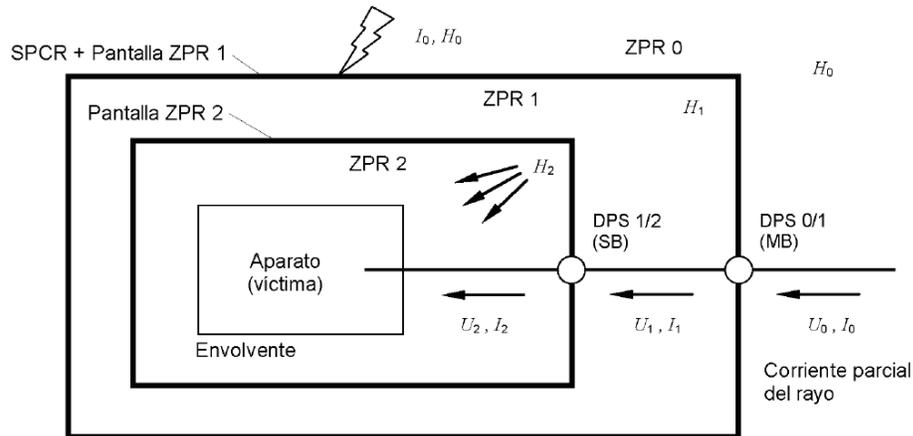


Figura 3-25 SPCR externo empleando pantallas espaciales “protección coordinada de los DPS” protegido contra los impulsos de ondas conducidas ($U_2 \ll U_0$ e $I_2 \ll I_0$) y contra los campos magnéticos radiados ($H_2 \ll H_0$)
(Fuente IEC 62305-4 [12])

Un SPCR externo en el que se emplea una pantalla espacial de ZPR I y un DPS a la entrada de la ZPR I puede proteger los aparatos contra el campo magnético radiado y contra las ondas tipo impulso conducidas (figura 3-26).

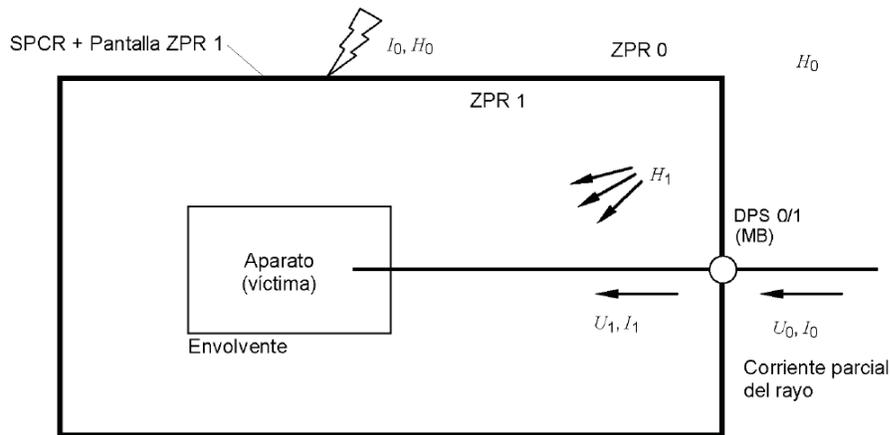


Figura 3-26 SPCR externo empleando pantalla espacial en la ZPR0 y DPS en la entrada de la ZPR1. Aparato protegido contra los impulsos de ondas conducidas ($U_1 < U_0$ e $I_1 < I_0$) y contra los campos magnéticos radiados ($H_1 < H_0$). (Fuente IEC 62305-4 [12])

La protección no sería suficiente si el campo magnético permanece demasiado elevado (debido a la baja efectividad del apantallamiento de la ZPR I) o si la amplitud de la onda tipo impulso permanece demasiado alta (debido a un nivel de protección de alta tensión de los DPS y a los efectos de inducción en el cableado aguas abajo de los DPS).

Un SPCR externo formado por líneas apantalladas, combinado con envoltorios apantallados de los equipos, protegerá contra los campos magnéticos radiados. El DPS a la entrada de la ZPR I proporcionará protección contra las ondas tipo impulso conducidas (figura 3-27). Para alcanzar

un nivel más bajo de amenaza por las ondas tipo impulso, puede ser necesario un DPS especial (por ejemplo, etapas interiores de coordinación adicionales) para alcanzar un nivel de protección de tensión suficientemente bajo.

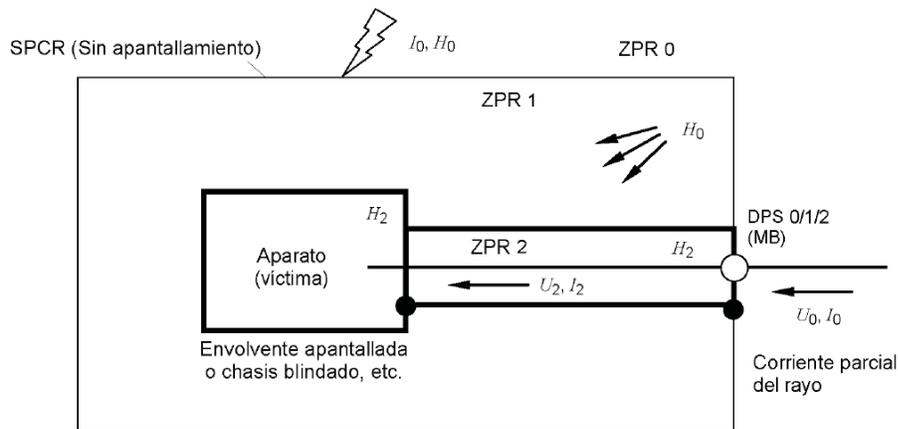


Figura 3-27 SPCR externo empleando una línea apantallada interna y protección por DPS a la entrada de la ZPR 1. Aparato protegido contra los impulsos de ondas de corriente conducidas ($U_2 < U_0$ e $I_2 < I_0$) y contra los campos magnéticos radiados ($H_2 < H_0$). (Fuente IEC 62305-4 [12])

Un SPCR externo formado por un sistema de protección coordinado de DPS, solamente es adecuado para proteger equipos insensibles a los campos magnéticos radiados, ya que los DPS solamente proporcionarán protección contra las ondas tipo impulso conducidas (figura 3-28). Un nivel de amenaza menor puede conseguirse empleando DPS coordinados.

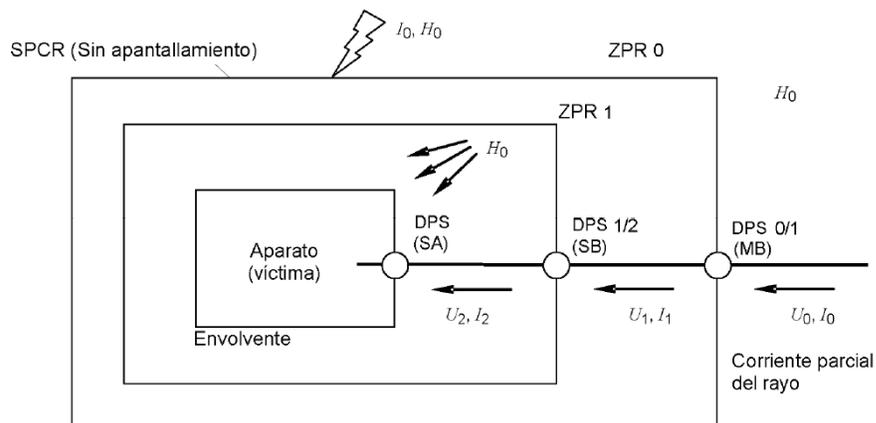


Figura 3-28 SPCR externo empleando solamente la "protección coordinada de los DPS". Aparato protegido contra los impulsos de ondas de corriente conducidas ($U_2 \ll U_0$ e $I_2 \ll I_0$) y contra los campos magnéticos radiados (H_0). (Fuente IEC 62305-4 [12])

Se observa que cuando los equipos son vulnerables a los campos magnéticos que se puedan desarrollar, es recomendable el uso de conductores apantallados o enmallados aterrizados en caso de tratarse de equipos particularmente sensibles y de importancia relevante.

4 Aplicación del modelo de protección, Hospital de Queilén.

4.1 Características estructurales

Una vez dispuestas las consideraciones para dimensionar un sistema de protección, se evalúa el caso aplicado al nuevo Hospital de Queilén, establecimiento que tendrá un área total de 4548 [m²] y 1059 [m²] en recintos complementarios distribuidos en dos plantas.

La figura 4-1 corresponde a al plano de la vista superior del hospital, se identifican las dimensiones aproximadas y zonas de interés que correspondientes a:

- Estructura del hospital.
- Sala Cuna (incluye patio de juegos infantiles y refugio).

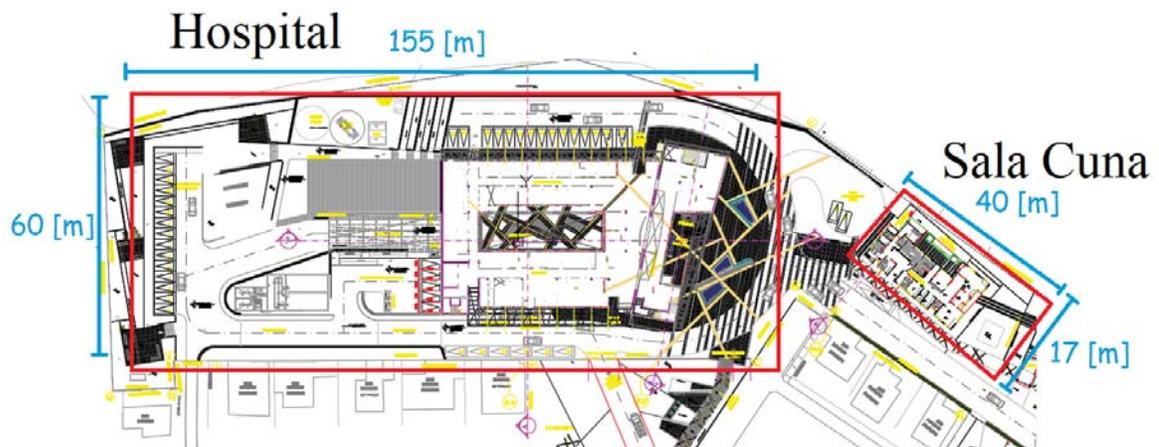


Figura 4-1 Plano vista superior Hospital de Queilén

Los cuadros color rojo en la figura 4-1 enmarcan el área esperada de protección para el caso del hospital y sala cuna, se puede observar que éste incluye zonas aledañas a la estructura en sí, como caminos laterales internos, estacionamiento y cercanías de los accesos. A pesar de que la

probabilidad de descarga resulta baja en los puntos anteriormente señalados en comparación a las estructuras en sí, al incluirlos se reduce el riesgo de daños por efectos de descargas conducidas a través de elementos externos conectados a la estructura, así como del personal que circula por éstas áreas.

En las figuras 4-2 y 4-3 se observan las vistas laterales y posterior de la estructura del hospital.



Figura 4-2 Plano vista lateral 1 Hospital de Queilén



Figura 4-3 Plano vista lateral 2 Hospital de Queilén.

Se observa que la estructura tiene una forma simple, esto resulta conveniente, pues como se vio en apartados anteriores, las salientes o puntos irregulares y elevados aumentan la complejidad del diseño del SCPR.



Figura 4-4 Plano vista Frontal Hospital de Queilén. (Distancias en centímetros).

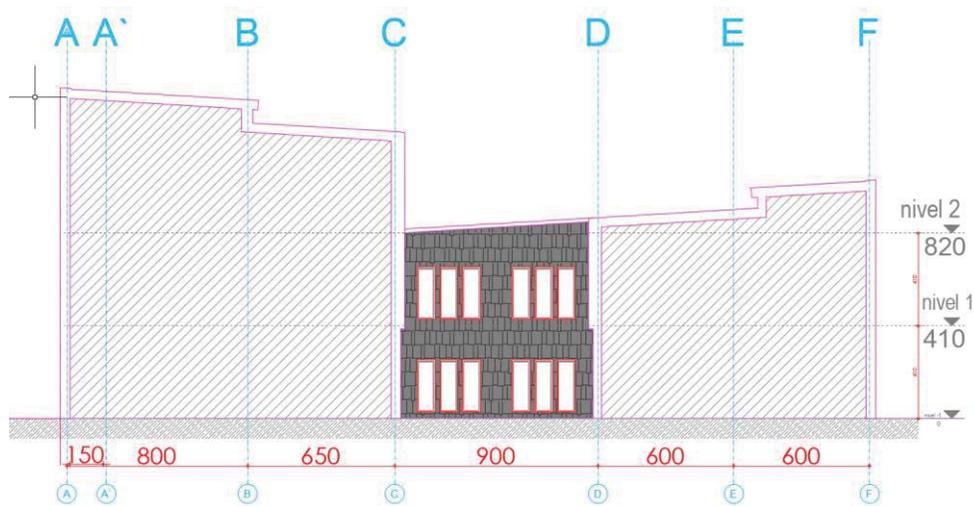


Figura 4-5 Plano vista posterior Hospital de Queilén, (Distancias en centímetros).

El punto de mayor elevación se muestra en la figura 4-4, el cual corresponde a 15,5[m] sobre la superficie, se observa además cierto desnivel en la parte superior de la estructura, con un mínimo entre el punto C y D de alrededor de 8,2[m].

No se cuenta con las vistas laterales de la sala cuna sin embargo su estructura general es simple y de mucho menor tamaño que el hospital, por lo cual no resulta inconveniente la proyección de su SCPR sin ésta información.

4.2 Alternativas de protección

Para efectos prácticos, se considera que todos los captadores pasivos u activos proyectados fueron instalados mediante mástiles a una altura de 5 metros por sobre el punto más alto de

ubicación, bajo éste supuesto y en base a la información informada por el fabricante se puede generalizar un mismo radio de cobertura para cada respectivo modelo.

Para el caso de los PDCs, como fue mencionado en la sección anterior, la efectividad depende principalmente del delta de tiempo que éste sea capaz de aprontarse al trazador descendente, de forma que virtualmente el punto de contacto esta varios metros por sobre la punta física del captor.

Para efectos de proyección se utilizaran PDC de la serie Nimbus del fabricante Ciprotec, la tabla 4-1 detalla en forma simplificada los modelos existentes y los respectivos radios de protección asociado a cada uno que informa el fabricante, de forma análoga a los pararrayos pasivos, de acuerdo al nivel de protección seleccionado el radio de protección varia para un mismo dispositivo.

Tabla 4-1 PDC Serie Nimbus – Fabricante Ciprotec
(Fuente: www.ciprotec.com)

Modelo	Avance del Cebado [uS]	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
		D = 20 [m]	D = 30 [m]	D = 45 [m]
Radio de Protección [m]				
Nimbus 15	15	32	37	45
Nimbus 30	30	48	55	63
Nimbus 45	45	63	71	81
Nimbus 60	60	79	86	97

En análisis previos se calculó que el nivel de protección para el recinto analizado debía ser como mínimo de nivel 2, para efectos de proyección se utilizará como criterio la máxima protección posible, es decir captadores con criterio de protección acotado al nivel 1.

A continuación se plantean algunos escenarios posibles con captadores de tipo pasivo y activo de la serie Nimbus mostrados anteriormente en la tabla 4-1.

4.2.1 Caso 1: Captador pasivo, nivel 1 de protección

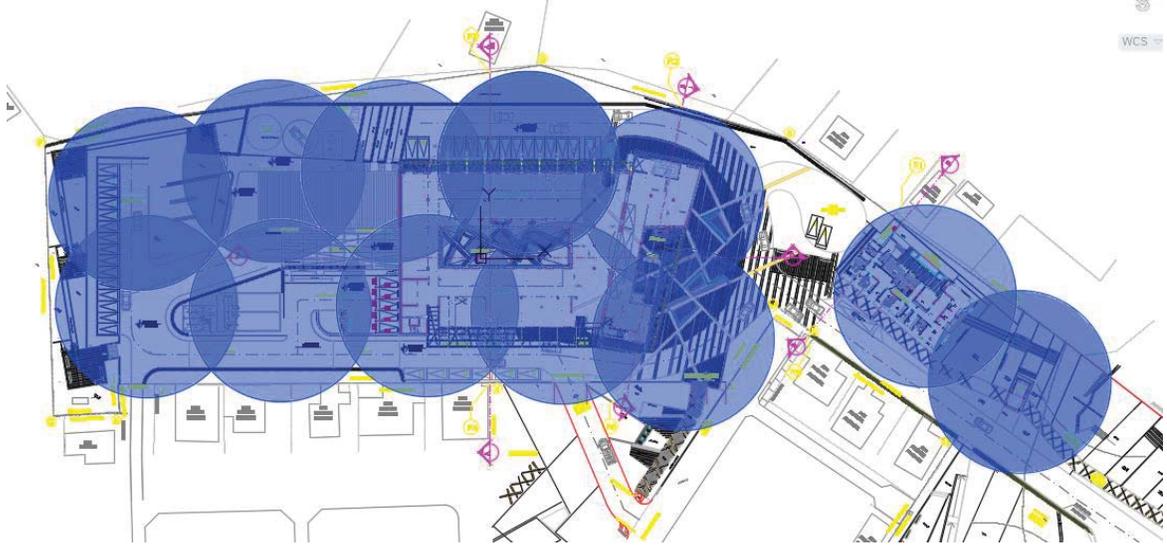


Figura 4-6 Proyección en hospital y sala cuna usando captadores pasivos, nivel 1 de protección.

Elementos primarios de protección requeridos:

- Captadores pasivos tipo punta Franklin : 12
- Bajantes: 24
Metros de cable requeridos por bajantes: 548 [m]
- Tomas a tierra: 24

Se observa que se necesita una gran cantidad de captadores para poder abarcar el área prevista, es de esperar que éste caso implique grandes costos de implementación, dado que cada captador necesita dos bajantes y a su vez cada bajante una toma de tierra.

Existen métodos aplicables para simplificar el caso, como interconectar los captadores entre sí, generando anillos conductores que reduzcan el número de bajantes, sin embargo dada la variedad de alternativas disponibles, no se ahonda en éstas variantes a menos de que el caso predomine entre el resto de las alternativas.

4.2.2 Caso 2: Captador pasivo, nivel 2 de protección

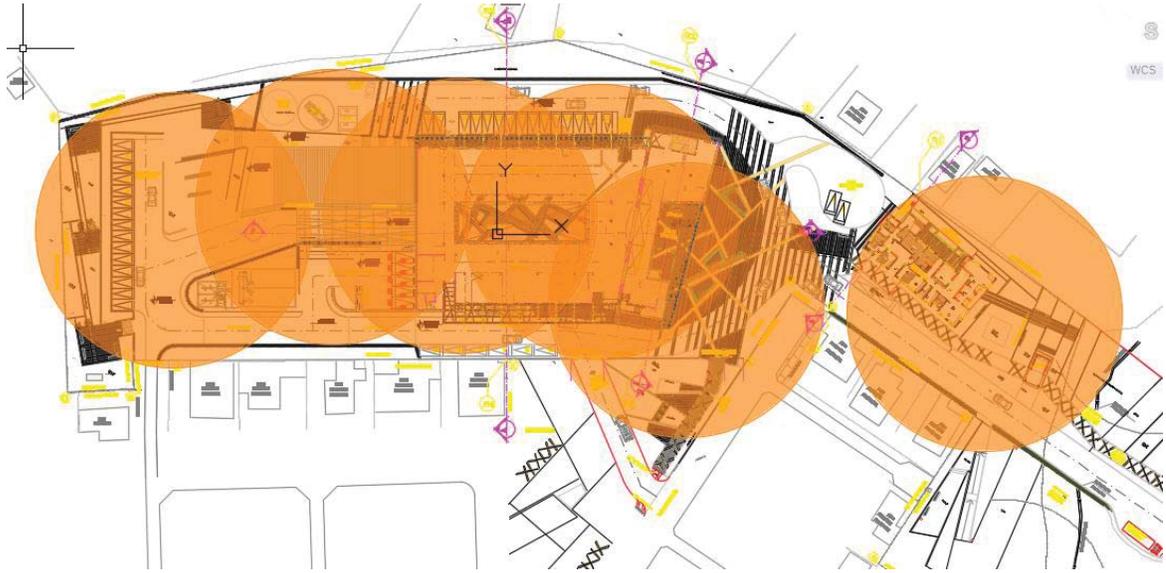


Figura 4-7 Proyección en hospital y sala cuna usando captadores pasivos, nivel 2 de protección.

Elementos primarios de protección requeridos:

- Captadores pasivos tipo punta Franklin : 6
- Bajantes: 12
 Metros de cable requeridos por bajantes: 274 [m]
- Tomas a tierra: 12

Es posible observar que para el caso de un nivel de protección 2, se simplifica la implementación respecto al caso anterior a costa de que la protección es menor, pues el riesgo de prever una descarga como se vio en el capítulo 2, aumenta con el nivel de la protección.

4.2.3 Caso 3: Captador activo, combinación Nimbus 15 y Nimbus 30, nivel 1 de protección

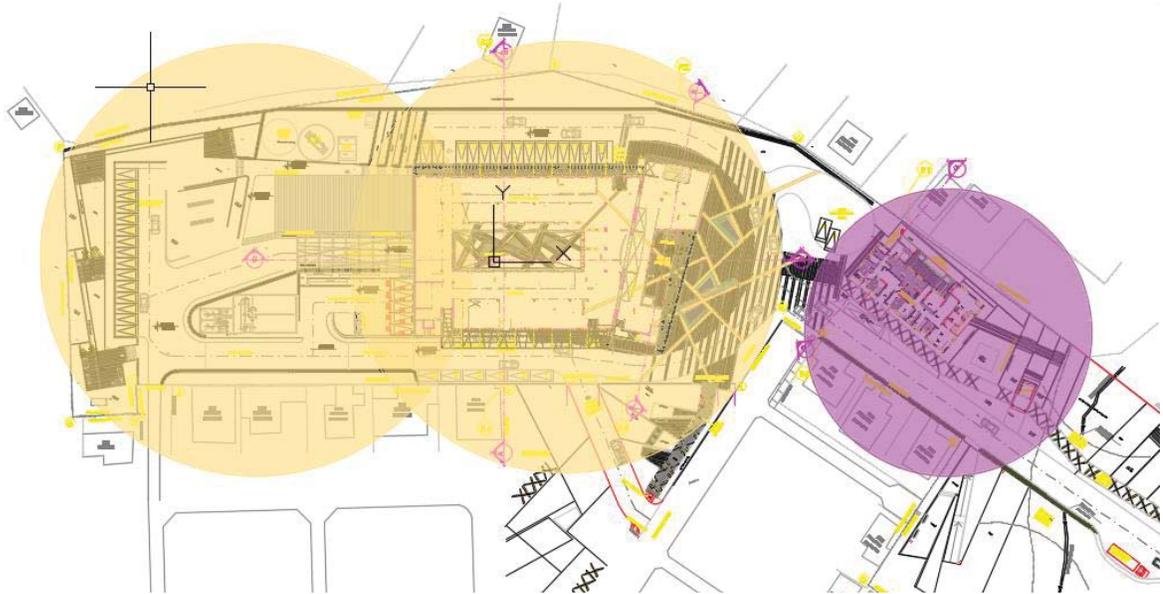


Figura 4-8 Proyección en hospital y sala cuna usando captadores activos, nivel 1 de protección, PDC Nimbus 15 y Nimbus 30.

Elementos primarios de protección requeridos:

- PDC Nimbus 15 : 1
- PDC Nimbus 30 : 2
- Bajantes: 6
Metros de cable requeridos por bajantes: 125 [m]
- Tomas a tierra: 6
- Contadores de descarga: 3 (recomendación fabricante)

4.2.4 Caso 4: Captador activo Nimbus 45, nivel 1 de protección



Figura 4-9 Proyección en hospital y sala cuna usando captadores activos, nivel 1 de protección, PDC Nimbus 45.

Elementos primarios de protección requeridos:

- PDC Nimbus 45: 2
- Bajantes: 4
 Metros de cable requeridos por bajantes: 118 [m]
- Tomas a tierra: 4
- Contadores de descarga: 2 (recomendación fabricante)

4.2.5 Caso 5: Captador activo, combinación Nimbus 15 y Nimbus 60, nivel 1 de protección

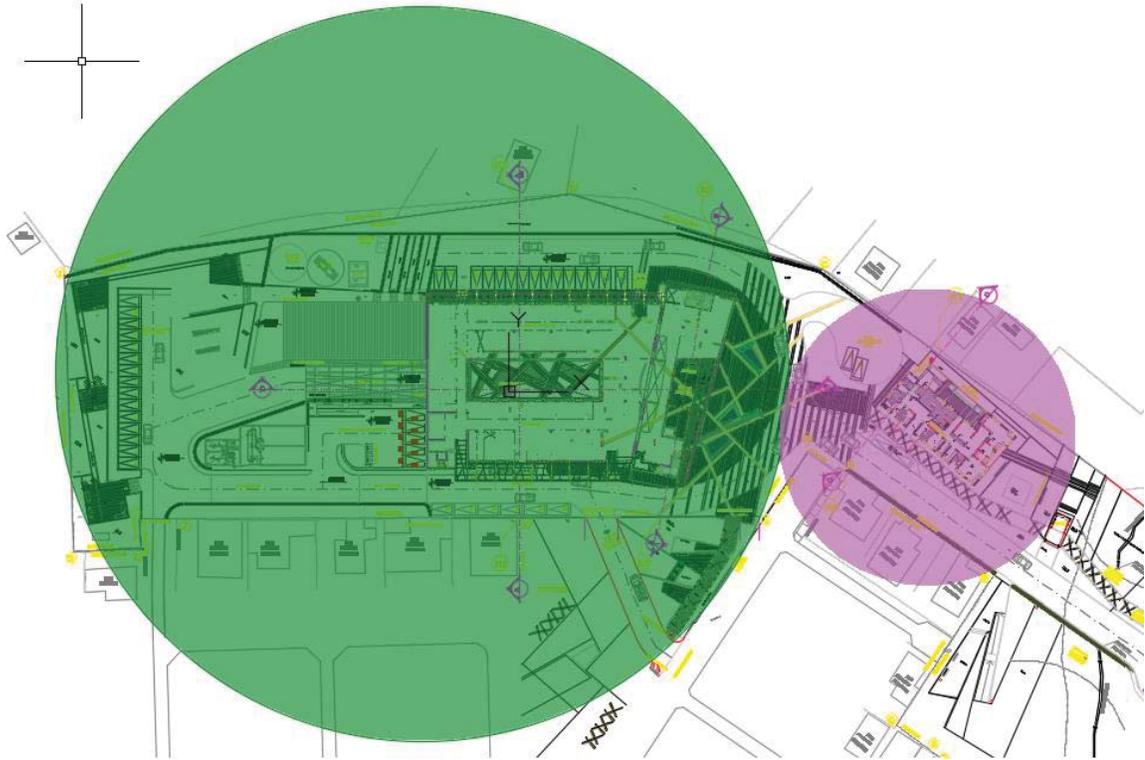


Figura 4-10 Proyección en hospital y sala cuna usando captadores activos, nivel 1 de protección, PDC Nimbus 15 y Nimbus 60.

Elementos primarios de protección requeridos:

- PDC Nimbus 15 : 1
- PDC Nimbus 60: 1
- Bajantes: 4
Metros de cable requeridos por bajantes: 88 [m]
- Tomas a tierra: 4
- Contadores de descarga: 2 (recomendación fabricante)

4.3 Evaluación de costos

En términos generales, cada una de las alternativas planteadas han de ser capaces de proteger de manera efectiva el hospital ante descargas atmosféricas, la preferencia de alguna de las alternativas por sobre otra pasa por diversos factores, donde el factor económico resulta de suma importancia.

4.3.1 Costos de los materiales

La tabla 4-2 detalla los costos de los materiales para cada una de las alternativas de protección descritas.

Tabla 4-2 Costos de los materiales según caso de aplicación descrito.
(Fuente: Elaboración propia, cotización proveedores)

Código	Producto	Precio Unitario	Cantidad según cada caso					Sub-total Caso 1	Sub-total Caso 2	Sub-total Caso 3	Sub-total Caso 4	Sub-total Caso 5
			1	2	3	4	5					
77901115	PDC NIMBUS 15	\$564.309	0	0	1	0	1			\$564.309		\$564.309
77901100	PDC Nimbus 30	\$680.261	0	0	2	0	0			\$1.360.522		
77901200	PDC Nimbus 45	\$888.970	0	0	0	2	0				\$1.777.940	
77901300	PDC Nimbus 60	\$1.082.224	0	0	0	0	1					\$1.082.224
77900400	Pararrayos Tipo Franklin	\$133.933	12	6	0	0	0	\$1.607.198	\$803.599			
77908100	Cable CU/Desnudo # 3/0 AWG 7 H(A), precio por metro	\$4.856	548	274	125	118	88	\$2.661.305	\$1.330.653	\$607.050	\$573.055	\$427.363
77930110	Arqueta de Registro	\$136.779	0	0	6	4	4			\$820.673	\$547.115	\$547.115
77920102	Contador de Impactos	\$225.857	0	0	3	2	2			\$677.571	\$451.714	\$451.714
77902610	Pieza de adaptación PDC a mástil.	\$40.189	0	0	3	2	2			\$120.567	\$80.378	\$80.378
77920500	Vía de Chispas Tierras	\$84.390	12	6	3	2	2	\$1.012.679	\$506.340	\$253.170	\$168.780	\$168.780
77903110	Mástil hierro galvanizado 9m	\$476.690	12	6	3	2	2	\$5.720.280	\$2.860.140	\$1.430.070	\$953.380	\$953.380
77904300	Anclajes Mástil	\$103.660	12	6	3	2	2	\$1.243.920	\$621.960	\$310.980	\$207.320	\$207.320
77909100	Soportes conductor de bajada	\$5.781	1464	732	330	324	234	\$8.462.711	\$4.231.355	\$1.907.578	\$1.872.895	\$1.352.646
77920200	Tubo Protección Bajada	\$47.730	24	12	6	4	4	\$1.145.528	\$572.764	\$286.382	\$190.921	\$190.921
77912000	Manguitos de unión puesta a tierra	\$17.579	24	12	6	4	4	\$421.905	\$210.953	\$105.476	\$70.318	\$70.318
77940000	Electrodo de grafito rígido	\$171.550	24	12	6	4	4	\$4.117.200	\$2.058.600	\$1.029.300	\$686.200	\$686.200
77938501	Aditivo puesta a tierra LOWPAT 25 KG	\$110.230	24	12	6	4	4	\$2.645.520	\$1.322.760	\$661.380	\$440.920	\$440.920
77772100	DPS Tipo 1	\$611.548	1	1	1	1	1	\$611.548	\$611.548	\$611.548	\$611.548	\$611.548

4 Aplicación del modelo de protección, Hospital de Queilén.

Código	Producto	Precio Unitario	Cantidad según cada caso					Sub-total	Sub-total	Sub-total	Sub-total	Sub-total	
			1	2	3	4	5	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	
77707751	DPS Tipo 2 Clase II	\$127.907	10	10	10	10	10	\$1.279.075	\$1.279.075	\$1.279.075	\$1.279.075	\$1.279.075	
77708156	DPS Tipo 3 Clase III	\$74.738	20	20	20	20	20	\$1.494.767	\$1.494.767	\$1.494.767	\$1.494.767	\$1.494.767	
	Trasporte de Materiales							\$650.000	\$420.000	\$250.000	\$250.000	\$220.000	
	Ferretería							\$614.000	\$307.000	\$180.000	\$180.000	\$150.000	
	Seguro de Transporte							\$336.876	\$186.315	\$139.504	\$118.363	\$109.790	
								Sub-Total	\$34.024.513	\$18.817.829	\$14.089.922	\$11.954.689	\$11.088.768
								IVA	\$6.464.657	\$3.575.387	\$2.677.085	\$2.271.391	\$2.106.866
								Total	\$40.489.170	\$22.393.216	\$16.767.007	\$14.226.080	\$13.195.634

Los resultados de la tabla 4-2, muestran que los casos, donde el SPCR utiliza captadores tipo activo resultan mucho más convenientes en términos económicos, dada la simplificación en el uso de componentes asociados.

4.3.2 Costos de instalación

Para la instalación del sistema se definen los siguientes cargos:

- Supervisor: Encargado de identificar las condiciones específicas del lugar, en base a esto proyectar los puntos de instalación de captadores y DPSs, definir la trayectoria de las bajantes y puestas a tierra.
- Instalador: Encargado de realizar las labores propias de instalación en los puntos definidos y según las disposiciones dadas por el supervisor.

La tabla 4-3 detalla el importe hacia el personal según cada una de las alternativas de protección, (valor UF 27004).

Tabla 4-3 Costos de instalación asociados al personal requerido según cada caso.

	Cargo	Función	Valor [UF/HR]	HH	Sub-total [UF]	Sub-total Pesos	Imposiciones	Total
Caso 1	Ing. Eléctrico	Supervisor	0,45	264	118,8	\$3.208.075	\$609.534	\$3.817.609
	Técnico Eléctrico	Instalador 1	0,25	264	66	\$1.782.264	\$338.630	\$2.120.894
		Instalador 2	0,25	264	66	\$1.782.264	\$338.630	\$2.120.894
Subtotal Caso 1								\$8.059.398
Caso 2	Ing. Eléctrico	Supervisor	0,45	176	79,2	\$2.138.717	\$406.356	\$2.545.073
	Técnico Eléctrico	Instalador 1	0,25	176	44	\$1.188.176	\$225.753	\$1.413.929
		Instalador 2	0,25	176	44	\$1.188.176	\$225.753	\$1.413.929
Subtotal Caso 2								\$5.372.932
Caso 3	Ing. Eléctrico	Supervisor	0,45	110	49,5	\$1.336.698	\$253.973	\$1.590.671
	Técnico Eléctrico	Instalador 1	0,25	110	27,5	\$742.610	\$141.096	\$883.706
		Instalador 2	0,25	110	27,5	\$742.610	\$141.096	\$883.706
Subtotal Caso 3								\$3.358.082
Caso 4	Ing. Eléctrico	Supervisor	0,45	110	49,5	\$1.336.698	\$253.973	\$1.590.671
	Técnico Eléctrico	Instalador 1	0,25	110	27,5	\$742.610	\$141.096	\$883.706
		Instalador 2	0,25	110	27,5	\$742.610	\$141.096	\$883.706
Subtotal Caso 4								\$3.358.082
Caso 5	Ing. Eléctrico	Supervisor	0,45	88	39,6	\$1.069.358	\$203.178	\$1.272.536
	Técnico Eléctrico	Instalador 1	0,25	88	22	\$594.088	\$112.877	\$706.965
		Instalador 2	0,25	88	22	\$594.088	\$112.877	\$706.965
Subtotal Caso 5								\$2.686.466

4.3.3 Gastos generales

Los gastos generales involucran todo gasto asociado al desarrollo de la instalación del sistema de protección, como arriendo de equipos, cuentas de teléfono, movilización y transporte del personal desde la ciudad de Santiago, hospedaje, entre otros.

La tabla 4-4 resume los costos asociados.

Tabla 4-4 Costos de generales según cada caso.

Item	Gastos Generales				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Arriendo de equipos	\$1.320.000	\$880.000	\$550.000	\$550.000	\$440.000
Teléfono	\$30.000	\$30.000	\$30.000	\$30.000	\$30.000
Planos	\$75.000	\$75.000	\$75.000	\$75.000	\$75.000
Almuerzo	\$462.000	\$308.000	\$192.500	\$192.500	\$154.000
Movilización	\$198.000	\$132.000	\$82.500	\$82.500	\$66.000
Transporte	\$324.000	\$324.000	\$324.000	\$324.000	\$324.000
Hospedaje	\$700.000	\$875.000	\$875.000	\$1.400.000	\$2.100.000
Subtotal	\$3.109.000	\$2.624.000	\$2.129.000	\$2.654.000	\$3.189.000

4.3.4 Resumen de costos

El resumen de costos resume los costos totales de cada una de las alternativas del proyecto, la tabla 4-5 detalla ésta operación.

Tabla 4-5 Resumen de costos según cada caso.

Ítem	Resumen de Costos				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Materiales	\$34.024.513	\$18.817.829	\$14.089.922	\$11.954.689	\$11.088.768
Remuneraciones	\$8.059.398	\$5.372.932	\$3.358.082	\$3.358.082	\$2.686.466
Gastos Generales	\$3.109.000	\$2.624.000	\$2.129.000	\$2.654.000	\$3.189.000
10% Imprevistos	\$3.713.351	\$2.144.183	\$1.621.892	\$1.460.869	\$1.427.777
Utilidad	\$9.781.252	\$5.791.789	\$4.239.779	\$3.885.528	\$3.678.402
Sub-total	\$58.687.514	\$34.750.732	\$25.438.676	\$23.313.169	\$22.070.413
IVA	\$11.150.628	\$6.602.639	\$4.833.348	\$4.429.502	\$4.193.378
Total	\$69.838.142	\$41.353.371	\$30.272.025	\$27.742.671	\$26.263.792

4.4 SPCR Hospital de Queilén

Con base a los casos presentados su respectivo costo, se recomienda implementar el caso 5, dos captadores activos, Nimbus 15 y Nimbus 60, éste presenta ventajas tales como:

- Económicas: Alternativa de menor costo de las presentadas.
- Simplicidad: El uso de un número bajo de elementos reduce el tiempo de instalación y simplifica su verificación.
- Área de protección: Es el caso donde se logra cubrir la mayor área, brindando una mayor protección.
- Ubicación: El trazado “C” de la estructura visto en la figura 4-5 resulta conveniente para la instalación del PDC por la altura cercana al del punto más alto y por ser un punto medianamente central, como se dispone en la proyección (figura 4-10).

Dado la condición de cercanía al mar, la cantidad de precipitaciones y que se desconocen las condiciones resistivas del terreno, se incluye en la cotización y se recomienda utilizar electrodos de grafito, los cuales presentan una mayor resistencia a la corrosión que los electrodos normales de cobre u otro material metálico, adicionalmente se incluye un aditivo para cada una de las puestas a tierra, a modo de asegurar una resistencia lo más cercana a lo recomendado por la normativa en una disposición sencilla y duradera.

Para la instalación en forma correcta del SPCR se han de tener en cuenta todas las disposiciones y recomendaciones especificadas en éste documento.

Es importante destacar que respecto al SPCR interno, se desconocen los planos eléctricos del hospital, por tanto los datos entregados hacia la proyección de los DPS es teórica, considerando un DPS general (clase I) para el tablero principal, seguidos de otros 10 (clase II) para tableros de distribución y finalmente 20 DPS (clase III) para proteger equipos principalmente sensibles.

Se debe destacar que la cantidad proyectada puede aumentar si las condiciones de la instalación lo ameritan, situación que teniendo la información correspondiente debe analizarse.

4.5 Mantenimiento de un SCPR

Un sistema de protección contra descargas está sometido a esfuerzos eléctricos de corta duración, sin embargo de gran intensidad, para efectos de asegurar la correcta operación del sistema y por tanto mantener un nivel de protección adecuado del sistema protegido es necesario realizar inspecciones al mismo.

4.5.1 Inspecciones de en un SCPR

En términos generales, todos los SPCR deberían inspeccionarse en las siguientes ocasiones:

- Durante el montaje mismo, especialmente durante la instalación de los componentes que quedan ocultos en la estructura y que después serán inaccesibles.

- Periódicamente a intervalos determinados en función de la naturaleza de la estructura a proteger. por ejemplo: Problemas de corrosión, mal tiempo, esfuerzos mecánicos indeseados.
- Después de alteraciones, reparaciones.
- Cuando la estructura ha sido alcanzada por un rayo.

Durante las inspecciones periódicas es particularmente importante comprobar:

- El deterioro y la corrosión de los elementos captadores. conductores y conexiones.
- La corrosión de los electrodos de puesta a tierra.
- El valor de la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra.
- El estado de las conexiones de las conexiones equipotenciales y de las fijaciones.

4.5.2 Ensayos de mantención

Existen algunos elementos que conforman el SCPR para los cuales una inspección no resulta ser un parámetro suficiente de medición, para éstos se realizan los siguientes ensayos:

- Ensayos de continuidad, especialmente en aquellas partes del SPCR que no están visibles durante la instalación.
- Ensayos de resistencia de los sistemas de puesta a tierra, tanto aisladas como combinadas, la resistencia de puesta a tierra de cada electrodo local y donde sea posible la resistencia del sistema de puesta a tierra completo.

4.5.3 Plan de mantenimiento

Un programa de mantenimiento adecuado debería contener previsiones sobre lo siguiente:

- Verificación de todos los conductores y componentes del sistema.
- Verificación de la continuidad eléctrica de la instalación del SPCR.
- Medida de la resistencia del sistema de puesta a tierra.
- Verificación de los DPS.
- Fijación de los componentes y conductores.

No existe un periodo pre-estipulado de tiempo para el plan de mantenimiento, las condiciones del lugar determinan en gran parte el desgaste del sistema, sin embargo se puede tomar como referencia las inspecciones en el sistema, ya que estas pueden incurrir en mantenciones y en el tiempo proporcionar un perfil de las actividades y la periodicidad necesaria para la correcta operación del sistema.

4 Aplicación del modelo de protección, Hospital de Queilén.

Tabla 4-6 Periodos máximos entre inspecciones de un SCPR.
(Fuente IEC 62305-4 [12])

Nivel de Protección	Inspección Visual (Año)	Inspección Completa (Año)
I y II	1	2
III y IV	2	4

La tabla 4-6 estipula los tiempos máximos permitidos entre cada inspección, cabe destacar que como se mencionó en el apartado anterior, los intervalos señalados son referenciales, se recomienda establecer periodos acordes al medio según las condiciones ambientales donde se instala el SPCR.

Discusión y conclusiones

Para abordar el desarrollo de este trabajo, fue necesario realizar en primera instancia un análisis del marco teórico asociado al tema, considerando las variables que originan el problema y las formas más básicas de contrarrestar sus efectos. Respecto a las variables que originan el fenómeno.

Respecto a la naturaleza del fenómeno, resulta claro que la topología de la estructura tiene directa relación en la formación de puntos vulnerables a descargas, en este contexto, se ha de tener especial precaución con los elementos que se instalan en la parte superior de edificio, como tomas de aire, antenas u otros. En caso de instalarse antenas en la parte superior de la estructura, éstas deben ser aterrizadas a tierra, para evitar posibles daños a los sistemas de comunicación y la estructura.

Fue posible corroborar que es posible en ciertas condiciones y con cierto grado de efectividad cercano al 65% predecir las descargas eléctricas, en tiempos de predicción no menores a 15 minutos. Esta situación se da por efecto de la dificultad en el procesamiento de los fenómenos que ocurren en la atmósfera, el aumento de la cantidad de sensores por área puede disminuir el porcentaje de error, no obstante ésta condición se cumpliría sólo si el algoritmo de búsqueda y reconocimiento es capaz de correlacionar los datos, aún se está bastante lejos de poder predecir sin errores la ocurrencia de una tormenta en tiempo real.

Respecto a las protecciones de tipo activas, se observa que para el caso del modelo de mayor cobertura, manteniendo el nivel de protección, el área cubierta es prácticamente cuatro veces superior al caso de un captador de tipo pasivo. Los beneficios en cuanto a la simplificación de la implementación son claros, producto del contraste entre el uso de 12 captadores pasivos que cubren un área que se podría considerar efectiva, sin embargo resulta menor a la extensión que se logra con tan sólo un pararrayos con dispositivo de cebado.

El beneficio económico de usar captadores de tipo activo por sobre captadores de tipo pasivo resulto considerable, la opción con PDCs resulto con un precio estimado de \$26,3 millones de pesos, muy por debajo de los \$69,8 millones del caso 1 de los captadores pasivos. Si bien el caso 2 de los captadores pasivos presenta una reducción importante de costos, se debe recordar que para éste caso se utilizó un nivel de protección de nivel 2, el cuál presenta probabilísticamente

un porcentaje de éxito en la protección menor al que se logra con un nivel 1 de protección, por esto ésta alternativa resulta sólo a modo de ejemplificación en cuanto al cambio del nivel de protección.

Resulta claro lo ventajoso de los PDCs sobre los captadores pasivos, sin embargo resulta preciso señalar que los PDCs no están avalados por ninguna norma internacional a diferencia de los captadores pasivos, aunque ésta situación no tuviese un impacto contraproducente real en la práctica, se debe contrastar estas disposiciones con la próxima reglamentación por parte de la SEC.

Respecto al sistema de bajantes del sistema de protección, resulta importante el recopilar todos los antecedentes de los elementos de la estructura, tanto para evitar todo elemento inflamable, conductor, que pudiese ocasionar algún daño, las bajantes han de estar aisladas respecto a otros elementos y a una distancia prudente de otros conductores y componentes eléctricos.

Respecto a las puestas a tierra, a diferencia de una instalación tradicional, donde la corriente de servicio de la instalación tiene directa relación al dimensionamiento de la malla a tierra, en el caso de los sistemas de protección contra descargas, no se cuenta con éste parámetro, los electrodos están normados de forma que puedan soportar de forma satisfactoria la descarga de un rayo, no obstante el dimensionamiento del mismo estará ligado a la resistividad del terreno, si el terreno presenta alta resistividad, se incurrirá en mayores costos, debido al aumento de electrodos y/o aumento de las dimensiones de la malla a tierra.

Para mitigar ésta situación se opta por utilizar electrodos de grafito rígido, los cuales presentan mayor durabilidad en condiciones corrosivas y tienen una mejor adaptación en terrenos de alta resistividad, adicionalmente se considera un compuesto aditivo para cada puesta a tierra, de forma de asegurar un valor de resistencia lo más cercano a los 10 ohms recomendados.

Es importante destacar que el sistema de protección interno del rayo se proyectó en forma genérica, éste sistema provee protección contra los efectos electromagnéticos de corrientes que pudieran ser inducidas hacia el interior de una estructura, sus principales componentes, los DPS se instalan en cascada desde el tablero principal hacía tableros de distribución y servicios propiamente tal, sin tener una idea clara de la cantidad de equipos o el diagrama eléctrico de la instalación, resulta imposible definir un número específico y certero de éstos elementos a utilizar.

Adicionalmente, se recomienda el uso de conductores apantallados, con especial importancia entre elementos externos que pudiesen estar compartiendo la red eléctrica, de modo de evitar inducción de corrientes que puedan ocasionar daños, ésta consideración se aplica también para elementos eléctricos o electrónicos de importancia o particularmente sensibles.

Respecto a la evaluación de costos, se omite en éste un análisis económico más profundo, el objetivo del proyecto es proteger el hospital de Queilén y sus ocupantes contra las descargas atmosféricas, por tanto corresponde a un proyecto social, los indicadores del rendimiento

económico como el VAN y el TIR resultarían en valores negativos, pues no hay una recuperación monetaria de la inversión.

Bibliografía

- [1] Feynman, Leighton, Sands: "The Feynman lectures on Physics", Vol II, Mainly Electromagnetism and Matter. Addison Wesley, 1972
- [2] Gómez, P. y Guevara, B. (2013). Descargas atmosféricas. Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional, México
- [3] MacGorman, D., Rust, W. D. "The Electrical Nature of Storms" 422 pp. Oxford Univ. Press, Ne York 1998 ISBN O-19-507337-1
- [4] Uman M., "Atmospheric Electricity: Lightning and EMP Protection" CRC Handbook of Chemistry and Physics. 76 edition, David Lide(Editor), CRC Press Boca Raton 1996.
- [5] Block, Roger: "The Grounds of Lightning and EMP Protection" PolyPhaser Corp. 1993
- [6] Protection against lightning Part 1: General principles (IEC 62305-1: 2006)
- [7] Protection against lightning Part 2: Risk management (IEC 62305-2: 2010)
- [8] Tommasini R-Rostagno F., "Application of the Rolling Sphere Method", ICLP, 1998.
- [9] Protection against lightning Part 3: Physical damage to structures and life hazard (IEC 62305-3: 2010)
- [10] UNE 21186—2011 "Proteccion de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado"
- [11] Berger, G., Hadaji, R., "Lightning attachment physics. Experiments and modeling", en V SIPDA, Brasil, 1999, lecture 5, pp., 476 a 494.
- [12] Protection against lightning Part 4: " Electrical and electronic systems within structures " (IEC

62305-4: 2010)

- [13] UNE-EN-61180-1 "High-Voltage test techniques for low-voltage equipment. Part 1: Definitions, test and procedure requirements".
- [14] "Protection against lightning - Thunderstorm detection devices"; German version prEN 50536:2009 devices. European Standard.,” 2009.
- [15] López Trujillo, J. A. Thunderstorm forecast methodology using electric field measurement and lightning detection network on non-flat terrain (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).