



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EN
ESTRUCTURAS

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

Presenta:

FRANCISCO JAVIER GARCÍA MORENO



DIRECTOR DE TESIS

ING. ARTURO MORALES COLLANTES

MÉXICO, D.F.

MARZO, 2003

PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN ESTRUCTURAS

ÍNDICE

Introducción	I
1 Antecedentes	1
1.1 Polarización de los cuerpos	2
1.2 Ionización de la atmósfera	5
1.2.1 Agentes de ionización	6
1.3 Nubes	8
1.4 Mecanismos que intervienen en la formación de carga en la nube	9
1.5 Formación del rayo	11
1.5.1 Células de tormenta	11
1.6 La descarga del rayo	13
1.6.1 Alteraciones electrostáticas asociadas al rayo	18
1.7 Parámetros que caracterizan a las descargas atmosféricas	20
2 Efectos de los rayos en estructuras e instalaciones	24
2.1 Efectos de las sobretensiones debidas a los rayos	29
2.1.1 Tensiones inducidas en lazos metálicos	31
2.1.1.1 Acoplamiento de corrientes en cables de señales	34
2.2 Magnitud de las sobretensiones de rayo	36
3 Componentes de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas	37
3.1 Protección exterior	40
3.1.1 Dispositivos pararrayos	40
3.1.2 Derivadores o conductores de bajada	41
3.1.3 Instalación de puesta a tierra	41
3.1.4 Blindaje	42
3.2 Protección interior	43
4 Protección contra descargas atmosféricas	45
4.1 Necesidad de la protección contra descargas atmosféricas	45
4.2 Equipos y estructuras	46
4.3 Principios de protección	47
4.3.1 Protección de estructuras comunes con puntas pararrayos	49
4.3.2 Zonas de protección	71
4.4 Conexión de tierra	75
4.5 Mantenimiento del sistema de protección	86

5 Prácticas de protección en los sistemas eléctricos	89
5.1 Sobretensiones eléctricas	89
5.2 Plantas generadoras y subestaciones	91
5.3 Líneas de transmisión	103
ANEXO A Guía para la determinación del riesgo de descarga en una instalación	111
Conclusiones	115
Bibliografía	118

INTRODUCCIÓN

Las descargas atmosféricas, o rayos, son fenómenos totalmente aleatorios a los que todos estamos expuestos.

Reconociendo lo grave en pérdidas humanas que pueden ocasionar, anualmente tienen como consecuencia pérdidas millonarias (sólo en los Estados Unidos, incluyendo pérdidas de maquinaria, productos, paros de producción, pérdidas de información, pagos de seguros, incendios, etc. las pérdidas alcanzan de 4 a 5 mil millones de dólares anuales, -fuente: National Lightning Safety Institute-), estos efectos, sin embargo, pueden ser mitigados o evitarse en su totalidad por medio de un adecuado sistema de protección.

Este es el objetivo que se persigue con la elaboración de la presente tesis, ofrecer una explicación del fenómeno que permita comprender su desarrollo y el peligro de sus efectos así como la necesidad de contar en toda estructura con una instalación de protección adecuada a cada caso particular y recalcar la importancia que tiene la correcta planeación y ejecución de la misma.

Se buscará difundir la información existente acerca de los efectos adversos que el fenómeno puede producir en las edificaciones y en las instalaciones y equipo que se encuentren dentro de los mismos; en todo caso, ante la ausencia de documentos oficiales en nuestro país que abordan el tema con detalle, se espera que esta tesis sirva como material de consulta que ayude en la planeación de una instalación de protección, del mismo modo, puede servir como un primer acercamiento al estudio del fenómeno si lo que se desea es hacer una investigación más profunda sobre el tema.

Dada la naturaleza del fenómeno abordado, la metodología a seguir será únicamente trabajo de investigación, consulta de bibliografías y artículos en páginas electrónicas, así como de manuales y documentos de instituciones y organismos dedicados al estudio y a la experimentación sobre el fenómeno.

Al recopilar información variada, se tendrán diferentes puntos de vista, metodologías y prácticas que se han desarrollado con el tiempo, así como ideas novedosas que han surgido actualmente, esto va a permitir trazar una línea de desarrollo que permita identificar los puntos o temas necesarios para llegar a un mejor entendimiento del problema y sus posibles soluciones, del mismo modo, con base en lo anterior se podrá formar un criterio firme, bien fundamentado que llevará a elegir u ofrecer una solución adecuada al problema.

De esta forma, al buscar información se ha encontrado que una protección eficaz contra descargas atmosféricas consiste de un sistema de protección exterior y un sistema de protección interior. Se abordará con detalle únicamente el sistema de protección exterior, los elementos que lo componen y su funcionamiento ya que este tema es el que está más relacionado con las instalaciones eléctricas y los sistemas eléctricos de potencia, por otra parte, ambos temas, protección interna y externa, son bastante extensos e igualmente importantes. Un sistema de protección interior consiste en aquellos elementos electrónicos, reguladores, etc. destinados a limitar los excesos de voltaje y de corriente que por causas directas o indirectas al rayo pueden presentarse en las entradas de energía, de datos o de señales de los diferentes equipos localizados dentro de una estructura.

Este sistema no se abordará con mayor detalle, únicamente se reconoce su importancia y la necesidad de combinar su uso junto con el sistema externo para alcanzar un mayor nivel de protección.

Un sistema de protección exterior, entre otros elementos auxiliares se compone del elemento de captura, el pararrayos, conductores de bajada, que van a conducir la corriente del rayo hacia el suelo, y un sistema de puesta a tierra que permita disipar la corriente.

Hablando específicamente del pararrayos, se han encontrado y se incluyen varias teorías o tecnologías que, de acuerdo a su operación suponen ciertas ventajas respecto al uso de otros dispositivos. Es importante hacer esta aclaración, ya que actualmente se cuenta con diferentes dispositivos pararrayos, los cuales por su principio de operación se clasifican como elementos pasivos o activos; estos últimos incluyen los dispositivos denominados de emisión temprana de rayo y los de disuasión, los cuales buscan anticipar la descarga o inclusive la formación de carga en la nube para impedir la descarga del rayo en la zona que se desea proteger.

En cuanto al funcionamiento efectivo de estos dispositivos, existen opiniones divididas, pues se debe garantizar que su capacidad de neutralizar la carga de una nube realmente puede competir con la capacidad generadora de esta última.

Los elementos pasivos, denominados puntas Franklin, han sido usados desde hace mucho tiempo, en comparación con las nuevas tecnologías, y su operación ha sido verificada, si bien no se pretende influir en la decisión particular de utilizar uno u otro tipo de pararrayos, o desacreditar alguno de los mismos, es importante señalar que ante una eventual falla de los dispositivos activos su operación viene a ser idéntica a la de un pararrayos del tipo pasivo, razón por la cual se busca dar a conocer los elementos y características esenciales con que debe cumplir una instalación de protección para respaldar el funcionamiento de un pararrayos.

De este modo, el texto estará enfocado al uso de pararrayos del tipo convencional, puntas Franklin, y del concepto de jaula de Faraday o blindaje, en el que se promueve también el uso de los elementos estructurales de las construcciones siempre que cumplan con algunas especificaciones que se señalan, asimismo, se insistirá en la necesidad de realizar una adecuada toma de tierra para estos dispositivos, la cual es primordial para su funcionamiento.

El objetivo principal de éste texto es difundir el entendimiento que se tiene actualmente sobre el fenómeno, dar a conocer los efectos que las descargas atmosféricas pueden producir en forma directa e indirecta en la industria, casas habitación etc. y hacer énfasis en la necesidad de contar con instalaciones de protección en todo tipo de estructuras. Con ese fin, y pensando en facilitar el acceso a cualquier persona interesada en el fenómeno, se ha recopilado la información básica que se ha considerado necesaria para una mejor comprensión de las descargas atmosféricas; desde sus primeras etapas de formación dentro de la nube, hasta la manifestación del rayo, sus características y los efectos que pueden producir a su paso, y lo más importante; las medidas que pueden adoptarse para evitar sus efectos destructivos.

De tal forma, el capítulo uno incluye teoría básica sobre cargas eléctricas y polarización de los cuerpos; elementos clave en la formación del rayo, la forma en la cual se presenta la descarga del mismo, y el medio en el que se desarrollan; las nubes.

El capítulo dos señala los problemas que pueden producirse por la descarga directa o indirecta del rayo en una estructura, excesos de corriente y de tensión que pueden llegar a ser en extremo peligrosos para las personas y equipo que se encuentren en los alrededores del punto de descarga.

En el capítulo tres se explica de forma general las medidas que pueden adoptarse como protección contra rayos, sistemas de protección interior y exterior, así como los elementos que componen dichos sistemas.

Como ya se dijo, esta obra se enfocará al sistema de protección exterior contra rayos, de tal forma que el capítulo cuatro abordará aquellos aspectos técnicos que desde el punto de vista de prácticas y normas internacionales se han desarrollado con los años y se ha comprobado que ofrecen buenos resultados para dicho fin.

Cabe aclarar que las prácticas señaladas están dirigidas a estructuras comunes, como pueden ser edificios de oficinas, de departamentos, casas habitación, centros comerciales, no se incluye una clasificación de áreas peligrosas (instalaciones destinadas al almacenaje o procesamiento de materiales o sustancias inflamables o explosivas), en tales circunstancias, deberá hacerse un estudio cuidadoso de cada caso en particular. Se recomienda consultar y obedecer lo indicado en las normas que correspondan a dichos casos.

El capítulo cinco trata los efectos directos e indirectos que las descargas atmosféricas pueden producir en los sistemas eléctricos de potencia, plantas generadoras, subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y de distribución, así como las medidas de protección que pueden adoptarse.

Finalmente, el anexo A es una pequeña guía que ayuda a determinar el nivel de riesgo que tiene una determinada estructura de sufrir un impacto directo de un rayo, esto es con la finalidad de ayudar a identificar o advertir aquellos factores o circunstancias que van a favorecer en forma importante la descarga de un fenómeno tan aleatorio como lo es un rayo en un sitio determinado.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

La palabra electricidad proviene de *electrum*, la palabra griega para el ámbar; mientras que la primera cita escrita acerca de los curiosos efectos del ámbar frotado data del siglo V a. de C. , con seguridad mucho tiempo antes las personas observaron el crujir y el chisporroteo de una piel frotada, sin embargo, fue en el siglo XVIII cuando finalmente se llevó a cabo el descubrimiento crítico de que las fuerzas eléctricas podrían ser de atracción o de repulsión. A través del tiempo se desarrolló la idea de que una cierta propiedad, que ahora llamamos carga eléctrica, está asociada con las fuerzas eléctricas. Entre los muchos nombres importantes relacionados con esos descubrimientos están los de Stephen Gray, Charles Dufay y Benjamín Franklin.

Franklin, fascinado con las demostraciones de salón de los efectos eléctricos, muy de moda en el siglo XVIII, llevó a cabo abundante investigación científica. Su fama principal viene con su desarrollo de la idea existente a la fecha que asociaba los fenómenos eléctricos con un tipo de fluido contenido en la materia; la repulsión y la atracción se relacionaban con exceso o defecto del fluido.

En este modelo estaba implícito lo que ahora conocemos como el fenómeno de la conservación de la carga: si el fluido tuviera que salir de un cuerpo, dejaría una deficiencia. Franklin introdujo los términos positiva y negativa para los dos tipos de carga. También estableció la convención normal del signo, en la cual el electrón, la partícula que realmente se mueve en los conductores, tiene carga negativa. Franklin es famoso en especial para el público en general, por sus espectaculares y peligrosos experimentos con los rayos, a los cuales reconoció como fenómenos eléctricos, y fue el primero en diseñar un experimento que comprobara la naturaleza eléctrica de los rayos.

Para dicho experimento propuso la teoría de que las nubes están cargadas eléctricamente, de lo cual concluyó que los rayos debían ser electricidad.

El experimento incluía a Franklin de pie en una plataforma sosteniendo una barra de hierro en una mano para obtener una descarga eléctrica entre la otra mano y tierra. Si las nubes estuvieran cargadas eléctricamente, entonces podrían saltar chispas entre la barra de hierro y un conductor aterrizado.

Este experimento fue realizado con éxito por Thomas Francois D'Alibard en Francia en mayo de 1752, cuando observó chispas saltando de la barra de hierro durante una tormenta. G.W. Richmann, un físico sueco que se encontraba trabajando en Rusia en julio de 1753 probó que las nubes de tormenta tenían carga eléctrica, desafortunadamente murió al ser alcanzado por un rayo.

Antes de que Franklin realizara su original experimento, pensó en una mejor forma para probar su hipótesis usando un papalote. El papalote tomó el lugar de la barra de hierro, ya que esto permitía alcanzar una mayor elevación así como una gran libertad de movimiento. En 1752 durante una tormenta en Pensilvania el papalote más famoso de la historia volaba mientras saltaban chispas desde una llave sujeta al extremo inferior del cordón húmedo que sostenía al papalote, hacia un listón de seda atado a los nudillos de la mano de Franklin. Su cuerpo aterrizado ofrecía un medio conductor a las corrientes eléctricas que respondían al intenso campo eléctrico desarrollado en las nubes.

Además de mostrar que las nubes de tormenta contenían electricidad, midiendo el signo de la carga obtenida por medio del papalote, Franklin pudo deducir que la parte inferior de la nube estaba por lo general cargada negativamente.

Los progresos en la comprensión de las propiedades de los rayos fueron poco significativos hasta finales del siglo XIX, cuando la fotografía y espectroscopia estuvieron disponibles para la investigación.

1.1 POLARIZACIÓN DE LOS CUERPOS

La evidencia que condujo al descubrimiento de la carga eléctrica y de las fuerzas eléctricas dependía de las propiedades eléctricas de la materia. La materia se conforma de átomos, los cuales están formados por núcleos y electrones, los que se pueden caracterizar mediante la carga eléctrica.

Los átomos son eléctricamente neutros, esto es, un átomo en su conjunto no tiene carga eléctrica. Los electrones de un átomo tienen la misma unidad de carga negativa. Los electrones se mueven en órbitas en regiones parecidas a capas alrededor del núcleo, mucho más pesado que consiste de neutrones que son eléctricamente neutros, y protones, que tienen una carga de igual magnitud pero opuesta en signo a la del electrón.

En un átomo neutral, el número de electrones es igual al número de protones. Los elementos químicos se diferencian en el número de electrones en sus átomos, o, de modo equivalente, en el número de protones en sus núcleos.

Los electrones que se encuentran más cerca del núcleo son difíciles de retirar por la intensidad de la atracción hacia este, los electrones más externos son atraídos con menor fuerza hacia el núcleo y se separan de él con mayor facilidad. La facilidad con la que esto sucede determina en gran parte las propiedades físicas y químicas del elemento que contiene esos electrones.

Si los electrones externos de los átomos, en la materia en general, son especialmente fáciles de retirar, o sea, están débilmente enlazados a su núcleo se comportan como si estuvieran casi libres y se pueden mover a través del material casi sin impedimento, estos materiales se denominan conductores, los metales en general son buenos conductores; el cobre, la plata, el aluminio y el oro son los mejores conductores. Los electrones en la mayor parte de los sólidos no metálicos no se mueven con tanta facilidad; esos sólidos, que incluyen al vidrio, hule, y los plásticos, entre otros, son aisladores.

La facilidad con la cual se mueven las cargas por la materia se relaciona con la capacidad de transferir cargas en uno u otro sentido entre materiales diferentes. Al hacerlo se dice que se ha cargado o descargado dicho material.

Al frotar un material en el que los electrones externos están débilmente enlazados, como el ámbar, esos electrones pueden irse a otra parte y terminar depositados en otro objeto. El material original tiene entonces un exceso de carga positiva, ha perdido electrones. El objeto al cual se han transferido esos electrones tendrá un exceso de ellos y queda con carga negativa. Cuando la carga pasa de este modo de un cuerpo a otro se dice que los cuerpos se cargan por conducción. Debe observarse que tanto el material original como el objeto han adquirido carga. Se puede tener otro medio de control de la carga de un objeto si lo conectamos a tierra por medio de un buen conductor, un cable de cobre por ejemplo.

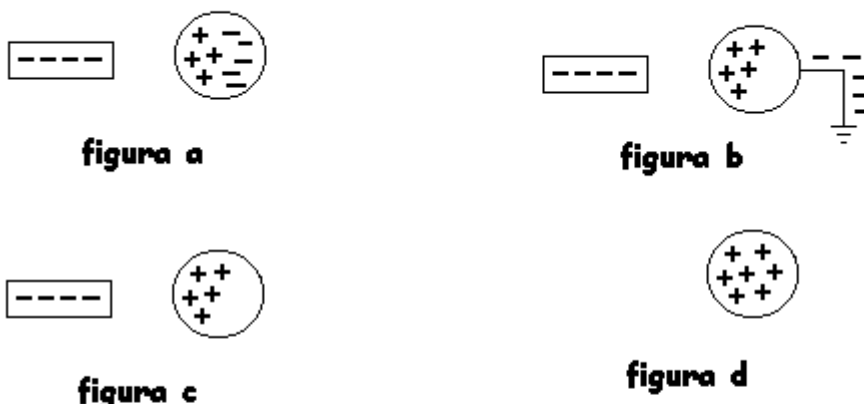
Cuando se conecta así un objeto con carga negativa con la tierra, los electrones pasan del objeto hacia ésta y queda neutro. Si en lugar de ello, un objeto tiene carga positiva en exceso, entonces llegan electrones desde tierra y lo neutralizan. Debido a que la tierra misma es un buen conductor, el cable que une al objeto con tierra permite compartir la carga del objeto con la de la tierra, pero como ésta es tan grande, la carga residual en el cuerpo no se puede detectar. Se dice entonces que ese objeto está aterrizado o puesto a tierra.

Carga por inducción

La Tierra puede considerarse entonces como un sumidero infinito al cual los electrones pueden emigrar fácilmente. Con esto en mente, podemos entender como cargar un conductor por medio de un proceso conocido como inducción.

Para entender la inducción, consideremos una barra de caucho cargada negativamente que se acerca a una esfera conductora neutra (descargada) aislada de tierra; es decir, no hay una trayectoria de conducción a tierra (figura a). La región de la esfera más cercana a la barra obtiene un exceso de carga positiva mientras que la región de la esfera más alejada de la barra obtiene un exceso igual de carga negativa, esto significa que los electrones en la parte de la esfera más cercana a la barra emigran hacia el lado opuesto de la esfera. Si se realiza el mismo experimento con un conductor uniendo la esfera con tierra (figura b) una parte de los electrones en el conductor se repelen tan intensamente por la presencia de la carga negativa que salen de la esfera a través del conductor y van a tierra. Si dicho conductor se quita después, (figura c); la esfera mantendrá un exceso de carga positiva inducida.

Por último, cuando la barra de caucho se aparte de la vecindad de la esfera (figura d), la carga positiva inducida permanece sobre la esfera. Cabe señalar que la carga en la esfera se distribuye uniformemente sobre la superficie debido a las fuerzas de repulsión entre cargas de mismo signo. Durante el proceso, la barra de caucho electrificada no pierde cantidad alguna de su carga.



carga por induccion

De esta forma, puede observarse que para cargar un objeto por inducción no es necesario que esté en contacto con el cuerpo que induce la carga, lo que contrasta con la forma en que se carga un objeto por frotamiento (carga por conducción), para lo cual es necesario el contacto entre los dos cuerpos.

Un proceso muy similar a la carga por inducción en conductores ocurre también en los aisladores. En la mayor parte de los átomos y moléculas neutros, el centro de carga positiva coincide con el centro de carga negativa, sin embargo, en presencia de un objeto cargado, estos centros pueden desplazarse ligeramente; lo que produce más carga positiva en un lado de la molécula que del otro. Este efecto es conocido como polarización.

De acuerdo a lo anterior, se reconocen dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, mismas que se encuentran en equilibrio en la mayoría de las sustancias naturales, lo que les hace materiales eléctricamente neutros. Un material con exceso de alguna de éstas cargas se dice que está cargado eléctricamente, o ionizado, los iones son las partículas que transportan las cargas. Bajo condiciones normales, los iones con cargas opuestas se atraen entre sí; fluyen uno hacia el otro hasta recombinarse y recuperar la neutralidad eléctrica. Cuando esto no puede suceder debido a que los iones están separados por un medio aislante existirá una carga estática, una carga eléctrica que no fluye, no tiene movimiento. Si más iones de un mismo tipo se acumulan sobre un objeto la cantidad de carga estática de ese objeto crece, si dicha carga aumenta lo suficiente, la atracción hacia el objeto más cercano con carga opuesta se volverá tan grande que las cargas saltarán entre los dos objetos eliminando parte o la totalidad de la diferencia de carga entre dichos objetos.

Esto es muy similar a lo que ocurre cuando surge un rayo. Antes de que un rayo suceda, grandes (inmensas) cantidades de cargas estáticas debe acumularse en las nubes. Debido a la diferencia de masas (peso) de las partículas con cargas positivas y negativas éstas se separan, acumulándose las primeras en la parte superior de la nube y las segundas cerca del centro y en la parte baja de la nube.

A medida que las nubes se desplazan, son seguidas por una “sombra” de cargas positivas en el suelo que son atraídas por la carga de la parte baja de la nube. Cuando fluye la carga eléctrica entre la nube y tierra o viceversa, ocurre el rayo.

Debido al flujo de iones, en lo que es conocido como el canal del rayo, se reduce la diferencia de carga entre los extremos de dicho canal. El canal del rayo puede establecerse entre una nube y otra, de nube a tierra, o de tierra a nube, siempre que la diferencia de carga sea suficientemente grande y la distancia entre ambos extremos sea relativamente pequeña para permitir la formación del canal del rayo.

1.2 IONIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA

La conductividad eléctrica del aire, establecida en primer lugar por Linss en 1887, tiene un papel importante en todos los fenómenos que se incluyen bajo el título de electricidad atmosférica. Desde 1901 cuando Elster y Geitel y C.T.R. Wilson descubrieron en forma independiente que esta conductividad se debe a la presencia de pequeños portadores de carga positiva y negativa llamados iones, la naturaleza y origen de estos iones a sido objeto de investigación.

Dos diferentes caminos se han seguido con estas investigaciones, por un lado se trata con el número y naturaleza de los iones atmosféricos y por el otro con las radiaciones que los producen. Los dos caminos sin embargo, convergen en el problema del balance de la ionización en la atmósfera, la forma en la cual se mantiene un equilibrio entre la tasa de creación y la tasa de desaparición de los iones.

Iones atmosféricos grandes y pequeños.

Una molécula de gas se ioniza cuando algún agente externo aporta la energía necesaria para liberar un electrón de la molécula, debido a esto se obtiene el remanente de la molécula con carga positiva y el electrón liberado con carga negativa, ambos, bajo condiciones normales de presión muy pronto son atraídos a una o más moléculas sin carga, a lo que se le llama un par-ión.

Dichos iones son conocidos como normales, pequeños o rápidos, y cuando se encuentran en la atmósfera tienen una movilidad del orden de 1.5 centímetros por segundo.

La presencia en el aire de pequeñas partículas de polvo, residuos de combustión y de diminutas gotas de agua, incluso cuando el aire no está saturado, lleva comúnmente a la captura de iones normales por uno de éstos núcleos de condensación, como se les denomina, de esta forma se da origen a otro tipo de iones de baja movilidad, del orden de 0.008 a 0.003 centímetros por segundo, éstos son denominados iones grandes o lentos.

Aproximadamente un tercio de los núcleos de condensación presentes en el aire son eléctricamente neutros, los otros dos tercios tienen casi en la misma proporción cargas positivas y negativas que adquieren al atrapar iones pequeños. La interacción entre los iones grandes, pequeños y los núcleos neutros es muy importante. Además de estos dos tipos principales de iones atmosféricos, un grupo de iones intermedios, cuya movilidad cae entre 0.2 y 0.01 centímetros por segundo, ha sido descubierto que aparece bajo condiciones meteorológicas especiales, tales como una humedad relativa baja. Se sabe además que algunos de éstos están asociados con moléculas de ácido sulfúrico de los procesos industriales.

Se ha descubierto que la gran mayoría de los iones, grandes y pequeños, transportan una sola carga elemental, ya sea positiva o negativa.

Sobre las áreas continentales los iones grandes superan considerablemente a los pequeños, comúnmente en una relación de diez a uno. Mientras que los números n^+ y n^- de los iones pequeños de cada signo por centímetro cúbico (cc) en el aire sobre tierra oscila entre 300 y 1000, aquellos de los iones grandes N^+ y N^- llega a ser de 1000 hasta 80 000 por cc. Debido a que prácticamente todos los iones grandes se forman cuando los núcleos de condensación capturan los iones pequeños, un incremento en el número de éstos núcleos, tal como ocurre en áreas industriales, incrementará la proporción de iones grandes en el aire a expensas de los iones pequeños.

Sobre los océanos esta proporción se invierte, el aire alejado de las zonas de tierra recibe muy pocos núcleos de condensación y los iones grandes son minoría. Los valores de n^+ y n^- en el mar llegan a 500 o 700 por cc, mientras que para N^+ y N^- son de alrededor de 200 por cc. En vista de su comparativa libertad de ser capturados por los núcleos, en primer instante sorprende que el número de iones pequeños por cc en medio del océano difiera muy poco de aquella sobre tierra, donde el valor promedio de n^+ y n^- es también de 600 por cc. Esto sin embargo se explica por el hecho de que la disminución en la tasa de desaparición de los iones pequeños está balanceada con una disminución en la tasa a la cual éstos se producen.

1.2.1 Agentes de ionización.

Tres agentes son los principales responsables de la ionización de la atmósfera baja; sustancias radiactivas en la superficie terrestre, efectos de naturaleza ionizante en el aire y los rayos cósmicos.

Para discutir la importancia de estos fenómenos, es conveniente usar el símbolo “q” para representar el número de “pares de iones producidos por cc por segundo”; una cantidad que hará referencia al poder de ionización de la radiación. La frase entre comillas comúnmente se representa por el símbolo “I”, de ésta forma, $q=4I$ significa que en el punto en cuestión la radiación crea cuatro pares de iones por cc por segundo.

Efectos de los materiales radiactivos en la superficie terrestre.

Uranio, torio y sus productos de degradación están ampliamente distribuidos en la corteza terrestre, cuyas capas más superficiales emiten rayos alfa, beta y gama hacia la atmósfera.

Debido a que los rayos alfa pueden emerger sólo de capas muy delgadas y pueden ionizar sólo algunos de los primeros centímetros del aire, sus efectos son despreciables. Los rayos beta pueden surgir de mayores profundidades y penetrar mayores extensiones dentro de la atmósfera. Mediciones realizadas para determinar la concentración de material radiactivo en la tierra indican que la ionización debida a estos rayos oscila de un valor I en la superficie hasta $0.1I$ a una altura de 10 metros.

Los rayos gama son el factor de más importancia ya que pueden surgir de mayores profundidades y consecuentemente de un número mayor de materiales radiactivos. Se estima que los rayos gama producen un promedio de $3I$ en la superficie, $1.5I$ a 150 metros sobre ella y de $0.3I$ a un kilómetro.

Los valores promedio de la energía de ionización de la radiación terrestre cerca de la superficie se han encontrado entre 2I a 10I, lo cual está acorde con las mediciones del contenido de material radiactivo de la corteza terrestre. Por supuesto que la superficie y condiciones geológicas tienen un efecto importante sobre este valor para un punto específico. Se ha descubierto que el contenido radiactivo del agua marina es muy pequeño en comparación al de tierra, de éste modo, sobre los océanos el efecto de la radiación por efectos del suelo es despreciable.

Efectos de naturaleza radiactiva en el aire.

La atmósfera contiene una cantidad considerable de emanaciones radiactivas; radón, torio y sus productos sucesivos. Un conductor cargado negativamente a un potencial de algunos cientos de volts expuesto al aire captura una cantidad fácilmente cuantificable de radio A y torio A, producto de la desintegración de dichas emanaciones.

Los gases que surgen del decaimiento del radio y torio dentro de la tierra escapan de ésta por difusión, convección térmica y como resultado de una disminución en la presión atmosférica. La mayor parte de la ionización que esto produce es debida a los rayos alfa de las mismas emanaciones y de sus productos A y C, ya que en este caso, a diferencia de la radiación debida a la tierra, no hay una capa absorbente entre el átomo en desintegración y el aire, además los gases radiactivos y sus productos son fácilmente distribuidos por las turbulencias atmosféricas en las capas bajas de la atmósfera.

Estudios realizados estiman los efectos de la radiación del aire en 2I en las proximidades de la superficie terrestre, de éste, alrededor del 55 por ciento se debe al radón y sus productos, el porcentaje restante se debe a la serie del torio. De nuevo, esto varía con la localidad y con las condiciones meteorológicas que determinan la tasa de escape de las emanaciones.

Además de los efectos de las fuertes ráfagas ascendentes de aire que elevan las capas superficiales, el nivel de emanaciones al aire disminuye rápidamente con la altura. Información directa sobre este punto es difícil de obtener, sin embargo la evidencia existente indica que el efecto de la radiación del aire cae a menos del 2 por ciento de su valor en la superficie a una altura de 5 kilómetros.

Al igual que en el caso de la radiación de la tierra, este efecto es muy pequeño sobre los océanos, donde las emanaciones son sólo de un uno por ciento del valor que se produce sobre tierra.

Efectos de los rayos cósmicos.

El tercer factor de ionización en la atmósfera es una radiación de particular interés cuyo origen y naturaleza son aún objeto de investigación.

Este factor tiene una energía de penetración considerablemente mayor que aquella de los rayos gama más fuertes de los cuerpos radiactivos, estos rayos viajan en sentido descendente hacia la superficie terrestre sufriendo una cierta cantidad de absorción en el camino. Su energía de ionización al nivel del mar, sobre tierra y en el océano, varía de 2I en latitudes geomagnéticas bajas hasta 1.5I cerca del ecuador magnético, el campo de la Tierra evita que las partículas ionizantes más lentas alcancen el cinturón ecuatorial.

La ionización debida a las radiaciones cósmicas (llamadas de ese modo ya que ahora se sabe que se originan fuera de la atmósfera terrestre y que están relacionadas con el Sol), aumenta rápidamente con la altura sobre el nivel del mar, creciendo hasta diez veces en los primeros cinco kilómetros, aunque los efectos en general están sujetos a considerables fluctuaciones con las condiciones locales.

Se debe mencionar que la tasa de producción de iones sobre tierra firme es cuatro veces mayor que sobre el mar, donde la ionización prácticamente en su totalidad se debe a la acción de los rayos cósmicos. Sobre tierra y cerca de su superficie estos rayos tienen poca importancia pero a mayores altitudes los efectos de las radiaciones de tierra y del aire disminuyen rápidamente, de tal forma que, de altitudes que van desde uno a dos kilómetros sobre la superficie, la radiación cósmica es la encargada de hacer del aire un medio conductor.

1.3 NUBES

Una nube es una acumulación de diminutas gotas de agua o partículas de hielo suspendidas en la atmósfera que forman una masa más o menos densa y de color variable de acuerdo a cómo recibe la luz solar.

Las nubes se forman cuando el aire cargado de vapor de agua se enfría al ascender, por contacto con otra capa de aire más frío. Las gotas que se forman al condensarse el vapor se asientan sobre partículas de polvo, sal marina, o residuos de humo suspendidos en la atmósfera, denominados núcleos de condensación.

El aspecto exterior de las nubes depende de la naturaleza, dimensiones y la distribución de los cristales de hielo o de las gotas de agua que se forman. Es posible señalar un número concreto de formas características de nubes que pueden reunirse en diferentes grupos, admitiendo también subdivisiones posteriores, sin embargo, las formas nubosas fundamentales son tres: cirros, cúmulos, y estratos; todos los tipos restantes corresponden a modificaciones o combinaciones de estos tipos a diferentes alturas, donde la variación de las condiciones del aire y humedad son responsables de las diversas formas que se presentan.

Cirros.

Este tipo comprende a todas las nubes que se presentan a gran altura, se constituyen por cristales de hielo, son tenues y delicadas, de estructura fibrosa y a menudo con aspecto de plumas y siempre de color blanco. Se forman a un nivel medio de 6000 metros.

Cúmulos.

Constituidos por gotas de agua que se pueden transformar en cristales de hielo a temperaturas inferiores a cero grados Celsius. Siempre se presentan como masas nubosas individuales, frecuentemente se desarrollan en forma de bóvedas o torres a partir de una base horizontal plana de bajo nivel, se forman entre los 6000 y 2000 metros, su estructura recuerda la de una coliflor.

Estratos.

Se forman a un nivel inferior a los 2000 metros. Se constituyen por gotas de agua que se convierten en cristales de hielo cuando la temperatura es muy baja. Este nombre implica una nube que se extiende en forma de capa, cubriendo todo o gran parte del cielo, constituye una capa nubosa continua en la que no cabe diferenciar la presencia de unidades nubosas individuales. Su base puede dar lugar a niebla, agujas de hielo o nieve granulada.

Si una forma nubosa fundamental, exceptuando los cirros, se presenta por encima de su nivel normal, la nube será tenue y el prefijo “alto” precederá a su denominación, cuando una nube vaya asociada de precipitación, a su nombre se le agregara la palabra “nimbos”.

1.4 MECANISMOS QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE CARGA EN LAS NUBES

Antes de que aparezca un rayo, cargas estáticas deben acumularse en las nubes. Esto sucede cuando el aire húmedo se eleva rápidamente, provocando violentas turbulencias, esto produce o libera un gran número de iones.

Las condiciones que favorecen tales corrientes de aire se desarrollan cuando el intenso calor en el suelo debido al Sol provoca grandes diferencias de temperatura entre las masas de aire superior (fría) e inferior (caliente).

Los rayos y las tormentas eléctricas ocurren principalmente en el verano debido a que es cuando la combinación necesaria de altas temperaturas y humedad ocurren con mayor frecuencia.

La diferencia de masas entre las partículas con carga positiva y negativa provoca que la carga negativa se acumule cerca del centro y en la parte baja de la nube, mientras que las cargas positivas permanecen en la parte superior de la misma.

Electrificación de las nubes.

Un mecanismo sugerido se basa en la captura de iones negativos del aire por parte de gotitas de agua o partículas de hielo que caen, el exceso de cargas positivas remanentes en el aire se absorbe por gotitas de agua y fragmentos de hielo más pequeños que permanecen en la parte superior de la nube. Para que este mecanismo funcione, los iones involucrados deben ser los iones grandes, cuya velocidad se calcula en 0.0003 cm/seg, la velocidad con la que estos se mueven, resulta mucho menor bajo la influencia del campo eléctrico que prevalece en la región.

Considérese una gota grande o partícula de hielo dentro de una nube en la cual existe un campo eléctrico dirigido verticalmente hacia abajo. Debido a este campo la gota tendrá una carga negativa inducida en la parte superior de su superficie y carga positiva en la parte inferior. En el caso de una partícula de hielo se ha demostrado que la polarización de un dieléctrico producirá una distribución de carga similar. Mientras éstas partículas más grandes se encuentran descendiendo, se encuentran con iones positivos que descienden a una menor velocidad y con iones negativos en ascenso, los encuentros con otras gotas o partículas de hielo se consideran relativamente raros, por otra parte, los encuentros de estas gotas con iones positivos y negativos serán diferentes; en la superficie inferior de la gota,

los iones negativos serán atraídos mientras que los positivos serán rechazados, los iones negativos que lleguen a estar dentro de una distancia adecuada serán capturados, lo que le da a la gota una carga neta negativa. La parte superior de la gota, con carga negativa en su superficie, no invierte este proceso, ya que este punto de la partícula se encuentra apartado del flujo de iones, además de que los iones positivos previamente han sido rechazados y apartados de la gota mientras cae.

Innumerables encuentros de éste tipo pueden provocar que la gota adquiera una considerable carga neta negativa sin que esto afecte en forma importante la posibilidad de capturas posteriores.

Las gotas y partículas de hielo y nieve más pequeñas tienen una velocidad de caída igual a la del flujo de iones mencionado, por lo tanto serán incapaces de realizar dicha acción selectiva. De este modo, estas partículas obtendrán una carga neta positiva que complementará la carga negativa acumulada por las partículas más grandes.

Cambios de estado.

Otra teoría sobre la formación de cargas eléctricas en la nube se apoya en que en sus primeras etapas de desarrollo, una nube del tipo cúmulo nimbo está formada casi por completo de gotitas de agua. Algunas de éstas en la parte de la nube por arriba del nivel de congelación permanecen sin cambiar de estado y sobreenfriadas.

Mientras que la cresta de la nube se eleva, una porción mayor de estas gotitas se convierten en partículas de hielo, ya sea en forma directa o bien por la acción de núcleos de sublimación especiales. La efectividad de estos procesos crece con la disminución de la temperatura, y por lo tanto, al aumentar la altura. Las partículas de hielo así formadas crecen rápidamente gracias a las gotitas sobreenfriadas que le rodean si la temperatura es baja. Mientras estas aumentan de tamaño, comienzan a caer a diferentes velocidades y en diferentes etapas, de este modo, la nube se halla formada por una mezcla de granizos duros y blandos, partículas de nieve, escarcha y gotas de agua. Todos estos hidrometeoros se encuentran en varias etapas de crecimiento o de desaparición, dependiendo de los niveles de temperatura en los cuales se elevan o caen y todos ellos se hallan constantemente chocando y fundiéndose unos con otros. Los cambios de estado, los choques y fusiones que esto significa, ofrecen una variedad de oportunidades para la generación de cargas eléctricas. Un buen número de mecanismos posibles para la generación de cargas han sido planteados basándose en tales características, cabe aclarar que se ha probado que varios de los mismos sólo son posibles bajo estrictas condiciones de laboratorio o bien, que su aportación total al sistema no es significativa. En general los mecanismos aceptados como medios para la electrificación de la nube están basados en el congelamiento de gotitas de agua sobreenfriadas, ya sea directamente por la altura o por contacto con partículas de hielo descendentes; si uno u otro es el responsable de la formación de un dipolo principal en la nube, entonces la aparición del rayo podría estar estrechamente relacionada con las primeras etapas de desarrollo de hielo en la nube. Evidencia experimental sugiere que la electrificación a gran escala, suficiente para producir un rayo, no ocurre hasta que las gotitas sobreenfriadas se han elevado hasta niveles en los cuales la temperatura oscila entre -28 y -40 grados Celsius; donde la formación de cristales de hielo puede ocurrir a escala apreciable.

1.5 FORMACIÓN DEL RAYO

Una tormenta es una perturbación de la atmósfera que incluye fenómenos eléctricos y lluvias. Los meteorólogos definen a una nube como una masa densa de partículas de agua o de hielo de un diámetro de 20 a 50 micrones, conformándose cada una de ellas sobre un núcleo de materia sólida. Es normal observar que el agua líquida pasa a estado sólido cuando la temperatura es igual o menor a cero grados Celsius, en las nubes, sin embargo, el agua permanece en estado líquido a temperaturas muy inferiores a su punto de solidificación, a esta se le denomina agua sobreenfriada.

De acuerdo a la temperatura, las nubes se conforman de la siguiente forma: por gotas de agua a -12 grados o más, por gotas de agua y cristales de hielo entre -12 y -30 grados, predominantemente por cristales de hielo entre -30 y -40 grados, y totalmente por cristales de hielo a temperaturas menores a -40 grados.

En sí, se distinguen varios tipos de nube, de los cuales sólo uno se carga de electricidad; el cúmulo nimbos.

Una única tormenta está constituida por células individuales por las que asciende el aire en una sucesión de porciones de aire a modo de burbujas. En el momento en que cada una asciende, transporta aire de las regiones subyacentes en una fase denominada etapa cumuliforme.

El aire levantado por una célula tormentosa puede alcanzar velocidades verticales superiores a los 60 kilómetros por hora. La precipitación se realiza en forma de lluvia en los niveles inferiores, mezcla de agua y nieve en los niveles medios y nieve en los altos. A medida que se aproxima a los niveles superiores, los cuales pueden situarse entre 6 y 12 km de altura, la velocidad de ascenso va disminuyendo, y la cima de la nube se conforma en la dirección del viento, adquiriendo una configuración característica de yunque.

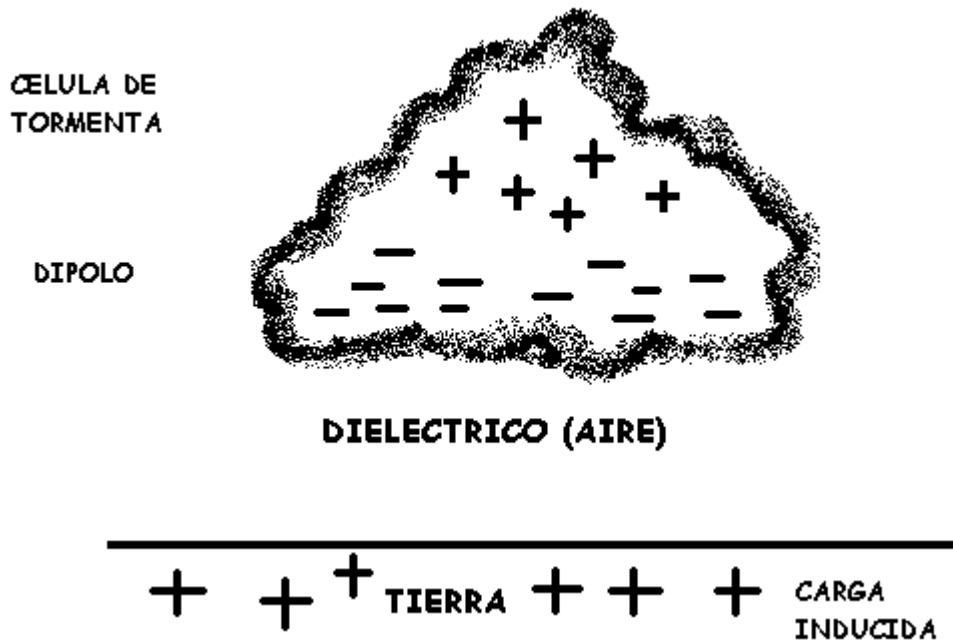
1.5.1 Células de tormenta.

Al comienzo, la corriente de aire vertical es producida por el aire caliente cargado de vapor de agua en el proceso convectivo y por la energía cinética con la que se desplazan las dos masas de aire que chocan en el proceso frontal.

En ambos casos, el aire caliente, cargado de vapor de agua se desplaza hacia arriba encontrando en su camino aire cada vez más frío, con lo que llega el momento en que este vapor se condensa dejando en libertad su calor latente de vaporización, imprimiéndole mayor poder de ascenso. Al ir encontrando capas aún más frías, las gotitas se congelan liberando nuevas cuotas de calor latente. Llega el momento en que todo el vapor de agua está en forma de diminutos granitos de hielo, al no haber más fuentes de calor el viento vertical cesa, y los granitos sin soporte comienzan su descenso en caída libre. El cúmulo nimbos ha alcanzado la máxima altura que es capaz.

Los granitos de hielo, microscópicos al principio, en su caída van encontrando otros granitos y más abajo también gotitas de agua que les hacen aumentar de tamaño y peso, pero también van encontrando vientos cada vez más fuertes al acercarse a la base de la nube, vientos cuyo empuje, al superar su energía cinética los impulsan nuevamente hacia arriba, siempre aumentando de tamaño por las partículas líquidas y sólidas que encuentran en este proceso que se repite muchas veces.

Las gotitas contenidas en la nube de tormenta no sólo aumentan de tamaño y peso sino que debido a fenómenos vinculados con la congelación, campo eléctrico terrestre y captación de iones, van adquiriendo carga eléctrica que va cambiando de signo a través de su viaje. Generalmente las gotitas en la base de la nube están cargadas negativamente y las de la parte superior positivamente, la célula de tormenta adquiere así, desde el punto de vista eléctrico el aspecto de un dipolo.



Cabe señalar que la célula de tormenta no es un fenómeno aislado, se produce en un entorno físico en el que los elementos más destacados son el terreno directamente debajo de la misma y la capa de aire entre las dos, que hace de elemento aislante. La carga inducida bajo la nube es la resultante de las producidas dentro de la misma, prevaleciendo el signo de las de la base por su menor distancia al suelo. La presencia de esta carga se suma al proceso de generación de electricidad (estática) dentro de la nube, ya que por inducción genera en ésta una carga igual cuyo signo contrario coincide con el de la carga ya existente y por lo tanto se suman.

Este proceso va aumentando la tensión de la base de la nube con respecto a tierra hasta valores increíbles, 100 a 1000 millones de volts, llegando al momento en que la rigidez dieléctrica del aire no soporta más la tensión y se inicia una chispa o descarga de uno de los extremos (nube o tierra) hacia el otro.

Si bien el aire tiene una menor rigidez dieléctrica a medida que se avanza desde tierra hacia la nube (de tal modo que la mayoría de los rayos se inician en la nube), sobre la tierra misma el mayor porcentaje de resistencia está dado por la capa de polución ambiental a unos 100 o 120 metros de altura, por lo tanto, para cualquier estructura que supere esta

altura comienza a adquirir gran relevancia la concentración del gradiente eléctrico en las puntas, y las chispas o descargas se inician sobre ellas con más frecuencia cuanto más elevada y más en forma de punta es.

Una vez iniciada la descarga, su camino hacia el otro polo no es continuo, sino que avanza por tramos a una velocidad aproximada a un tercio de la velocidad de la luz. En cada tramo buscará el camino más fácil, es decir, que va cambiando de dirección debido a que la ionización del aire no es uniforme y por lo mismo tampoco lo es su resistencia. En esta etapa, la descarga recibe el nombre de líder de pasos (stepped leader). El líder de pasos se acerca al polo opuesto al potencial del cual proviene en forma pausada, en secciones. La parte media del líder de pasos es un canal de no más de una pulgada de diámetro formado de aire completamente ionizado (plasma). El gradiente de potencial se va incrementando enormemente a medida que disminuye la distancia. Esta marcha prosigue hasta que el líder se acerca tanto que en algunos puntos, donde el gradiente es mayor, la rigidez dieléctrica del aire no lo soporta más y del suelo salta otra chispa (upward moving discharge, descarga ascendente) al encuentro del líder de pasos. El punto en el que ambas corrientes se encuentran recibe el nombre de punto de encuentro o distancia de atracción, en el momento en que esto ocurre se produce un corto circuito entre los cientos de millones de volts de la nube y tierra, con lo que se genera una intensa corriente en sentido inverso al del líder de pasos y recibe el nombre de corriente de retorno (current stroke o return stroke). Cuando la corriente de retorno llega a la nube con su carga de iones positivos se encuentra en una situación especial; se encuentra frente a un sistema eléctrico formado por una acumulación de gotas de hielo separadas entre sí por una capa de aire muy seco, dado que el vapor de agua se ha condensado por efecto de la baja temperatura. Se sabe que en estas condiciones el aire es muy buen aislante, por lo que la carga de la nube no se neutraliza completamente sino que se produce un chisporroteo hasta las gotas que se hallan a una distancia aproximada de 300 o 500 metros, cuyas cargas eléctricas únicamente son neutralizadas, esta neutralización hace decrecer la corriente hasta su extinción.

1.6 LA DESCARGA DEL RAYO

Tipos de descargas

Descarga de nube a tierra. Es el tipo de rayo más peligroso y destructivo, aunque no es el más común, es el que se comprende mejor.

La mayoría de estas descargas ocurren cerca del centro de carga inferior de la nube (negativo, N) y entrega carga negativa a tierra. Sin embargo, una apreciable minoría de estas descargas transportan carga positiva desde tierra. Estas descargas ocurren comúnmente durante la etapa de disipación de la tormenta, las descargas positivas son también más comunes durante los meses de invierno.

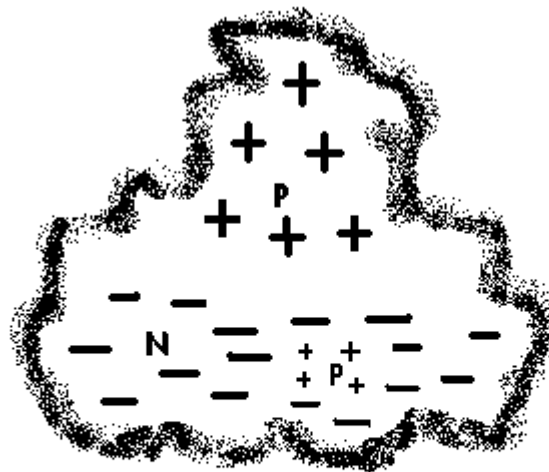
Descargas internas. Este es el tipo de descarga más común, se presenta entre los centros de carga opuestos de la misma nube. Este proceso ocurre dentro de la nube y desde el exterior se aprecia como un resplandor parpadeante dentro de la misma, sin embargo, algún destello puede salir de la nube formando un camino resplandeciente parecido al rayo de nube a tierra que puede extenderse varios kilómetros.

La relación entre descargas de nube a tierra e internas varía significativamente de tormenta a tormenta. Tormentas con un desarrollo vertical mayor pueden producir casi exclusivamente descargas internas. Algunas teorías señalan que las variaciones dependen de la latitud, con un mayor porcentaje de descargas de nube a tierra a mayores latitudes. Los detalles de por qué la descarga se mantiene dentro de la nube o se dirige a tierra aún no son comprendidos del todo, sin embargo la evidencia sugiere que la descarga se propaga en una u otra forma de acuerdo a la dirección que tenga el gradiente eléctrico más fuerte, de esta forma, se mantendrá dentro de la nube o bien hace contacto con tierra.

Descargas entre nubes. Como lo indica el nombre, se presentan entre los centros de carga de dos nubes diferentes, en este tipo de descarga el arco salta un espacio de aire libre entre ambas nubes.

Existen numerosos nombres y descripciones de varios tipos y formas de rayos, sin embargo no se hará mayor mención de ellos ya que algunos identifican subcategorías de los ya mencionados, mientras que otros son ilusiones ópticas o mitos.

La forma más frecuente de rayo es la descarga dentro de la nube, se sabe que la mayoría de estas descargas ocurre entre los centros de carga positiva y negativa (P y N) del dipolo principal formado en la nube, algunos de ellos tienen lugar entre la carga N de la parte inferior de la nube y alguna carga positiva inferior; ya sea una pequeña bolsa de carga positiva (p), (descarga N-p); o bien alguna acumulación de carga positiva en el aire debajo de la nube (descarga al aire). Un tipo similar de descarga puede ocurrir entre la carga P en la parte superior de la nube y carga negativa en el aire por arriba de la misma.



centros de carga en la nube

Las descargas a tierra remueven carga negativa de la región N de la nube, la evidencia indica que este tipo de descarga es disparada o iniciada por el fuerte campo eléctrico entre las cargas N y p de la nube o con un espacio de carga positiva en el aire, de este modo, una descarga N-p o al aire puede extenderse hasta tierra. El primer golpe o flujo (stroke) de esta descarga trae a tierra la carga negativa que queda después que la carga positiva, de menor magnitud, a sido neutralizada. Puede observarse que estas descargas, dentro de la nube o de nube a tierra parpadean, esto se debe a que la descarga está formada de un cierto número de componentes, golpes o descargas (strokes) individuales.

Aunque el rayo en su totalidad ocupa comúnmente más de un segundo, la luminosidad de los golpes individuales por lo general dura sólo algunos milisegundos.

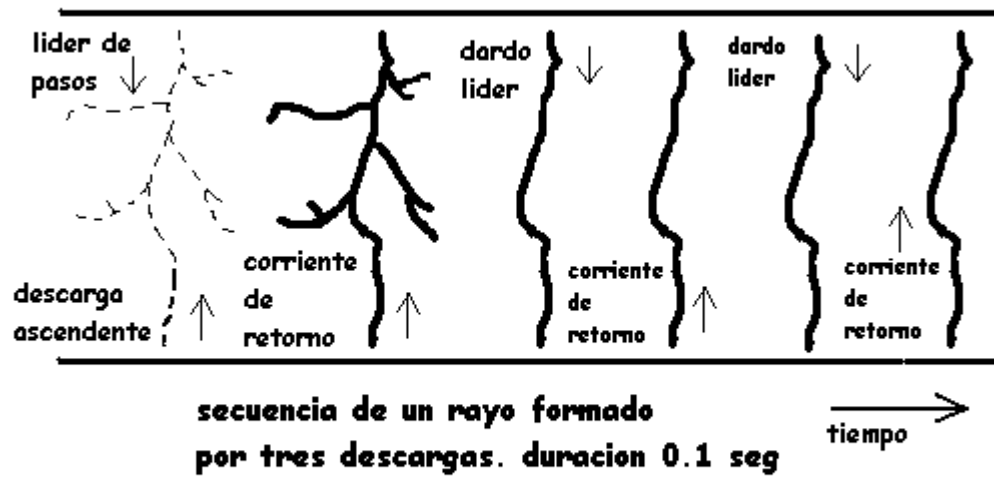
Después de cada descarga, la ionización a lo largo del canal formado, aunque reducida por la recombinación y difusión de iones y electrones, usualmente persiste el tiempo suficiente para proporcionar a la siguiente descarga un camino recién hecho que pueda seguir. Sin embargo, si el intervalo de tiempo entre un golpe y otro es muy largo la ionización del canal se debilita demasiado y el siguiente golpe puede, o deberá seguir un camino diferente. Es común que el canal sea arrastrado por el viento varios metros en los intervalos entre golpes, de este modo, puede también observarse la naturaleza discontinua del rayo al adquirir éste una forma ondulada.

El número de descargas que componen un rayo es variable, el número máximo contado para un rayo es de 42, aunque pueden llegar a ser más, el número más frecuente es de 3 o 4 y las descargas de un solo golpe también son comunes. El intervalo de tiempo entre descargas también varía, aunque los valores más frecuentes se encuentran entre 0.03 y 0.07 segundos (30 y 70 milisegundos).

Se ha encontrado que cada una de las descargas que forman un rayo a tierra tiene o es de una naturaleza dual. Un proceso con un movimiento descendente, el líder de pasos, en cuanto se aproxima a la superficie de la tierra es seguido por otra corriente mucho más rápida y de gran intensidad luminosa, la corriente de retorno, que recorre el canal del rayo en dirección contraria. El líder del primer golpe es de naturaleza distinta al líder de las descargas siguientes, le toma alrededor de 10 veces más tiempo alcanzar el suelo, y su luminosidad es tenue e intermitente en lugar de ser continua.

La siguiente figura ilustra lo anterior para el caso de una descarga formada por tres golpes. La figura indica que el líder del primer golpe procede en una serie de pasos, cada uno de éstos es de alrededor de 50 metros de largo, aunque varían entre 10 y 200 metros, con ligeras pausas regulares (30 a 90 microsegundos) entre pasos. Después de cada pausa hay casi siempre una dirección nueva para viajar, estos cambios de dirección son los responsables de la tortuosa forma del rayo. Las ramificaciones del líder, las cuales usualmente se hallan únicamente en la primer descarga, también están formadas en pasos, y se extienden en forma descendente a partir del canal principal. Cada paso es la punta de una corriente larga que se estira desde la nube, y cuya base se halla débilmente iluminada.

Cuando el brazo más adelantado del líder de pasos se aproxima a unos 150 o 50 metros del suelo (pueden llegar a ser 15 metros), la corriente de retorno salta desde el suelo cubriendo dicha distancia y pasa rápidamente de tierra hacia la nube recorriendo cada ramificación. A éste proceso le toma microsegundos recorrer el canal original que fue creado por el líder de pasos en milisegundos.



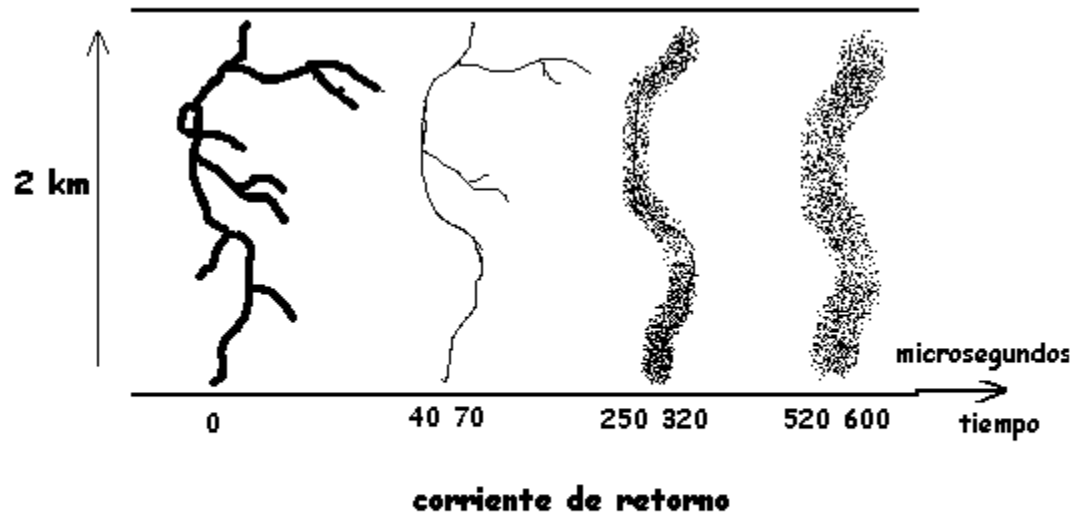
El líder de pasos es de dos tipos, tipo alfa y tipo beta. En el líder de pasos tipo alfa los pasos son cortos y es difícil fotografiarlos ya que no son muy brillantes. En el líder tipo beta, la parte superior del canal está formada por pasos más largos y brillantes que en la parte inferior, la cual está formada por pasos del tipo alfa muy débiles. Esta diferencia está asociada con el gran número de ramificaciones que ocurren en la parte superior del canal. Esto sugiere la presencia de un fuerte campo eléctrico debido a una acumulación de carga positiva en el aire por debajo de la nube, al inicio del camino trazado por el líder. Estudios hechos sobre dicho campo eléctrico muestran que sólo el 10 por ciento de los líderes son del tipo beta, sin embargo, este tipo de líder es en realidad el más frecuente, la etapa beta del líder está por lo común oculta dentro de la nube. Se supone que el fuerte campo eléctrico necesario para producirlo se encuentra entre las regiones de carga N y p de la nube.

En el caso de los golpes que siguen al primero, el líder no es pausado sino que viaja en forma de continua hasta el suelo, lo hace como una línea continua seguida de una tenue iluminación. Esto indica que el líder toma la forma de una jabalina o dardo con una punta brillante de alrededor de 40 metros de largo y un largo tallo o cuerpo débilmente iluminado que se extiende hasta la nube. Esta etapa o fase es denominada el dardo líder (dart leader). La única excepción a este movimiento continuo ocurre cuando un intervalo de tiempo inusualmente largo ocurre después que la descarga precedente a terminado. En tal caso, el dardo líder es mucho más lento, muestra una progresión pausada en parte de su recorrido y puede seguir un camino diferente al de sus predecesores.

La siguiente figura muestra un típico primer golpe de la corriente de retorno. Esta corriente recorre una distancia aproximada de 2 kilómetros en 60 microsegundos. Se muestra también que se continúa removiendo carga de la nube durante más de 600 microsegundos. El brillo y velocidad de la corriente disminuye mientras asciende, sin embargo es renovada súbitamente al alcanzar cada una de las ramificaciones que aparecieron a lo largo del canal principal. Lo anterior indica que cada rama hace un llamado por un flujo fresco de corriente desde tierra, lo que provoca que en la base del canal del rayo la corriente presente violentas fluctuaciones. Similares fluctuaciones son producidas por procesos que permanecen ocultos dentro de la nube.

La velocidad promedio de los tres procesos descritos, el dardo, las corrientes de retorno y de pasos, son de 2000, 20 000 y 10 000 kilómetros por segundo (km/seg) respectivamente. Aunque los pasos individuales son empujados hacia delante a velocidades superiores a los 10 000 km/seg, la corriente de pasos (step streamer), en su totalidad es lenta debido a sus numerosas pausas; su velocidad efectiva raramente supera los 300 km/seg y puede llegar a ser hasta de 100 km/seg.

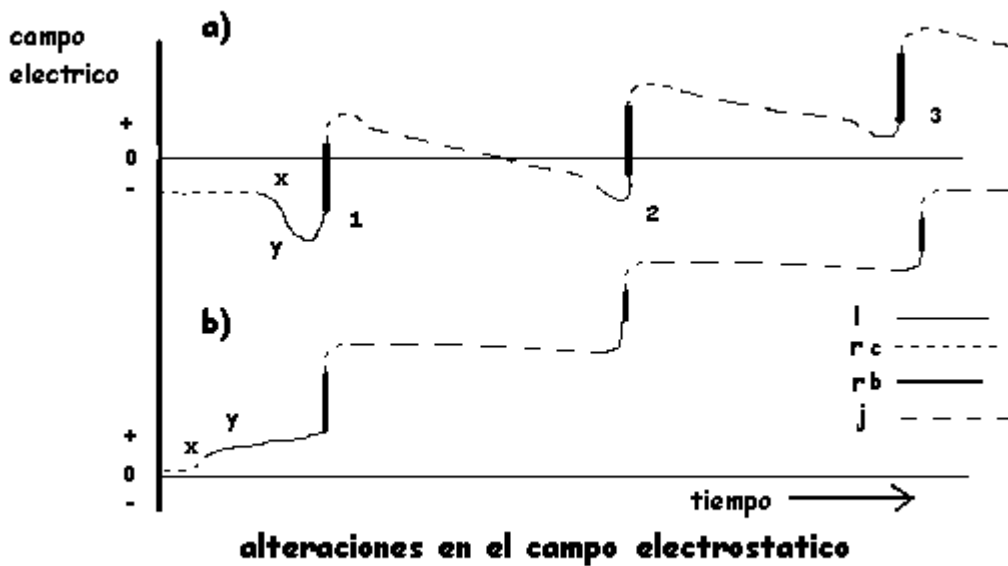
En el caso de estructuras muy elevadas, como por ejemplo el edificio Empire State (381m o 1250 pies) se ha observado que la descarga de un rayo frecuentemente comienza con un líder de paso con dirección ascendente que viaja del suelo hacia la nube y no es seguido por un proceso de retorno, la corriente continúa fluyendo durante algún tiempo en el canal así formado, después de lo cual un dardo descendente normal, seguido por una corriente de retorno ascendente crean las descargas segunda y posteriores.



1.6.1 Alteraciones electrostáticas asociadas al rayo

En la siguiente figura, la parte superior (a), muestra la forma general de los disturbios ocurridos en el campo electrostático por un rayo a tierra formado por tres descargas, cuando éste ocurre cerca de los equipos de medición (3 a 5 km). La parte inferior (b) muestra los mismos cambios cuando el rayo ocurre a mayor distancia (12 a 20 km).

La parte **l** de la figura corresponde al movimiento descendente del líder, mientras que las porciones **r**, **r^b** y **r^c** corresponden a la corriente de retorno. La parte restante, **j**, está ligada a procesos que ocurren dentro de la nube y que no pueden ser observados.



De la figura pueden obtenerse algunas conclusiones:

Efectos producidos por el líder, **l**.

Se puede observar en la figura que esta etapa produce cambios en el campo electrostático que asemejan a un gancho, con polaridad negativa, cuando el rayo ocurre en las proximidades, y a una parábola si se encuentra a distancia. La figura a) indica que el líder trae a tierra cargas negativas. El líder de la primera descarga presenta alteraciones en el campo que tienen una pendiente mayor en la sección inicial xy que en etapas posteriores, esto se debe a que esta etapa es un líder tipo beta, el cual transporta carga más rápido en sus inicios que en su fase final. Tal como indica la figura, el dardo líder de las descargas subsecuentes ocupa menos tiempo que el líder de pasos, sin embargo provoca cambios similares en el campo electrostático atmosférico.

Es importante señalar que los efectos del líder sobre el campo por lo común tienen una duración mucho mayor que la del mismo proceso del líder, esto sugiere que una porción considerable del canal, algunas veces de la misma magnitud que el canal visible bajo la nube está oculto dentro de la misma y que la carga N que da origen al líder alcanza alturas considerables.

Efectos provocados por la corriente de retorno, r_b y r_c .

Debido a que esto conlleva el traslado a tierra de la carga negativa en el líder (r_b) y el remanente en la nube (r_c), sus efectos sobre el campo son positivos en toda distancia. Los rápidos cambios de r_b ocupan un tiempo aproximado de 50 microsegundos y tienen una estructura complicada que no se muestra en la figura. Los efectos de r_c , mucho más lentos, ocupan uno o dos milisegundos y se considera que se deben no sólo a la limpieza final de la carga remanente en la región que produjo al líder sino también a un flujo ascendente de carga positiva inducida en la punta del canal por regiones N dentro de la nube que aún no han sido explotadas por la descarga.

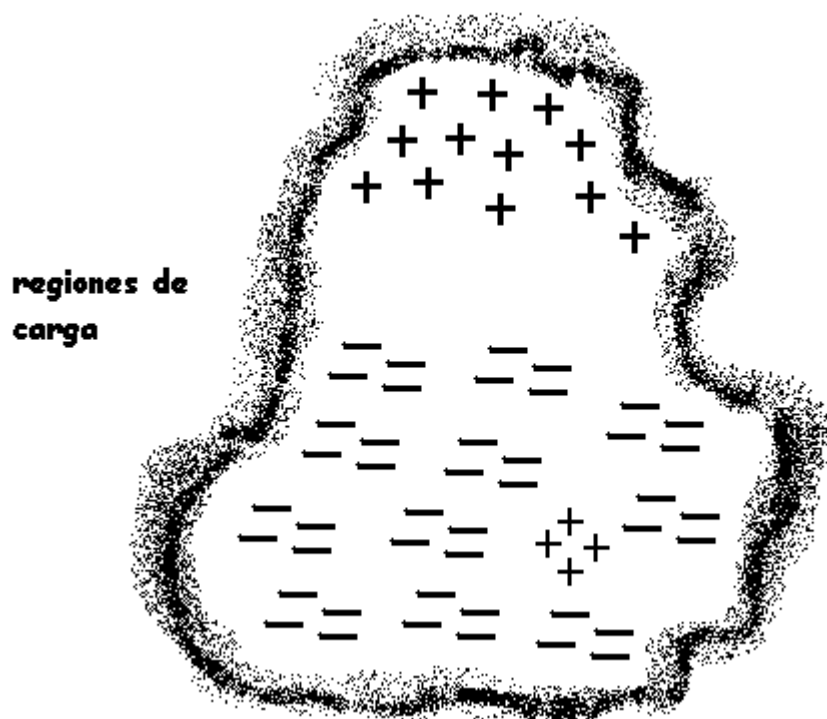
Efectos de los procesos internos, j .

Estos efectos sobre el campo ocurren en los intervalos de tiempo entre descargas. Debido a que dichos efectos muestran una polaridad negativa cuando el rayo tiene lugar cerca del equipo de medición y positiva con la distancia, estos deben ser creados por lentos movimientos de carga dentro de la nube en los que las cargas positiva y negativa cambian de lugar. Cierta evidencia indica que en la mayoría de los casos estos efectos se deben al movimiento ascendente de corrientes positivas de la parte superior del canal hacia nuevas regiones de carga negativa con las cuales pueda establecerse conducción.

Mecanismos responsables de las descargas sucesivas.

Observaciones realizadas llevan a la conclusión de que cada descarga o golpe (stroke) de un rayo a tierra proviene de una región N diferente, cada una a mayor altura que su predecesora. De lo anterior se deduce que las regiones N que provocan que un rayo se componga de un diferente número de descargas no están distribuidas al azar dentro de la nube, sino que conforman una columna de forma casi vertical que se extiende alcanzando grandes alturas, esto permite que la nube se descargue en forma intermitente. Así, un rayo a tierra que muestre varias descargas puede provenir de una columna de regiones de carga de 6 km de altura o más.

Las mismas observaciones muestran que las pausas entre golpes representan el tiempo que se requiere para que ciertas “corrientes de contacto” asciendan y establezcan una conexión entre el canal y la siguiente región de carga de la columna, para que aquella se descargue por el canal en la forma de un nuevo dardo líder (dart leader).



Descargas positivas.

Los rayos positivos de nube a tierra son menos comunes que las descargas negativas, tienen su origen a mayor altura dentro de la nube, y en promedio tienen una ocurrencia del 10 por ciento del total de descargas a tierra. Comúnmente se componen de una sola descarga y transportan una mayor corriente. El porcentaje de rayos positivos parece incrementarse con la latitud y con la altura local del terreno, también, son más comunes en las tormentas de invierno. La causa aparente de esto es que el nivel de congelación menor coloca el centro de carga positiva a una altura más baja, más cerca de tierra, con lo cual crece la probabilidad de que surja el rayo. Los rayos positivos son más comunes en las nubes estratiformes, mientras que los negativos tienden a ser más comunes en áreas de fuerte convección (vientos ascendentes). También, aquellas tormentas que consisten predominantemente de rayos negativos en sus primeras etapas, comúnmente terminan con descargas positivas mientras la tormenta madura y llega a su etapa final.

Aunque varios estudios se han enfocado en los rayos positivos, los resultados no son concluyentes debido al escaso número de observaciones.

1.7 PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN A LAS DESCARGAS AMOSFÉRICAS

Densidad de rayos a tierra.

La importancia de un estudio estadístico de los rayos radica en poder presentar un modelo probabilístico de sus efectos y de ese modo establecer el factor de riesgo de que una estructura sea golpeada por un rayo, así como la gravedad de los daños directos e indirectos que puede sufrir.

El nivel cerámico de una región se define como el número de días por año en los cuales por lo menos es escuchado un trueno. El nivel cerámico, a pesar de su austera definición permite evaluar la severidad de las tormentas en una región. Este parámetro cambia con la posición geográfica y las condiciones naturales a lo largo de un territorio. La distribución espacio – temporal del nivel cerámico se presenta en los llamados mapas de nivel cerámico.

En lugares como Francia, por ejemplo, el nivel cerámico es de 20 en promedio, oscilando entre valores mayores a 30 en zonas montañosas y menores a 10 en la costa. Por otra parte, algunas regiones de México presentan promedios que varían entre 80 y 100 en el sureste y litoral del golfo, y entre 20 y 40 para el resto del país.

Un parámetro más representativo de los riesgos asociados con los rayos a tierra es la densidad de rayos a tierra, ésta se expresa como el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado al año.

Este es un parámetro complementario al nivel cerámico que permite cuantificar la incidencia de rayos en una zona determinada.

Durante décadas y en diferentes lugares del mundo se han realizado investigaciones sobre densidad de rayos a tierra mediante la instalación de equipos para la medición de sus parámetros. Del mismo modo se han establecido relaciones empíricas de mayor o menor complejidad entre la densidad de rayos a tierra, el nivel cerámico y las características meteorológicas locales. En el ámbito internacional se han propuesto algunas relaciones empíricas, sin embargo, el nivel de correlación entre estas dos variables parece ser muy bajo y aparenta depender en gran medida de la fenomenología de la tormenta.

Como ejemplo, las relaciones entre el nivel cerámico y la densidad de rayos fue investigada de acuerdo con un sistema de localización en Austria. Se determinó el nivel cerámico a partir de los datos obtenidos por dicho sistema considerando que se había tenido un día tormentoso al detectar al menos un rayo a tierra en un radio de 8 km de la estación de medición. Los siguientes resultados muestran la comparación entre una región montañosa y una planicie. Tabla 1.

region	nivel ceramico	densidad de acuerdo a CIGRE $d=0.04K^{1.25}$	densidad obtenida con el sistema de localizacion
montaña	45	4.66	1.0
planicie	30	2.8	3.8

d: densidad de rayos a tierra de la zona
K: nivel ceramico

tabla 1

El ejemplo anterior revela que se debe tener cuidado cuando se utilice el nivel cerámico para caracterizar la severidad de las tormentas en una región. De hecho, sería un error terrible fundamentar una política de protección para una estructura sólo en el nivel cerámico de la región.

En conclusión, es necesario el trazado de mapas que muestren la densidad de rayos a tierra suficientemente detallados, que consideren la mayor cantidad posible de las variaciones geográficas locales, del mismo modo, estos mapas deben elaborarse con información obtenida durante varios años para considerar las variaciones debidas a las estaciones y variaciones anuales.

Cabe resaltar que estos mapas por sí mismos no representan una garantía en términos de protección, las características electromagnéticas ligadas a los rayos son también de gran relevancia.

Características eléctricas de los rayos a tierra.

El uso estadístico de los registros de mediciones directas de rayos a tierra ha permitido calcular densidades de probabilidad referentes a sus diferentes características.

En términos generales se ha llegado a las siguientes conclusiones:

El 90 % de las descargas de nube a tierra tienen polaridad negativa.

Los rayos negativos por la general se constituyen de más de una descarga, a excepción de aquellos eventos que ocurren en invierno, los cuales presentan casi exclusivamente una sola descarga. Para rayos con polaridad negativa lo común son 3 o 4 descargas, aunque dependiendo de la carga de la nube pueden ser más de 40.

Las descargas positivas generalmente ocurren en descargas únicas y tienen lugar principalmente en invierno.

Los parámetros característicos para los cuales se han establecido leyes de densidad probabilística son:

Valor pico de la corriente I_{max} , [kA]

Tiempos inicial y final del frente de onda t_f , t_q

Pendiente del frente de onda de corriente di/dt

Carga Q

Energía específica $\int i^2 dt$ [$J \cdot \Omega^{-1}$]

Número de descargas sucesivas

Intervalo de tiempo entre golpes sucesivos Δt (ms)

Para tener idea del orden de algunas de estas magnitudes la tabla 2 proporciona los principales valores adoptados por CIGRE en materia de coordinación de aislamientos.

t_f/t_q (μs)	$I_{max}(kA)$	Q(C)	$\int i^2 dt$ ($J \cdot \Omega^{-1}$)	Δt (ms)
24.3	31.1	4.65	5.7×10^4	35

t_f/t_q duración de la onda del rayo

tabla 2

$\int i^2 dt$ energía específica

Δt tiempo entre descargas sucesivas

Valor máximo de la corriente de rayo.

Los dos principales parámetros de interés de una descarga de retorno (return stroke) son el valor máximo de la corriente de rayo, también llamado corriente pico, y la máxima tasa de ascenso de la corriente de rayo (current maximum rate of rise). El valor máximo de la corriente de rayo, dado en kiloamperes (kA), es importante para el cálculo de dos valores importantes en el diseño de la protección contra rayos: uno, la caída de tensión en volts cuando el rayo impacta en la resistencia de puesta a tierra, y el otro, la distancia de impacto del rayo a la estructura.

Máxima tasa de ascenso de la corriente de rayo.

El valor di/dt se utiliza para el cálculo de tensiones inducidas que se presentan en los lazos metálicos abiertos y cerrados en cualquier instalación y que son los causantes de daños en equipos electrónicos.

Cuadrado de la corriente de impulso del rayo.

El valor del cuadrado de la corriente de impulso del rayo, se utiliza para el cálculo del calentamiento y de los esfuerzos electromecánicos producidos al circular la corriente del rayo por conductores metálicos.

CAPÍTULO 2 EFFECTOS DE LOS RAYOS EN ESTRUCTURAS E INSTALACIONES

El momento para prever los posibles efectos de los rayos sobre una estructura o instalación, o un bien en particular, es durante la etapa de diseño.

Un plan de mitigación de los efectos de los rayos debe surgir de un análisis de riesgo, y posteriormente, un programa de verificación y prueba podrá otorgar la certificación de que los medios de protección funcionaran de la forma en que fueron diseñados.

Frecuentemente, y por desgracia, el problema de los rayos no es considerado durante la etapa de diseño, sin embargo es de vital importancia considerar y analizar los efectos que los rayos pueden producir durante la operación de un sistema para hacer las modificaciones o tomar las medidas necesarias para la protección contra dichos efectos.

En los siguientes párrafos se mencionaran algunos de los efectos que puede provocar un rayo; dada su variedad, se les divide en cuatro áreas.

1 Efectos directos. Estos son provocados por la transferencia de corriente por contacto directo.

1.1 Calentamiento óhmico. Daño térmico.

Cuando un pulso de corriente de rayo cuyo valor instantáneo es un valor i , fluye a través de un conductor de resistencia R , el calor generado por la totalidad del pulso es $R \int i^2 dt$ (J) la cantidad $\int i^2 dt$ es llamada la acción integral del pulso y se mide en joules por ohm. Prácticamente la totalidad de ese calor se ocupa en incrementar la temperatura, debido a la corta duración del pulso, no puede fluir hacia los alrededores una parte significativa del calor. De este modo, el incremento de temperatura es proporcional a la resistencia del conductor multiplicada por la acción integral del pulso, por lo tanto, las partes de la instalación o estructura que puedan transportar la corriente de rayo deben diseñarse con una sección transversal de área suficiente para mantener el incremento de temperatura por debajo de un valor crítico tal como el punto de ignición o de fusión del material, el diseño debe también considerar que la rápida variación del pulso de corriente del rayo tiende a concentrarse en la superficie del conductor (efecto Kelvin o comúnmente y mal llamado, piel), por lo tanto, la máxima temperatura alcanzada en la superficie del conductor es mayor de lo que sería si la corriente estuviera distribuida uniformemente en toda la sección transversal.

1.2 Calentamiento óhmico. Fuerzas mecánicas disruptivas.

Cuando un conductor de sección transversal pequeña transporta la corriente de rayo, es forzado a llevar parte substancial de la misma, y es probable que llegue a fundirse en forma explosiva, especialmente si se encuentra situado en un lugar reducido. La literatura describe el daño estructural en términos de equivalencia en toneladas de TNT (Golde, 1975), para presiones en el canal del rayo superiores a las diez atmósferas. Humedad atrapada en un panel dieléctrico, fibra de vidrio o compuestos de fibra de carbón, o en construcciones de piedra o ladrillo, puede vaporizarse tan pronto como ocurra la formación del vapor. Arqueo, chispas o rompimiento dieléctrico pueden también tener un efecto similar.

1.3 Daños por canal del arco. Punto de contacto.

En el punto de contacto (canal del arco), en la superficie de la instalación o estructura, la corriente está confinada a un área pequeña, produciendo así altas temperaturas, lo que produce un punto caliente temporal. Dependiendo del grosor, del material de dicha superficie y la magnitud y duración de la corriente podría ocurrir un incendio. El voltaje de arqueo se mantiene casi siempre constante, de tal modo que para una superficie de

metal el calor generado es muy cercano a $\int V i dt$ joules, esto es; proporcional a la carga en el pulso del rayo. Si la superficie de contacto en la instalación es de alta resistividad como en el caso de los compuestos de fibra de carbón, pueden presentarse varias condiciones, debido a que la resistencia puede ser más de 1000 veces superior a

la del metal, el calor óhmico $\int R i^2 dt$ adquiere mayor importancia, el calor debido al arco es también mayor debido a que el voltaje de flameo es mayor por el contenido de carbón.

Las condiciones son también diferentes debido a las propiedades de estos materiales, por ejemplo, la conductividad eléctrica y térmica así como el coeficiente de expansión térmica, son diferentes en las direcciones longitudinal y transversal de las fibras de tales compuestos. El daño producido por el canal del arco en estos elementos comúnmente se manifiesta por los penachos de fibras que se producen por la vaporización de resinas y la separación de placas debida a los esfuerzos entre láminas por la diferente expansión.

Para materiales dieléctricos no hay contacto de arco, pero pueden aparecer perforaciones a causa del alto voltaje de ruptura. Si los parámetros del arco son insuficientes para fundir la superficie metálica o provocar la combustión de los paneles de compuestos de carbono, aún pueden formarse puntos calientes bajo la superficie de los mismos, lo cual puede representar un peligro de incendio si dicha superficie encierra sustancias volátiles (combustibles de aviación, explosivos sólidos y líquidos, etc.) y si su temperatura de ignición se aproxima a la de flameo o de fusión de la superficie. Por ejemplo, el aluminio se funde a 660 grados Celsius, la ignición de los compuestos de fibras de carbono es alrededor de los 880 grados C, el titanio se funde a 1800 grados C, mientras que la temperatura de autoencendido del combustible de aviación es de 230 grados C.

1.4 Onda de choque acústica.

Al principio de la primer descarga de corriente de gran magnitud, hay un rápido estrechamiento en el canal del arco debido al incremento del campo magnético, lo que produce una onda de choque acústica que puede provocar hendiduras o fracturas en superficies metálicas. En el punto de contacto existen fuerzas acústicas más locales; y éstas; combinadas con las fuerzas magnéticas presentes pueden incrementar los daños térmicos. La severidad de los esfuerzos acústicos depende de la magnitud de la corriente y de la tasa de ascenso de la misma, di/dt.

1.5 Presión y fuerza magnética.

Un conductor aislado que conduce una corriente sufre un estrechamiento radial interno, cuando la corriente sea de una magnitud suficiente para producir una gran intensidad magnética en la superficie pueden ocurrir severas distorsiones mecánicas. Por ejemplo, un conductor de 5 mm de diámetro que conduce una corriente de 200 kA puede experimentar una presión de hasta 1000 atmósferas, (una atmósfera corresponde a 1033.6 gm/cm²), la presión es proporcional al cuadrado de la corriente e inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del conductor. Este efecto puede ser muy importante en conductores cuyo propósito es proteger una estructura conduciendo la corriente de rayo.

La fuerza magnética produce también un incremento de temperatura, pero este es comúnmente muy pequeño comparado con el calentamiento óhmico debido al flujo de la corriente, asimismo, la presión puede ser suficiente para forzar al material más allá de su punto de rendimiento, el cual sufrirá una reducción debido al aumento de temperatura que se produce por el paso de la corriente, también, debido a estos efectos se acelera el proceso de ignición por su tendencia a expeler las capas de superficie térmicamente debilitadas.

Además de la presión magnética sobre un conductor aislado, existe la interacción de fuerzas entre dos conductores adyacentes que transportan una corriente. La fuerza es proporcional al producto de las corrientes e inversamente proporcional a la distancia entre conductores. Un segundo conductor adyacente puede ser un canal de arco por sí mismo, de tal modo que la corriente en la instalación o estructura puede producir una fuerza reactiva con la corriente en el canal de rayo cercano. Cuando la misma corriente fluye en ambos conductores, la fuerza instantánea es proporcional al cuadrado de la corriente, pero el efecto final en términos de esfuerzo o movimiento es una complicada función de la forma de onda de la corriente, magnitud y duración de la misma, y de las características de respuesta mecánica de los conductores así como de sus soportes de montaje.

1.6 Chispas.

El chisporroteo por tensión o por efecto térmico puede ocurrir en conjunto o por separado. Las chispas por tensión son el resultado de la ruptura de la rigidez dieléctrica, incluyendo el brillo o destellos a lo largo de una superficie o medio no conductor, pueden surgir inductivamente de un conductor en lazo o bucle, o en una vuelta o codo del mismo, o bien de la caída de potencial en un material altamente resistivo, especialmente en las uniones. Las chispas por efecto térmico principalmente consisten en fragmentos ardiendo de material fundido que se desprende de los puntos calientes tales como uniones o contactos de gran resistencia con una gran concentración de corriente o cambios agudos en la geometría.

La temperatura de ambos tipos de chispas es muy elevada y son fuentes potenciales de fuego o explosión. El encendido o combustión de una chispa depende en gran medida de su contenido total de energía y del tiempo durante el cual la energía se deposita. Es difícil medir el encendido de las chispas, sin embargo, es prudente considerar como un peligro potencial a cualquiera de éstas que pudiera ocurrir en una zona vulnerable de la instalación.

1.7 Arcos explosivos y choque hidráulico.

Un arco de corriente formado en un espacio cerrado puede producir una onda de choque debida al rápido calentamiento del aire. Dichos arcos, y especialmente los de gran longitud pueden ser muy perjudiciales; se ha sabido de casos en los que han producido fracturas en estructuras de gran tamaño y en roca sólida. Cuando un arco explosivo ocurre en un fluido dentro de un tanque, el fluido tiende a concentrar y enfocar el choque a tal punto que puede producir fracturas y daños estructurales en el tanque así como en sus miembros de soporte.

2 Efectos indirectos de campo cercano.

2.1 Transitorios debidos a la corriente del rayo.

Esencialmente un pulso de corriente del rayo que fluye a través de una instalación o en sus cercanías (aproximadamente 100 m), induce una tensión en las estructuras metálicas. La consecuente corriente que fluirá depende de la impedancia del circuito. La forma de onda de la tensión inducida comúnmente es muy compleja, pero usualmente consiste de una o más de las siguientes componentes:

- a) Una tensión proporcional a la corriente del rayo debida al acoplamiento resistivo (por ejemplo el gradiente de potencial en la superficie interna de una cubierta metálica), o a acoplamiento inductivo donde el flujo magnético se difunde a lo largo de un objeto de gran resistividad.
- b) Una tensión proporcional a la tasa de cambio de la corriente del rayo (di/dt); debida al acoplamiento directo con el campo magnético que ha penetrado a través de aberturas (algunas veces nombrado como flujo de abertura o rápido, aperture flux or fast flux). La tensión pico será entonces proporcional al valor máximo de di/dt , esto es, la mayor pendiente del frente de levantamiento del pulso de la corriente del rayo.
- c) Oscilaciones senoidales amortiguadas de alta frecuencia, en el rango de 2 a 50 Mhz. Estas son oscilaciones que corresponden a la resonancia natural de las estructuras y de sus subsistemas eléctricos, la frecuencia y amortiguamiento de las oscilaciones (pero no su amplitud), son independientes de la forma del pulso del rayo.

2.2 Transitorios debidos al campo eléctrico.

Cuando el canal de un rayo entra en contacto con un cuerpo cualquiera, (sin importar que dicho cuerpo esté unido o aislado de tierra), o pasa cerca del mismo, provoca que el cuerpo experimente un campo eléctrico de gran intensidad así como una rápida tasa de variación del mismo. Esto en adición al gran campo eléctrico estático presente bajo condiciones de tormenta. La tasa de cambio del campo eléctrico puede ser mayor a 130 V/m por segundo. Cuando un campo eléctrico variante termina en un conductor, la corriente de desplazamiento (capacitiva) del campo entra al conductor, por ejemplo, una tasa de cambio del campo de 130 V/m por segundo corresponde aproximadamente a una densidad de corriente de 88 A/m².

De este modo, conductores tales como el blindaje trenzado de algunos cables, o cables sin blindaje en zonas expuestas al campo eléctrico conducirán un flujo de corriente transitoria de magnitud significativa.

Además de la corriente proporcional a la variación de campo eléctrico, están las oscilaciones senoidales amortiguadas que son excitadas por la repentina aplicación o aparición de los disturbios mencionados anteriormente en 2.1 C).

Para una descarga de nube a tierra existen de hecho dos tipos de esta clase de excitación, una, en el instante en que el líder hace contacto, y otra un momento después, en el instante en que el campo eléctrico se colapsa debido a la aparición de la corriente de retorno. Magnitudes elevadas de campo, mayores a 2 kV, pueden dar origen a descargas del tipo corona en bordes afilados o salientes de las estructuras, lo que produce emisiones de radiofrecuencia.

Aunque no forma parte propiamente del rayo, debe señalarse que las superficies dieléctricas pueden acumular cargas electrostáticas, las cuales pueden alcanzar magnitudes suficientes para producir descargas locales que pueden perforar aislamientos delgados o, lo que ocurre con mayor frecuencia, producir una descarga hacia un conductor adyacente, lo que da origen a emisiones de radiofrecuencia.

2.3 Chispas y ruptura dieléctrica.

Las tensiones inducidas pueden provocar el rompimiento de los aislantes en cableados, conectores y en componentes eléctricos e incluso de la rigidez dieléctrica del aire, esto puede producir chispas que constituyen un peligro cuando ocurren en presencia de sustancias volátiles. Dependiendo de la resistencia a tierra en varias partes de la estructura, pueden aparecer tensiones muy elevadas, con el consecuente riesgo de ruptura de los aislamientos en líneas de transmisión de datos y en sensores apartados del lugar o centro de procesamiento de datos. Estos efectos sin embargo, pueden evitarse si los conductores de transmisión de datos así como las líneas de energía son protegidos adecuadamente, (protección interna contra rayos).

3 Efectos indirectos de campo lejano.

Estos son los efectos que aparecen cuando la estructura o instalación actúa como antena receptora ubicada en la lejanía del campo producido por el canal del rayo, el cual actúa como transmisor.

Los transitorios serán predominantemente oscilaciones senoidales amortiguadas con frecuencias relacionadas a la resonancia eléctrica de la estructura y su sistema eléctrico. La totalidad de los efectos de transitorios inducidos mencionados en el punto 2 son aún posibles, aunque menos probables debido a la baja intensidad del campo en este punto. En general, si la estructura ha sido diseñada para resistir los efectos directos y cercanos del rayo, mientras mayor sea la distancia entre ésta y el canal del rayo, sus efectos no representaran peligro alguno.

4 Efectos de la fase líder.

El proceso de contacto del rayo con una estructura involucra la formación de grandes concentraciones de campo eléctrico en las extremidades, bordes afilados y protuberancias, con la consecuente formación de corrientes o descargas ascendentes que intentan hacer contacto con el líder del canal descendente (líder de pasos), es posible que la presencia de una concentración adicional de campo eléctrico provocada por la

presencia de un cuerpo conductor en un campo eléctrico ya existente, por ejemplo un avión, sistemas de alta tensión en el techo de una estructura, un transformador de potencia en un poste de distribución, un balastro en un poste de iluminación elevado, etc., pueda disparar un rayo que de otra forma pudiera no haber ocurrido.

Se ha observado que la probabilidad de una descarga en una zona en particular de la estructura a proteger en gran parte se relaciona a la geometría del local junto con las variaciones de tensión, condiciones de campo, tiempo de ascenso y forma de onda. Sin embargo, los cambios aquí son múltiples, y en su mayor parte, invalidan cualquier predicción del punto de contacto con el rayo.

2.1 EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES DEBIDAS A LOS RAYOS

Las instalaciones eléctricas equipadas con aparatos electrónicos pueden verse expuestas a peligros derivados de sobretensiones por:

- Campos electromagnéticos originados por procesos de conmutación en instalaciones de alta tensión (SEMP, Switching Electromagnetic Pulse).
- Impulsos de descargas eléctricas originados por rayos (LEMP, Lightning Electromagnetic Pulse).
- Explosiones nucleares (Nuclear Electromagnetic Pulse).
- Tensiones o corrientes punta, se producen en las instalaciones de baja tensión a causa de procesos de conmutación o por descargas electrostáticas (ESD, Electrostatic Discharge).
- Descargas directas de rayo, que es a su vez, el factor de máxima peligrosidad.

Sobretensiones ocasionadas por las tormentas.

Las causas de las sobretensiones ocasionadas por las tormentas pueden clasificarse fundamentalmente en:

- descargas directas / descargas cercanas
- descargas lejanas de rayo.

En caso de una descarga directa de rayo, el rayo cae directamente sobre el edificio a proteger. Cuando se trata de una descarga próxima, el rayo cae en alguna parte de una instalación muy extensa o cae en un conductor, por ejemplo en tuberías, redes de energía o de información, que se encuentran directamente unidas a la instalación a proteger. En el caso de una descarga lejana, se ven afectadas por ejemplo líneas aéreas de transmisión de media tensión, a causa de las descargas que se producen de nube a nube y que se propagan como ondas progresivas sobre dichas líneas, o bien, las sobretensiones se originan por inducción a causa de descargas de rayos en las proximidades de las instalaciones a proteger, lo anterior se ilustra en la figura 1.

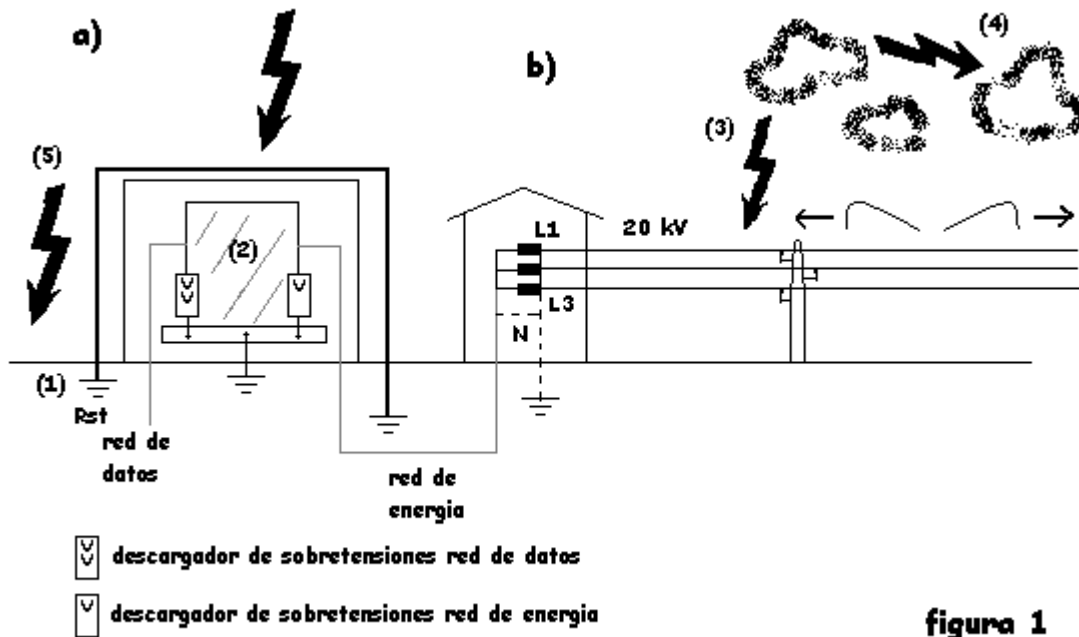


figura 1

Donde:

- A) Descarga directa / próxima. Descarga en la instalación de protección contra rayos, en instalaciones industriales, en cables, etc.
 - 1 caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra Rst.
 - 2 tensiones inducidas en lazo, (formadas en las redes de energía e información), a causa de la máxima pendiente de la corriente de rayo, di/dt máx.
- B) Descargas lejanas de rayo.
 - 3 descarga de rayo en líneas aéreas de media tensión
 - 4 ondas erráticas de sobretensión sobre dichas líneas a consecuencia de descargas de rayos de nube a nube, o respectivamente a causa de descargas en las proximidades de las líneas aéreas de transmisión.
 - 5 campos del canal del rayo.

Descarga directa / próxima de rayo.

Las sobretensiones que se producen en caso de una descarga directa o próxima de un rayo son la caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra, y tensiones inducidas en lazos metálicos.

Elevación de tensión en la resistencia de puesta a tierra.

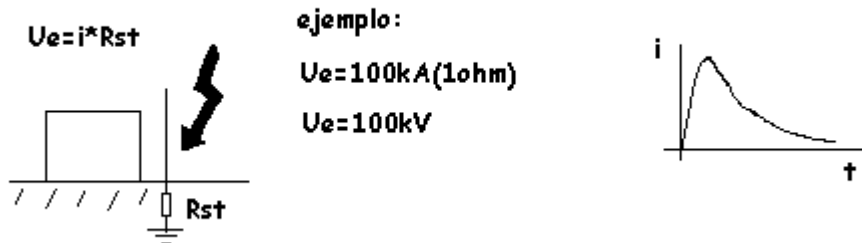
Con ayuda del valor máximo i de la corriente de rayo, se calcula la caída máxima de tensión U_e que tiene lugar en la resistencia de puesta a tierra R_{st} del edificio afectado

$$U_e = i \cdot R_{st}$$

La siguiente tabla indica los valores típicos considerados por algunas instituciones IEC – Comisión Electrotécnica Internacional.
 VG 969 – Normas para los aparatos de defensa de Alemania referentes a la construcción y dispositivos de protección que se han de emplear frente a impulsos electromagnéticos nucleares y contra rayos.
 KTA 2206 – normas de la Comisión de Energía Nuclear Alemana para la protección contra efectos causados por los rayos.

valores limite del valor maximo i de la corriente de rayo

	IEC/TC 81	VG 969		KTA 2206
		alta	normal	
rayo positivo (kA)	200	200	100	500
rayo negativo (kA)	200	200	100	100
rayo consecutivo negativo (kA)	50	50	25	50



Esta elevación de tensión U_e no es peligrosa para la instalación que se ha de proteger, si la compensación de potencial para protección contra rayos está realizada consecuentemente. En la actualidad, en las normas internacionales de protección contra rayos se exige la total compensación de potencial para protección contra rayos, en la que todos los conductores que entren o salgan de la instalación a proteger deben estar unidos a la instalación de puesta a tierra, bien sea directamente, o mediante vías de chispas o aparatos de protección contra sobretensiones. Cuando tiene lugar la descarga de un rayo, el potencial de toda la instalación se eleva en un valor U_e , pero dentro de la misma instalación no se producen las peligrosas diferencias de potencial.

2.1.1 Tensiones inducidas en lazos metálicos.

El valor máximo de la pendiente de la corriente de rayo di/dt es el que influye en el valor de las tensiones electromagnéticas inducidas en todos los lazos de la instalación, abiertos o cerrados, que se encuentren en las proximidades de conductores atravesados por la corriente de rayo.

Además de los efectos de la inducción en lazos “ planos”; configurados por los conductores en instalaciones y tendidos eléctricos; interesan también los efectos de la inducción producidos en lazos muy estrechos pero muy alargados, que se forman a causa de hilos tendidos en paralelo, no blindados, y entrelazados entre sí, como puede ser el caso de los cables de telecomunicaciones cuando se encuentran cerca de dispositivos pararrayos. Estas tensiones transversales, que se forman entre los hilos, son particularmente peligrosas para los componentes electrónicos. En la figura 2 se muestra la manera en que se forman estos lazos en instalaciones en edificios; en el edificio se encuentran instaladas dos redes, 1 y 2, independientes entre sí. La red 1 es por ejemplo la red de energía, y la red 2 es otro tipo de red eléctrica, por ejemplo una red de información; red de datos o una red de antenas, también puede ser una red no eléctrica, por ejemplo una red de tuberías de conducción de agua o de gas.

A pesar de disponerse de una protección exterior contra descargas de rayos, y de una compensación de potencial satisfactoria, se pueden inducir entre las entradas de los aparatos E1 y E2, sobretensiones que pueden tener una amplitud de hasta algunos centenares de kilovolts (kV), y originar por lo tanto perforaciones en el aparato. Estas peligrosas sobretensiones en los aparatos, con este tipo de tendido de los conductores y faltando el efecto de blindaje en las paredes de los edificios, son inevitables, incluso si se dispone de una protección exterior contra descargas de rayos y con una compensación de potencial para protección contra rayos totalmente realizada. Cuando se produce una descarga de rayo en la instalación exterior de protección contra rayos, fluyen por las redes 1 y 2 corrientes parciales de rayo que alcanzan magnitudes de hasta algunos kiloamperes (kA), y éstas buscan su camino a través del aparato.

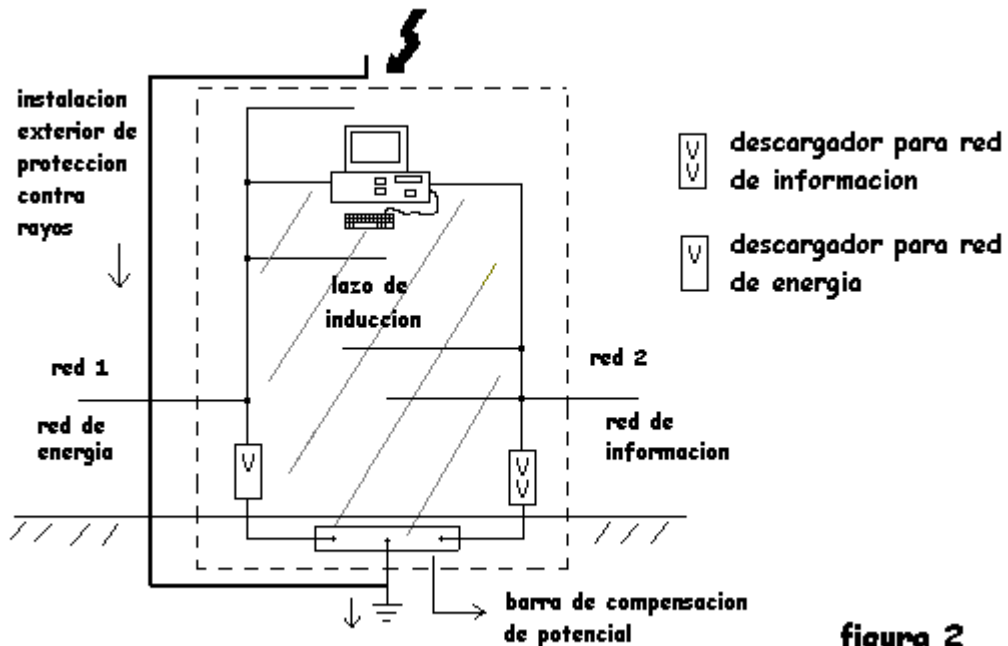


figura 2

Descarga lejana del rayo.

Cuando tienen lugar descargas lejanas de rayos, pueden suceder dos cosas, o bien se propagan ondas de sobretensiones a lo largo de los conductores (3 y 4 en la figura 1), o bien el rayo puede descargar junto a la instalación que se trata de proteger (5 en la figura 1), con lo que los campos electromagnéticos del rayo afectan a la instalación. Con base en los daños producidos a causa de sobretensiones de tormentas, se ha demostrado que las instalaciones y equipos electrónicos están expuestos a sobretensiones y sobrecorrientes inducidos o transmitidos por los conductores, y esto hasta una distancia de más de 1 km del punto en que hubo descargado el rayo. Las razones de la extensión de la zona expuesta a peligros por sobretensiones y sobrecorrientes inducidas radica en la creciente sensibilidad de los componentes electrónicos, en especial en los aparatos de información, en la cada vez mayor extensión de los conductores que atraviesan los edificios y en la gran complejidad de las redes. Como ejemplo de la creciente extensión superficial de las redes de información, puede mencionarse la longitud autorizada de las conducciones directas de datos entre dos aparatos de procesamiento de datos, las interfaces fijadas en la época de introducción de tales equipos prescribían unos valores característicos para el accionamiento de los aparatos que permitían una longitud máxima de los conductores de 15 metros, en la actualidad se dispone de activadores de líneas y de interfaces que permiten la conexión directa a través de líneas de dos hilos entrelazados con una longitud de línea de hasta 1000 metros.

En las corrientes parciales de rayo en los cables, se producen tensiones transversales y longitudinales (figura 3). La tensión longitudinal U_l , se presenta entre el hilo y el blindaje metálico del cable, es decir, que afecta el aislamiento de los aparatos conectados entre los bornes de entrada y la armazón puesta a tierra. La tensión transversal U_q tiene lugar entre diversos hilos y afecta a los circuitos de entrada de los aparatos conectados.

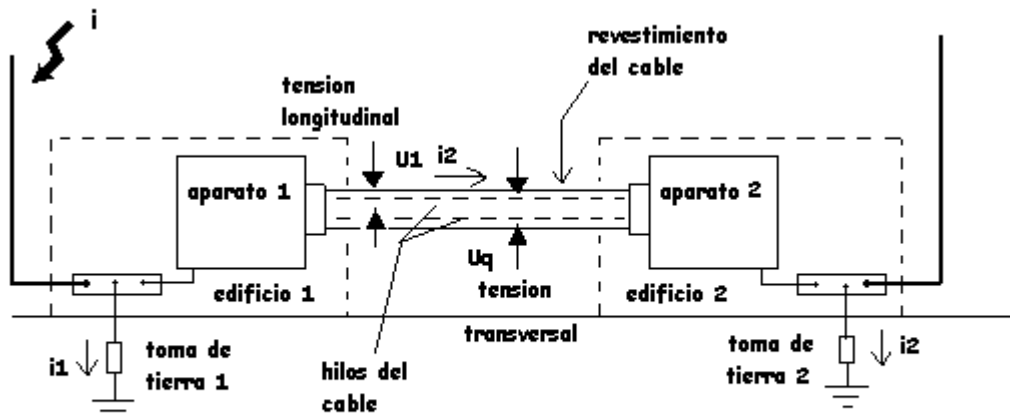


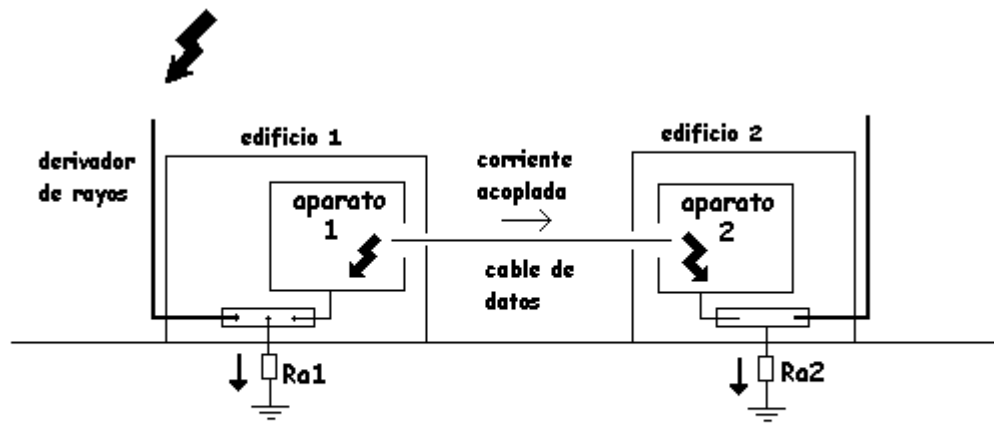
figura 3

2.1.1.1 Acoplamiento de corrientes en cables de señales.

A continuación se muestra, con ayuda de algunos ejemplos, la forma en que las corrientes de punta pueden acoplarse; óhmicamente, inductiva y capacitivamente, en cables de señales en instalaciones muy extensas. Se partirá de la disposición ya enunciada anteriormente en la que un aparato 1 está ubicado en un edificio 1 y un aparato 2 se halla en otro edificio 2, estando ambos aparatos conectados entre sí por medio de un cable de señales.

Acoplamiento óhmico.

En la figura 4 se muestra cómo al producirse la descarga de un rayo en el edificio 1, en la resistencia de puesta a tierra R1 tiene lugar una elevación de tensión de algunos cientos de kV. Estas tensiones son más que suficientes para perforar los aislamientos de los aparatos 1 y 2, de manera que después puede fluir, sin problemas una corriente de punta óhmicamente acoplada desde la barra de compensación de potencial del edificio 1 a través del aparato 1, del cable de señales, del aparato 2, de la barra de compensación 2 y de la resistencia de puesta a tierra R2. La magnitud de la corriente de punta acoplada (algunos kA) viene determinada por la relación entre las resistencias R1 y R2.



acoplamiento óhmico

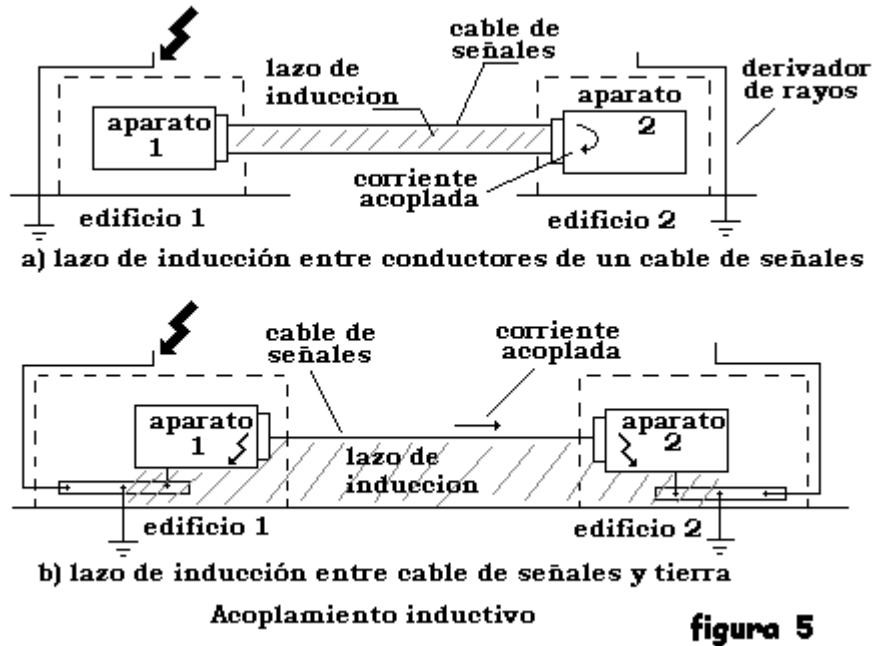
figura 4

Acoplamiento inductivo.

Los campos magnéticos que se forman partiendo del canal del rayo o de los conductores recorridos por la corriente de rayo, inducen tensiones en los bucles o lazos metálicos.

La figura 5.a muestra como el cable de señales de dos hilos que une al aparato 1 con el aparato 2, forma un lazo de inducción en el cual, al descargar un rayo en el edificio 1, se induce una tensión transversal de algunos kV, lo que tiene como consecuencia una corriente acoplada de algunos kA. Estas tensiones y corrientes suponen una carga excesiva para los componentes de las entradas o salidas de los aparatos.

Otra posibilidad de acoplamiento inductivo se presenta en la figura 5.b, en este caso el lazo de inducción está compuesto por el cable de señales y el suelo, al descargar un rayo en el edificio 1 se induce una tensión alta en el lazo así formado, algunas decenas de kV, junto con una corriente acoplada de algunos kA; lo que resulta en la perforación de los aislamientos de los aparatos en ambos extremos de la línea.



Acoplamiento capacitivo.

Cuando descarga un rayo sobre la tierra o sobre un pararrayos, el canal del rayo, o el derivador de la corriente de rayo, como consecuencia de la caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra R_a , experimenta una elevación de tensión de algunos cientos de kV.

El cable de señales entre el aparato 1 y el aparato 2 en la figura 6 está acoplado capacitivamente con uno de esos canales de rayo o con el pararrayos, las capacidades de acoplamiento (condensadores), se cargan y dan lugar a una corriente acoplada de algunas decenas de amperes, la cual, tras producir perforaciones en los aislamientos de los aparatos 1 y 2 fluye finalmente a tierra.

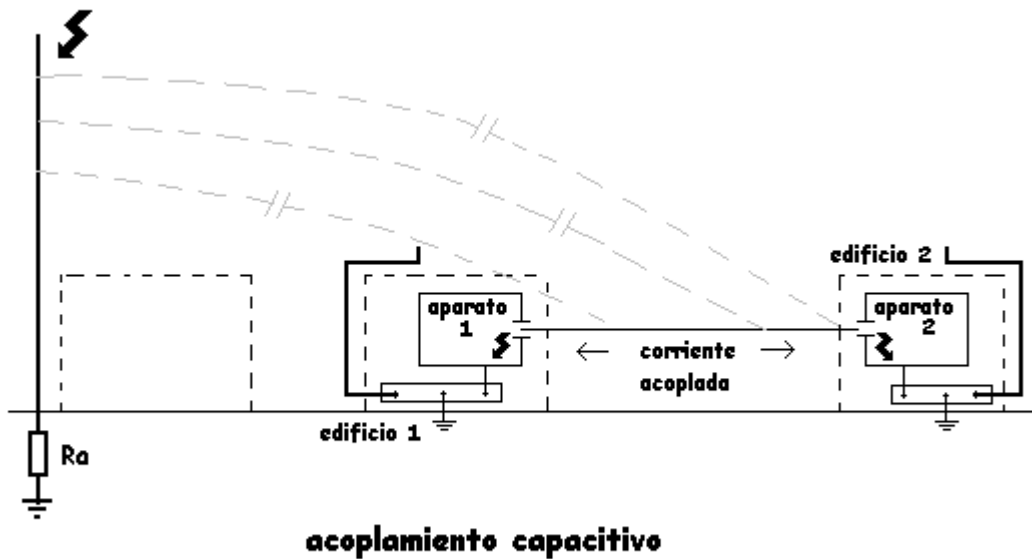


figura 6

2.2 Magnitud de las sobretensiones de rayo.

En el caso de las descargas de rayos lejanas, se trata en primer lugar del peligro que suponen las sobretensiones de algunas decenas de kV. Las intensidades que aparecen aquí son relativamente pequeñas. Cuando se trata de descargas directas de rayo, están en primer plano los elevados parámetros de las corrientes de rayo, hay que contar en este caso con intensidades de 150 kA y aún más, pudiendo aparecer al mismo tiempo puntas de tensión de algunos cientos de kV. Al peligro de algunas decenas de kV en caso de descargas lejanas de rayo, o al peligro de algunos centenares de kV en el caso de descargas directas, se oponen las tensiones de punta de perforación de tan sólo algunos kV en las instalaciones de baja tensión. La resistencia a la tensión de algunos componentes electrónicos empleados en estas instalaciones es únicamente de algunos volts. Resumiendo, el peligro causado por sobretensiones derivadas de la descarga de rayos es, por lo tanto, unas 100 hasta 10 000 veces superior a las tensiones de las instalaciones convencionales de baja tensión que éstas pueden soportar sin destruirse. En consecuencia, estos elevadísimos valores de las sobretensiones originadas por descargas de rayo deberán reducirse a valores tolerables, claramente por debajo de las tensiones de descarga o de perforación, mediante el empleo de los adecuados aparatos de protección.

Si se trata de conseguir una protección, incluso en el caso de descarga directa de rayo, los aparatos de protección contra sobretensiones empleados deberán estar en condiciones de derivar, sin destruirse, elevadas corrientes parciales del rayo.

CAPÍTULO 3

COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La función de un sistema de protección contra rayos es transportar a tierra en forma segura la corriente producida en la descarga y al mismo tiempo evitando la aparición de diferencias de potencial en los aislamientos eléctricos de los sistemas de baja tensión o de potencia industriales, la ruptura de la rigidez del aire entre el conductor de puesta a tierra y otros miembros metálicos de la estructura, y el sobrecalentamiento del propio sistema de protección.

Un sistema de protección consiste de terminales aéreas o elementos disuasivos adecuados colocados en la parte superior y / o alrededor de la estructura que se desea proteger, estos elementos se unen con el sistema de toma de tierra por un conductor adecuado, tal conductor, denominado derivador o conductor de bajada, debe cumplir las siguientes condiciones:

- 1 Debe tener una capacidad de conducción de corriente adecuada.
- 2 No debe tener resistencias o reactancias intercaladas en su trayectoria, así como tampoco conexiones que produzcan dichos efectos.
- 3 Debe presentar la menor impedancia posible a tierra.

Las trayectorias deberán ser rectas y lo más cortas posible, de ser necesarios, los radios de curvatura deberán ser tan grandes como sea posible, ya que las curvas muy cerradas aumentan la reactancia del conductor.

La reactancia cobra mayor importancia que la resistencia por las altas frecuencias con que se desarrolla el fenómeno.

Los rayos que impactan en una región remota pueden inducir peligrosas sobretensiones en conductores cercanos, pueden provocar errores de funcionamiento en circuitos de control e interferencia en equipos electrónicos. Los supresores de sobretensión y los capacitores empleados adecuadamente, pueden reducir estos efectos.

Las corrientes de tierra provocadas por la descarga del rayo pueden producir grandes diferencias de potencial entre diferentes puntos en el suelo, lo que a su vez resulta en la circulación de corrientes de gran magnitud en las cubiertas de cables con pantalla metálica así como grandes voltajes entre conductores de fase y tierra.

Existen varios métodos de protección contra los rayos como son:

- a) Puntas de Franklin.
- b) Jaula de Faraday.
- c) Ionización (emisión temprana del rayo, Early Streamer Emitters, ESE)
- d) Sistemas disuasivos o de eliminación.

Terminales aéreas.

Las terminales aéreas o puntas de Franklin se conectan a conductores cruzados sobre el techo o parte más alta de la estructura a proteger, y a conductores de bajada. Estos conductores, cruzados y de bajada, constituyen una jaula de Faraday.

Las puntas franklin y la jaula de Faraday se combinan para crear un sistema de protección completo que tiene varias denominaciones, sistema de terminales aéreas, jaula de Faraday, método Franklin. Aquellas estructuras con armazón de hierro o acero con una adecuada conexión a tierra cumplen estos requisitos con la adición de terminales aéreas de descarga.

Típicamente, las terminales aéreas se colocan con una separación de 6 m (20 pies) a 7.6 m (25 pies), a lo largo del borde de los techos de las estructuras y a 15 m (50 pies) en la parte media de los mismos, haciendo las conexiones de cruce cada 45 m (150 pies). Si la estructura no cuenta con una armazón de acero, los conductores de bajada deben ofrecer al menos dos trayectorias a tierra para la descarga del rayo en cualquiera de las terminales.

Ionización. Emisión temprana del rayo.

Este tipo de dispositivos son considerados de comportamiento dinámico, en comparación de la jaula de Faraday y las puntas de Franklin. La utilización de estos elementos es también denominada como de métodos no convencionales para la protección contra rayos. Algunas alternativas no convencionales han surgido y han sido abandonados por ser inefectivos, sin embargo, algunos de dichos sistemas siguen teniendo una presencia importante, los ejemplos más destacados de tales dispositivos son los sistemas de emisión temprana del rayo, y los sistemas de prevención o disuasión del rayo.

Los defensores de los sistemas de emisión temprana de rayo afirman que estos equipos emiten un líder ascendente con mayor anticipación al mismo tipo de respuesta que podría tener una punta de Franklin bajo las mismas condiciones.

De esta forma, se espera que el rayo hará contacto preferentemente con estos dispositivos. Se utilizan algunos medios interesantes para producir la emisión del líder ascendente, incluyendo fuentes radiactivas y activación eléctrica del pararrayo.

La teoría establece que este tipo de terminales provocan una corriente ascendente en el aire, la cual actúa como una extensión de la terminal aérea, reduciendo la tensión o, si el potencial es suficiente, facilitando un conductor para la descarga.

El efecto que se produce es el de una punta de Franklin alargada, lo cual aumenta la zona de protección.

Aunque algunos sectores de la gente dedicada a la protección contra rayos rechazan las afirmaciones respecto a las ventajas de estos dispositivos, tales sistemas siguen difundiendo su uso actualmente.

Sistemas de eliminación o de disuasión.

De acuerdo a las características del fenómeno, la alternativa más conveniente para interceptar y desviar un rayo es prevenir el impacto de la descarga, al menos en el lugar que se desea proteger.

Un método intuitivamente convincente para prevenir el rayo es descargar la nube antes de que pueda ocurrir el rayo, o menos intuitivamente, generando una nube de carga positiva sobre el área que se busca proteger, lo que desviaría al líder descendente de dicha zona e impediría que el rayo hiciera contacto en esa región.

En general, este sistema consiste de un arreglo de puntas que surgen de la parte central de la terminal aérea. En teoría esto es para disipar la carga, aunque su éxito recae en una aplicación efectiva del concepto de jaula de Faraday, así como en excelentes prácticas de toma de tierra.

Han surgido varios tipos de dispositivos de transferencia de carga, la mayoría consiste en numerosas puntas de descarga conectadas a tierra. Estas puntas de descarga pueden estar localizadas en mástil, (piense en un cepillo con cerdas de metal unido a una barra pararrayos común), o pueden estar distribuidos por la instalación (piense en una gran red de alambre de púas).

Ionización.

La emisión de iones es la forma natural para neutralizar un área altamente cargada, ya sea una nube, un objeto, o una zona en la superficie del suelo.

Para que pueda ocurrir un rayo, deben estar presentes tres factores, 1) una nube de tormenta con carga generalmente negativa, 2) una superficie bajo la nube con carga generalmente positiva y 3) un camino entre las dos cargas.

Una punta pararrayos, empleada para atraer el líder de pasos de una nube, disipa iones constantemente hacia la atmósfera. Multiplicando el número de puntos de descarga cientos de veces, se ha desarrollado entre los métodos no convencionales un disipador estático que recoge las cargas eléctricas estáticas formadas en un objeto y rápidamente las disipa en la atmósfera. El viento y la circulación del aire soplan estas acumulaciones de iones hacia la atmósfera, de este modo, se neutraliza la carga del objeto. De acuerdo con lo anterior, en teoría y con base en una operación continua, la carga del suelo nunca alcanza un valor lo suficientemente grande como para atraer la descarga de un rayo.

Los sistemas de prevención o de disuasión del rayo neutralizan el objeto, estructura o instalación disipando sus iones en la atmósfera, neutralizando cargas opuestas en ella, y reduciendo lo suficiente la cantidad de carga en la superficie del suelo bajo la nube y en las estructuras que le rodean. De este modo, los partidarios de estos dispositivos sugieren que dos de los tres elementos necesarios para que surja un rayo han sido eliminados y por consiguiente se previene la descarga o inclusive la formación del rayo.

Ciertamente, estos dispositivos ofrecen un mecanismo de descarga para la transferencia de carga positiva de tierra hacia la atmósfera. El problema surge con el hecho de que las nubes de tormenta generan carga en forma continua y rápidamente además de que se desplazan con rapidez.

De esta forma, los actuales sistemas de descarga o sistemas de desviación del líder descendente tienen que demostrar en forma convincente que pueden transferir carga hacia el aire lo suficientemente rápido para impedir el impacto del rayo en la zona que se pretende proteger.

Conductores de bajada.

La ubicación de los conductores de bajada depende de la distribución y tipo de las terminales pararrayos, tamaño de la estructura a proteger, el grado de seguridad que se desea alcanzar, trayectorias más cortas y directas, la ubicación de los electrodos de toma de tierra así como las condiciones o características del suelo, y de la presencia de tuberías o estructuras metálicas que podrían usarse con ese fin. Si la estructura cuenta con columnas de acero, éstas pueden usarse como conductores de bajada, los pararrayos deberán únicamente unirse a las columnas por medio de conductores adecuados.

La distancia promedio entre los conductores de bajada no debe ser mayor a 30 m (100 pies), y cada uno de ellos debe conectarse en su base a un electrodo de toma de tierra, el cual deberá colocarse a no más de 60 cm (2 pies) de la base de la construcción.

Las conexiones a tierra deben hacerse a intervalos regulares a lo largo de la estructura, evitando en lo posible el agrupamiento de las mismas a un solo lado de la estructura.

Las conexiones a tierra apropiadas son una característica esencial de un sistema de pararrayos.

Para un número mayor de conductores de bajada y de electrodos de toma de tierra, será menor la caída de potencial desarrollada a través del sistema de protección y mejor será su funcionamiento.

Esta es una de las grandes ventajas de los edificios con armazones de acero, así como de las zapatas en la base de cada columna, lo que constituye un electrodo bastante efectivo. Sin embargo, las zapatas de las columnas internas de grandes edificios pueden ser inefectivas para este fin ya que raramente se hallan expuestas al agua.

Las partes metálicas en el interior de un edificio que no cuente con una armazón metálica, que se encuentren dentro de un radio de 1.8 m (6 pies) partiendo de un conductor de bajada, deberán unirse eléctricamente a ese conductor de bajada, de otra forma podrían ocurrir descargas laterales a partir de éste debido a la tensión entre la parte inferior del conductor de bajada y el electrodo de puesta a tierra.

Es importante unir los electrodos y las estructuras metálicas que entren a tierra, pues de otro modo, las descargas de rayo (inclusive las remotas) pueden provocar serias diferencias de potencial, lo que representa un grave peligro para personas y equipo.

Es muy conveniente mantener las corrientes de rayo apartadas de construcciones y estructuras en las que estén involucrados líquidos peligrosos, gases o explosivos.

La protección con sistemas de desviación separados de la estructura deberán usarse en tanques de depósito y en instalaciones destinadas a la fabricación o almacenamiento de explosivos. Dichos sistemas están formados por uno o más postes, o uno o más conductores elevados entre mástiles que se encuentran perfectamente aterrizados. Los tanques que no estén protegidos por un sistema de desvío, deberán contar con un muy buen sistema de puesta a tierra para conducir a ella la corriente de descargas directas de rayo.

3.1 Protección exterior contra rayos.

En la normativa internacional de protección contra rayos se hace una clara diferenciación entre instalación de protección exterior y protección interior contra rayos.

Se denomina protección exterior contra rayos a la totalidad de los dispositivos e instalaciones en el exterior, encima, y adosados a la instalación que se quiere proteger, para captar y derivar la corriente de rayo en forma segura hacia la instalación de puesta a tierra.

3.1.1 Dispositivos pararrayos.

Se denominan dispositivos pararrayos, terminales aéreas o terminales de descarga, a la totalidad de los elementos o piezas metálicas situadas encima, a un lado, lateralmente o cerca de la instalación que se trata de proteger y que sirven como puntos para descarga del rayo.

El espacio de protección es el espacio considerado como protegido por un dispositivo pararrayos frente a las descargas del rayo, todo el espacio del edificio o estructura situado debajo de estos dispositivos puede considerarse como protegido. Instalaciones de equipo eléctrico y de maquinaria, ascensores, equipos de aire acondicionado, etc. en los techos no deben unirse a los dispositivos pararrayos en prevención de eventuales daños producidos por corrientes parciales de rayo. Instalaciones eléctricas de menores dimensiones localizadas en los techos, por ejemplo ventiladores, pueden protegerse mediante la colocación de puntas captadoras instaladas junto a dichos equipos. Instalaciones de aire acondicionado y de ventilación de mayores dimensiones ubicados en los techos o terrazas se protegen más efectivamente por medio de líneas captadoras dispuestas entre postes sobre dichas instalaciones.

3.1.2 Derivadores o conductores de bajada.

Se conoce con el nombre de derivadores o también conductores de bajada, a las conexiones conductoras instaladas entre los dispositivos pararrayos y la instalación de puesta a tierra. En la práctica se recomienda la instalación de las líneas captadoras y de los derivadores a distancias entre 5 y hasta 7 metros cuando se trata de proteger instalaciones amplias de redes de comunicaciones o de proceso de datos. Además, en estas instalaciones se deben incluir los armados de todos los techos, paredes y suelos en la instalación de protección contra rayos siempre y cuando su construcción lo permita de acuerdo con las normas aplicadas.

3.1.3 Instalación de puesta a tierra.

La instalación de puesta a tierra es el conjunto de todas las tomas de tierra locales, conectadas entre sí eléctricamente, o de las piezas de metal que actúan como tomas de tierra y de los cables de puesta a tierra. Su función será disipar en el terreno las corrientes de rayo. Para los edificios de nueva construcción, se recomienda la instalación de toma de tierra de cimientos, que se encuentra empotrada y protegida contra la corrosión, en los cimientos del edificio y que además rodea la construcción. La toma de tierra de cimientos debe estar provista de suficientes tomas de conexión para poder efectuar las uniones de las derivaciones en el exterior (situadas por ejemplo a una distancia de 5 m entre sí), y en el interior del edificio para conexión de la compensación de potencial principal para protección contra rayos y del colector de puesta a tierra. Los armados de los cimientos de un edificio se pueden conectar a la instalación de toma de tierra. Si no fuera posible efectuar la instalación de una toma de tierra de cimientos, la mejor solución es efectuar una toma de tierra circular.

3.1.4 Blindaje.

El blindaje o apantallamiento de edificios, locales y aparatos se encuentra entre las medidas preventivas para evitar formación de sobretensiones en el interior de los mismos. Las medidas de apantallamiento o blindaje han de ser previstas al realizar el proyecto de la construcción, pues se facilita y simplifica la adopción de medidas posteriores de protección, por ejemplo el empleo de aparatos de protección contra sobretensiones.

Un blindaje contra los campos electromagnéticos debe realizarse, siempre que sea posible, en forma de envolturas cerradas (los conductores o cables eléctricos que penetren a través de este blindaje se deben introducir a través de tubos de entrada metálicos, a los que se unen los blindajes de los cables y en los que los conductores de los cables se equipan con los aparatos de protección contra sobretensiones antes del punto de entrada).

Blindaje de edificios.

Mediante la interconexión y la puesta a tierra de todos los componentes metálicos de un edificio, por ejemplo los elementos metálicos de las fachadas, armaduras de acero del hormigón, vigas y otros elementos estructurales de acero, se consigue un blindaje electromagnético de bastante importancia.

3.2 Protección interior contra rayos.

La protección interior contra rayos, es el conjunto de todas las medidas adoptadas contra las repercusiones de la corriente de rayo y de sus campos eléctricos y magnéticos sobre instalaciones y equipos eléctricos dentro de un edificio.

La supresión de las diferencias de potencial originadas por la descarga de un rayo, requiere determinadas medidas que se denominan compensación de potencial para protección contra descargas de rayos. La realización de esta compensación, completa y total, es una exigencia ineludible para conseguir el objetivo de una perfecta protección contra rayos, imprescindible para los equipos e instalaciones eléctricas y electrónicas en los edificios. Mediante estas medidas, todas las instalaciones eléctricas de un edificio, incluidos los conductores de tensión de las instalaciones eléctricas (que son receptores de sobretensiones), se elevan uniformemente al potencial que se presenta en la instalación de toma de tierra al producirse un rayo, de este modo, entre ellas no aparecen peligrosas diferencias de potencial.

En la actualidad, la compensación de potencial para protección contra rayos es considerada esencial; representa la conexión de todas (sin excepción), las tuberías y conducciones metálicas que penetran en el edificio, es decir, también de los conductores de alimentación de baja tensión y de telecomunicaciones, a la instalación de toma de tierra para protección contra rayo por medio de conexiones directas o a través de vías de chispas de separación y de descargadores de sobretensiones cuando se trate de cables conductores de tensión. Esta compensación de potencial para protección contra rayos se suele tener a nivel de suelo y lo más cerca posible al punto de entrada de los conductores, cables y tuberías (que en el caso ideal deberían penetrar todos por el mismo punto), y se efectúa con ayuda de una así llamada barra colectora de compensación de potencial. De este modo se asegura que toda la instalación de tuberías metálicas de un edificio se encuentren conectadas a dicha barra, con lo cual se las incluye en la instalación de protección contra rayos. Conductores, instalaciones y tuberías metálicas que entren en una construcción y que se conectan a la barra de compensación de potencial son por ejemplo: tomas de tierra de telecomunicaciones, tomas de tierra auxiliares, tomas de tierra de medida, conductores blindados, cables de antena, de datos y de energía (por medio de dispositivos adecuados), cañerías y tubos de agua, tuberías de calefacción, tuberías de suministro de gas (considerando medidas específicas para ello de acuerdo a normas), conductos de aire acondicionado.

Elementos y conductores metálicos dentro de un edificio que deben conectarse a la barra de compensación de potencial son: tuberías de agua, cañerías, tuberías de calefacción, de gas, tuberías de equipos de extinción de fuego, guía y carriles de los ascensores, equipo o instalaciones de grúas, canales de ventilación y de acondicionamiento de aire.

Se deben conectar a través de descargadores los siguientes elementos: conductores y cables bajo tensión (conductores activos) de la instalación de energía de baja tensión con tensiones nominales hasta 1000 V, conductores neutros (conductor N), sólo en aquellos casos en los que no esté autorizada la puesta a tierra.

Aunque el tema no será abordado con mayor detalle en este texto, cabe señalar que dentro de las edificaciones o locales en los que se encuentran dispositivos o equipos electrónicos muy sensibles; equipos de procesamiento de datos por ejemplo, deben protegerse con sistemas de blindaje que con frecuencia pueden instalarse a posteriori. Del mismo modo, debe tomarse en consideración la protección individual de los diferentes equipos por medio de componentes y aparatos que estén en situación de poder conducir corrientes de rayo o partes importantes de las mismas sin quedar destruidos o averiados al hacerlo. Para optimizar la protección del equipo en el local, deberán incluirse los elementos, circuitos de protección y aparatos necesarios para limitar las sobretensiones que se puedan presentar en las instalaciones a los valores permitidos o tolerados por los dispositivos que se busca proteger.

CAPÍTULO 4

PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La función de un sistema de protección contra descargas atmosféricas es transportar a tierra en forma segura la corriente producida en la descarga, evitando la aparición de diferencias de potencial en los aislamientos eléctricos de los sistemas de baja tensión o de potencia industriales, la ruptura de la rigidez del aire entre el conductor de puesta a tierra y otros miembros metálicos de la estructura, y el sobrecalentamiento del propio sistema de protección.

4.1 NECESIDAD DE LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

No es posible proteger completamente una estructura contra la descarga directa de un rayo, a menos que se le envuelva por completo con una cubierta metálica puesta a tierra.

Sin embargo, es poco probable que tal protección sea realmente necesaria para todo tipo de objetos y estructuras en una zona o instalación determinada.

Para determinar el alcance que debe tener la protección contra rayos, o cuando ésta es necesaria deben considerarse algunos factores particulares para cada instalación a proteger, entre ellos:

- 1 peligro para el personal.
- 2 pérdidas en la producción, paro de labores.
- 3 daños a equipo y costos de reparación.
- 4 efectos en primas de seguros.
- 5 valor y naturaleza de la estructura o de su contenido.
- 6 frecuencia de las tormentas (mapas isoceráunicos).
- 7 número y severidad de las descargas por tormenta (promedio)
- 8 costo de la instalación de protección.

Los factores mencionados se enlistaron en un orden aproximado de importancia, aunque en ciertas situaciones este orden puede cambiar de acuerdo a los casos particulares.

El número de días por año en los que ocurren tormentas en una región dada es conocido como el nivel ceráunico de esa región. Existen sin embargo, variaciones locales que dependen de la topografía, contenido de minerales y de humedad que estos mapas no toman en consideración. También, hay áreas donde tales tormentas son más intensas, y otras donde ocurren mas tormentas por año, de modo que los mapas de nivel ceráunico en ocasiones deben ser modificados para considerar dichas variaciones locales. Otro punto débil de estos mapas es que no incluyen información sobre la duración o intensidad de las tormentas, ya que en ellos se considera “un día tormentoso” como cualquiera en el cual se escucha al menos un rayo en la zona reportada, tampoco incluyen datos de distancia o dirección del punto considerado o una diferenciación clara si el rayo ocurrió entre nubes o hacia tierra.

Aunque parece que no hay suficiente información disponible, el uso de los mapas cerámicos continuará aportando un aceptable nivel de referencia en la protección contra las descargas atmosféricas, cabe señalar que diversas instituciones internacionales realizan estudios que permitan conocer más a fondo el fenómeno y aportar información más detallada de la que ofrecen los mapas cerámicos actuales.

4.2 EQUIPOS Y ESTRUCTURAS

Las estructuras pueden clasificarse en cinco categorías de acuerdo a su necesidad de protección contra rayos.

- 1) La clase uno necesita muy poca o ninguna protección adicional, el único requisito real para estas estructuras es que estén efectivamente conectadas a un electrodo de toma de tierra adecuado. En esta clase están incluidas:
 - a) Estructuras metálicas, excepto tanques u otras envolventes de materiales inflamables.
 - b) Tanques de agua, silos y estructuras similares construidas principalmente de metal.
 - c) Mástiles de materiales conductores.
- 2) La clase dos consiste en edificaciones con superficies conductoras cuya armazón no es conductora, tal es el caso de construcciones con techo o recubrimientos exteriores de lámina metálica. Esta clase necesita la adición de conductores de bajada para conectar dichos elementos con electrodos de puesta a tierra.
- 3) La clase tres incluye las construcciones cuya armazón esta constituida por elementos de acero, pero sus revestimientos no son conductores, en este caso deben incluirse terminales aéreas adecuadamente distribuidas que actúan como puntos de descarga, y deben conectarse al armazón, el que funciona como conductores de bajada y electrodos de tierra.
- 4) Esta categoría incluye estructuras no metálicas, ni en su armazón ni en sus revestimientos. En este caso se requiere un tratamiento de protección completo. Se incluyen:
 - a) Construcciones de madera, piedra, ladrillo, azulejo u otro material no conductor, no se cuenta tampoco con miembros metálicos reforzados.
 - b) Grandes monumentos, (agujas), chimeneas. Incluso con elementos reforzados, esta clase de elementos debe contar con terminales aéreas, conductores de bajada y electrodos de puesta a tierra.
- 5) La clase cinco incluye aquellos puntos de alto riesgo o de grandes consecuencias de pérdidas, en estos casos se aplica protección completa; terminales aéreas, conductores de bajada y electrodos. Se incluyen:
 - a) Construcciones de importancia estética o valor histórico.
 - b) Tanques de almacenamiento.
 - * Estructuras que contengan combustibles o materiales explosivos.
 - * Estructuras que contengan sustancias que puedan ser peligrosas si son liberadas como consecuencia de un rayo.

- c) Plantas de energía y estaciones de bombeo de agua.
- d) Líneas de transmisión de energía eléctrica.
- e) Estaciones de energía y subestaciones.

4.3 PRINCIPIOS DE PROTECCIÓN

Un rayo no puede prevenirse, únicamente se le puede interceptar o desviar a un camino o trayectoria que pueda conducirlo, si fue bien diseñada y construida, sin peligro.

La teoría fundamental de protección de estructuras contra las descargas atmosféricas es ofrecer un medio de baja resistencia que permita al rayo entrar o salir de tierra con facilidad.

Como se ha visto, una protección completa puede lograrse envolviendo la estructura a proteger con una malla metálica cuyas cuadrículas sean muy estrechas, (lo ideal sería hacerlo con una lámina). Una protección adecuada se obtiene con la instalación de terminales aéreas, conductores de bajada y electrodos de puesta a tierra.

Debe observarse que el uso de terminales aéreas en una estructura puede incrementar la frecuencia de descargas en una ubicación específica. Aunque la estructura puede estar protegida adecuadamente, el aumento en la frecuencia de las descargas podría tener efectos perjudiciales en los procesos u operaciones dentro del edificio.

En el caso de edificios con armazón de acero, la multiplicidad de lazos de conducción cerrados dentro de la estructura puede actuar para resistir u oponerse a la transmisión de sobretensiones al interior del edificio. La descarga directa de un rayo en un nivel elevado de tal edificio puede llevar a la aparición de una “cortina” de corriente que fluye hacia tierra por el anillo exterior formado por los conductores verticales que son las columnas del edificio. La tensión inducida asociada a esta corriente envolvente está ligada a un campo magnético que cubre al edificio completo. Este campo magnético rodea cada uno de los miembros verticales conductores dentro del edificio e induce una tensión idéntica en las partes superior e inferior de cada columna, de este modo, existen posibilidades mínimas para que surja una diferencia de potencial entre diferentes columnas de la construcción, por consiguiente, cualquier tendencia de la corriente de rayo a fluir hacia el interior del edificio es bloqueada.

Aunque una descarga puede provocar que la parte superior de una estructura alcance 250 kV respecto a tierra, casi nada de esta tensión aparece como una diferencia de potencial entre diferentes conductores en dicho sitio.

La exposición de las estructuras con armado metálico a los rayos, inclusive a las descargas directas, casi no produce problemas de sobretensión a circuitos de energía eléctrica y a equipo de potencia ubicado dentro del armado de la estructura, sin embargo equipo electrónico sensible podría requerir un nivel de protección mayor.

En general, la protección contra descargas directas consiste en colocar terminales aéreas, puntas Franklin o elementos disuasivos en la cima de la estructura a proteger, unidas éstas por medio de conductores de bajada adecuados a electrodos de puesta a tierra.

Las estructuras con armado de acero cumplen con estos requisitos incluyendo algunas terminales aéreas unidas a la propia estructura de armado para evitar la posibilidad de perforaciones u otros daños en los techos.

Prácticas de protección.

Hasta hace poco tiempo, el criterio utilizado para determinar la zona de protección que ofrecía un pararrayos se basaba en el principio del cono de protección, cuyo vértice se encuentra en la punta del dispositivo, mástiles o en los cables suspendidos entre postes, con un ángulo de protección que oscila entre 30 y 45 grados de acuerdo al grado de protección deseado. Posteriormente se descubrió que este criterio era inadecuado, en particular para estructuras de altura mayor a los 23m (75 pies). Se ha encontrado que objetos muy elevados, antenas de radio y de televisión, así como edificios muy altos son golpeados en niveles inferiores a su parte más alta por descargas laterales, aún cuando se cuente con sistemas de protección adecuados.

Para edificios y torres de gran altura debe instalarse un conductor horizontal que rodee al edificio aproximadamente cada 18 m (60 pies), este conductor debe unirse a cada conductor de bajada para evitar diferencias de potencial. Estos conductores horizontales adquieren mayor importancia si el área de la estructura es muy pequeña, ya que en tal caso existirá un menor número de conductores de bajada que conduzcan la corriente del rayo.

Estructuras muy elevadas, aquellas que excedan los 305 m (1000pies), deben equiparse con terminales aéreas horizontales unidas a los conductores de bajada así como a los citados conductores horizontales. Para alturas por debajo de los 457 m (1500 pies), las terminales aéreas pueden colocarse a una distancia vertical no mayor a 36 m (120 pies), puede ser en cada conductor horizontal.

Más allá de los 457 m, las terminales aéreas horizontales deben instalarse cada 18 m (60 pies) en vertical, o bien, junto con los conductores horizontales.

Estas terminales son necesarias debido a dos atributos naturales de las descargas atmosféricas; primero, es posible que se forme una nube cargada eléctricamente a una altura tan baja como 457 m (1500 pies), de modo que la cima de una estructura muy elevada puede de hecho estar dentro de una nube de tales características. Segundo, un rayo se desarrolla en sus primeras etapas como una rápida serie de pequeños segmentos individuales; no como una descarga única y continua. La dirección de cualquiera de esos segmentos es impredecible, es posible por lo tanto para un rayo pasar por la cima de una estructura elevada y posteriormente golpear lateralmente algún otro punto a menor altura en la misma construcción.

Las terminales aéreas horizontales ofrecen protección a elementos metálicos tales como los marcos de las ventanas, los cuales podrían ser puntos de contacto para las descargas provenientes de alguna de estas fuentes.

Materiales.

Los sistemas de protección deben construirse con materiales resistentes a la corrosión o bien, se les debe dar una adecuada protección contra la misma.

Debe evitarse la combinación de materiales que formen un par electrolítico y que en presencia de humedad aceleren su corrosión.

Uno o más de los siguientes materiales pueden utilizarse:

- a) Cobre. Donde se use cobre, éste debe ser del mismo grado del tipo necesario para el trabajo eléctrico comercial.
- b) Aleaciones de cobre. Siempre que se utilicen aleaciones de cobre, debe comprobarse que tengan una resistencia a la corrosión similar a la del cobre bajo las mismas condiciones.
- c) Aluminio. Siempre que se use aluminio debe evitarse su colocación en sitios donde pueda hacer contacto directamente con el suelo (terrenos húmedos) ya que esto provocaría su rápido deterioro. Los conductores de aluminio deben ser de grado eléctrico.

No deben instalarse elementos del sistema de protección contra rayos que sean de cobre en techos de aluminio u otras superficies de este material, del mismo modo, debe evitarse la instalación de elementos de aluminio en superficies de cobre.

Los accesorios empleados para conectar los conductores de bajada de aluminio a los electrodos de cobre o cubiertos de cobre deben ser del tipo bimetálico, estos conectores deben colocarse a no menos de 18 pulgadas (457 mm) sobre el nivel del suelo.

Los conectores y accesorios deben ser adecuados para los conductores y superficies en los que serán instalados, serán necesarios conectores bimetálicos siempre que deban conectarse o empalmarse metales diferentes.

4.3.1 PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS COMUNES CON PUNTAS PARARRAYOS

Una estructura común será cualquiera que se utilice con fines comerciales, industriales, institucional, residencial o granjas. Una estructura común que no supere los 23m de altura (75 pies) podrá protegerse, de acuerdo con la siguiente tabla, con materiales clase I, aquellas construcciones que superen los 23 m de altura se protegen con materiales clase II.

Si es el caso en que sólo parte de la estructura supera los 23m, únicamente esta parte se protege con elementos clase II, los cuales se prolongan desde la parte superior hasta tierra, interconectándolos con el sistema de igualación de potencial de la construcción.

ELEMENTOS DE PROTECCION

materiales clase I

Conductor		Cobre		Aluminio	
terminal aérea sólida	diámetro	3/8 in	9.5mm	1/2 in	12.7mm
terminal aérea tubular	diámetro	5/8 in	15.9mm	5/8 in	15.9mm
* conductor principal cable	área transversal	57400 CM	29mm ²	98600 CM	50mm ²
tira plana sólida	espesor	0.051in	1.30mm	0.064in	1.63mm
	ancho	1in	25.4mm	1in	25.4mm
* conductor de union cable (solido o trenzado)	área transversal	26240 CM	13mm ²	41100 CM	21mm ²
tira plana sólida	espesor	0.051in	1.30mm	0.064in	1.63mm
	ancho	1/2 in	12.7mm	1/2 in	12.7mm

materiales clase II

Conductor		Cobre		Aluminio	
terminal aérea sólida	diámetro	1/2 in	12.7mm	5/8 in	15.9mm
* conductor principal cable	área transversal	115000 CM	58mm ²	192000 CM	97mm ²
* conductor de union cable (solido o trenzado)	área transversal	26240 CM	13mm ²	41100 CM	21mm ²
tira plana sólida	espesor	0.051in	1.30mm	0.064in	1.63mm
	ancho	1/2 in	12.7mm	1/2 in	12.7mm

La terminal aérea o de descarga es el dispositivo pararrayos propiamente dicho, en particular a este texto, será el tipo punta de Franklin, para el cual han sido establecidas las siguientes condiciones de instalación.

Las terminales de descarga deben distribuirse por toda la estructura que se va a proteger contra descargas atmosféricas directas.

Los elementos o estructuras metálicas ubicadas en el techo y que se proyecten a mayor altura que las terminales aéreas podrán conectarse al sistema de protección únicamente si su espesor es igual o mayor a 4.8 mm (3/16 de pulgada), tal contacto debe realizarse al menos en dos puntos. Si su espesor es más delgado, deberán tener una terminal de descarga en su parte superior o a un costado montada sobre un mástil.

Las terminales aéreas no serán necesarias para aquellos elementos o estructuras localizados en el interior de la zona de protección de alguna de las terminales de descarga. La punta de una terminal de descarga debe superar en altura como mínimo 10 pulgadas (254 mm) al objeto que se busca proteger.

Las terminales de descarga deben fijarse rígida y permanentemente a la construcción o estructura que han de proteger, si es necesario montar el pararrayo sobre un mástil y la altura resultante es mayor a 24 pulgadas (60 cm), deberá tener un soporte en su punto medio. FIGURA 3.3.1

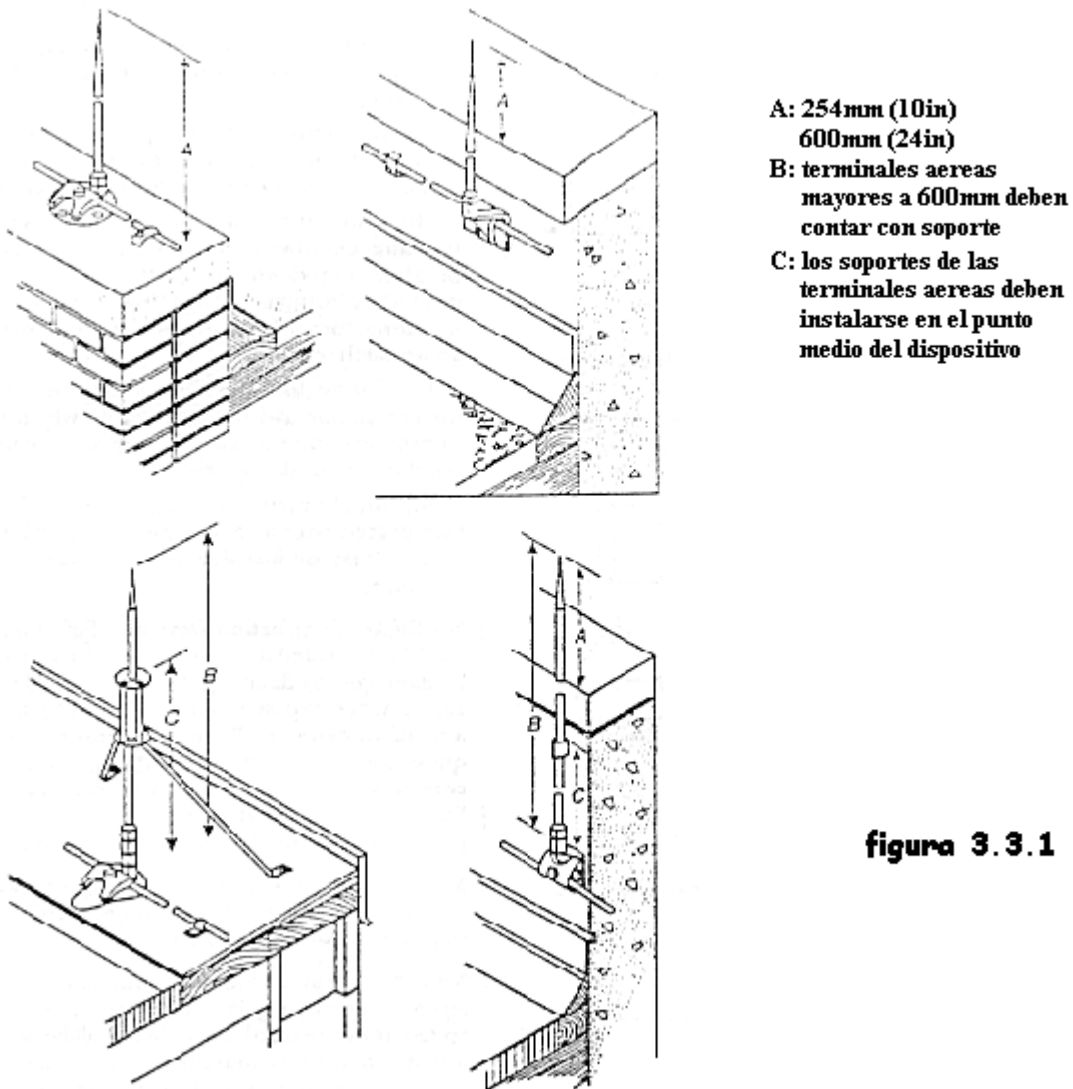


figura 3.3.1

Zonas de protección.

Para determinar la zona de protección, deberá considerarse la geometría de cada estructura. Para techos planos o con una ligera pendiente, abovedados, techos irregulares, con chimeneas, respiraderos o aberturas para iluminación, claraboyas, la zona de protección incluirá el techo así como los elementos mencionados cuando estén protegidos de acuerdo a lo indicado en la sección Dispositivos de descarga en techos.

En estructuras con varios niveles y que no superen los 15m de altura (50 pies), la zona de protección estará formada por un cono cuyo vértice se encuentra en el punto más elevado del dispositivo de descarga, mientras que sus paredes forman un ángulo de 45 a 63 grados respecto a la vertical.

Las construcciones que no superen los 7.6m de altura (25 pies), se considera que protegen a las porciones más bajas de la estructura que estén localizadas en una zona de protección denominada 1 a 2. FIGURA 3.3.2.a y 3.3.2.b

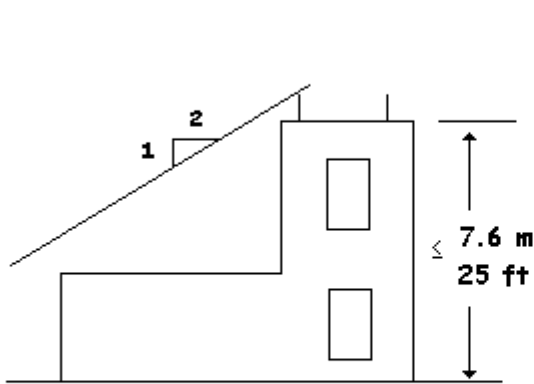


figura 3.3.2.a

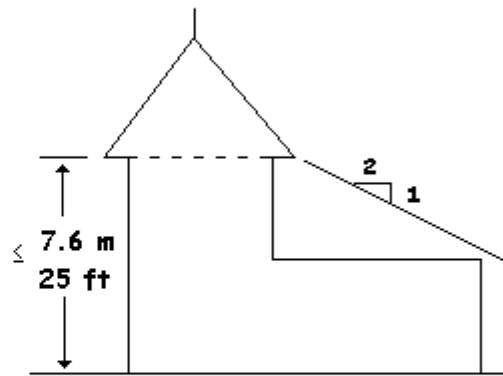


figura3.3.2.b

Estructuras que no superen los 15 m de altura se considera que protegen las porciones inferiores de la estructura que se encuentren dentro de una zona de protección uno a uno. FIGURA 3.3.3.a y 3.3.3.b

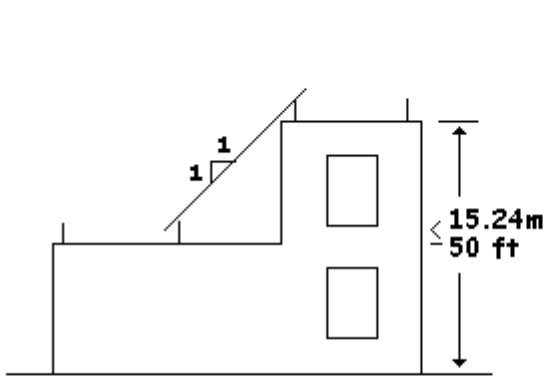


figura 3.3.3.a

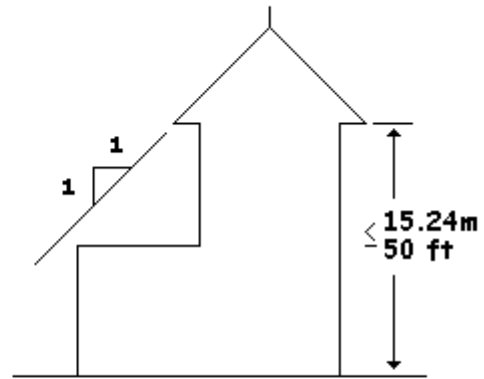


figura 3.3.3.b

Pendientes.

La discusión de los siguientes estándares se hará considerando los siguientes tipos de techos y su posible inclinación.

FIGURA 3.3.4.a

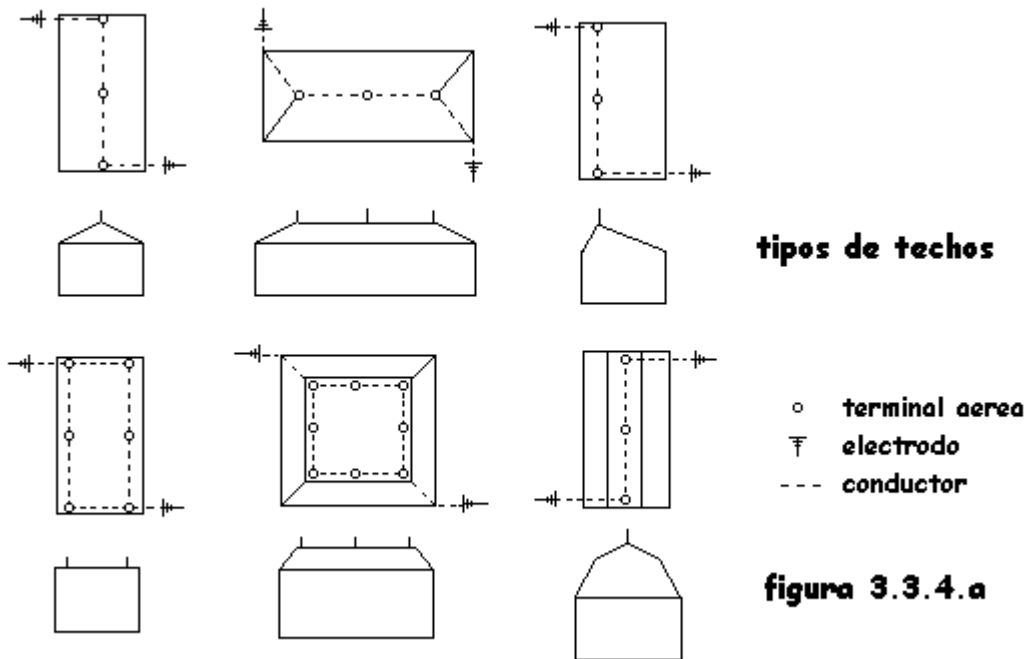
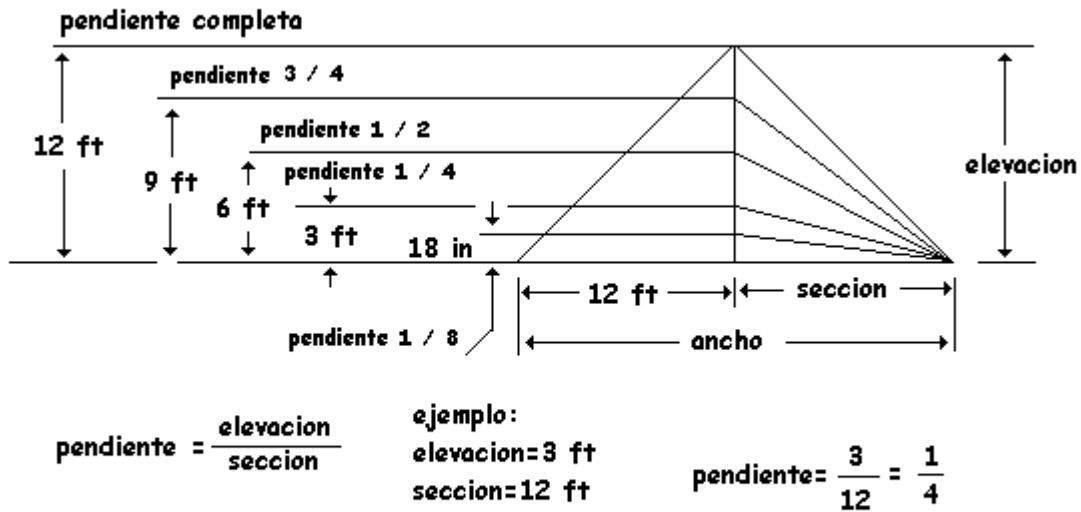


figura 3.3.4.a



pendientes correspondientes con el tipo de techo

figura 3.3.4. b

Dispositivos de descarga en techos.

Se denominará techos inclinados a aquellos que tengan un largo de 12m (40 pies) o menos y una pendiente de 1 / 8 o mayor, así como a techos de longitud superior a los 12 m y pendiente de 1 / 4 o mayor. Los techos diferentes a lo mencionado se consideran planos o ligeramente inclinados.

Las terminales de descarga deben colocarse a una distancia no mayor a 0.6 m (2 pies) del borde de los techos inclinados, y en el borde o sobre el ángulo exterior de techos planos o ligeramente inclinados.

Las terminales aéreas deberán colocarse en las crestas o parte superior de los techos inclinados y en el perímetro de techos planos o con ligera pendiente con una separación no mayor a 6m (20 pies), se permitirá su colocación a distancias de hasta 7.6m (25 pies) cuando dichas terminales tengan una longitud mayor o igual a 60cm (24 pulgadas).

Los techos planos o ligeramente inclinados que superen los 15 m (50 pies) de ancho, deben contar con terminales de descarga en su área interna con una separación máxima de 15 m.

Domos y cúpulas de igual o mayor altura que el techo principal se deben proteger con terminales de descarga, conductores y toma de tierra. Aquellas proyecciones por debajo del borde principal necesitan protección adicional sólo para aquellas áreas que sobresalgan del cono de protección.

FIGURAS 3.3.5, 3.3.5.a, y 3.3.5.b

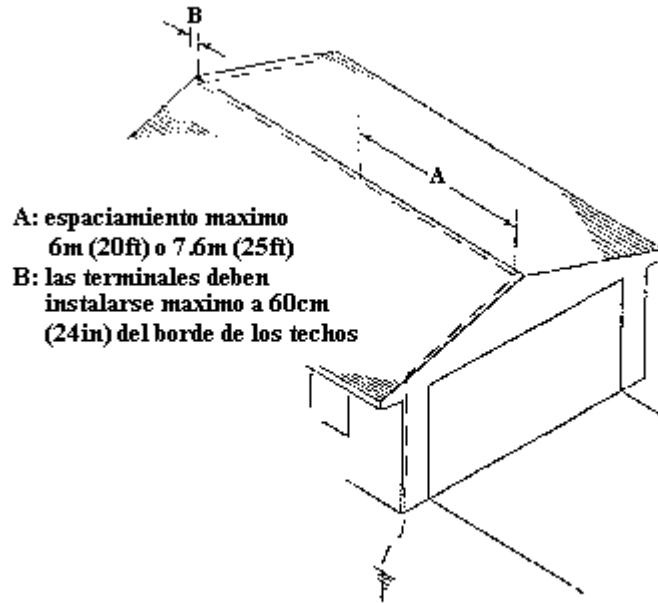


figura 3.3.5

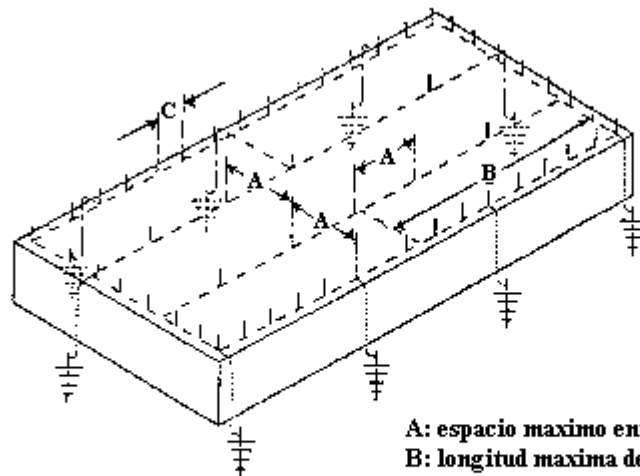


figura 3.3.5.a

A: espacio máximo entre terminales 15m (50ft)
B: longitud máxima de un conductor cruzado sin unión con el conductor de perímetro principal o con un conductor de bajada
C: espacio máximo entre terminales en el borde de la estructura 6m a 7.6m

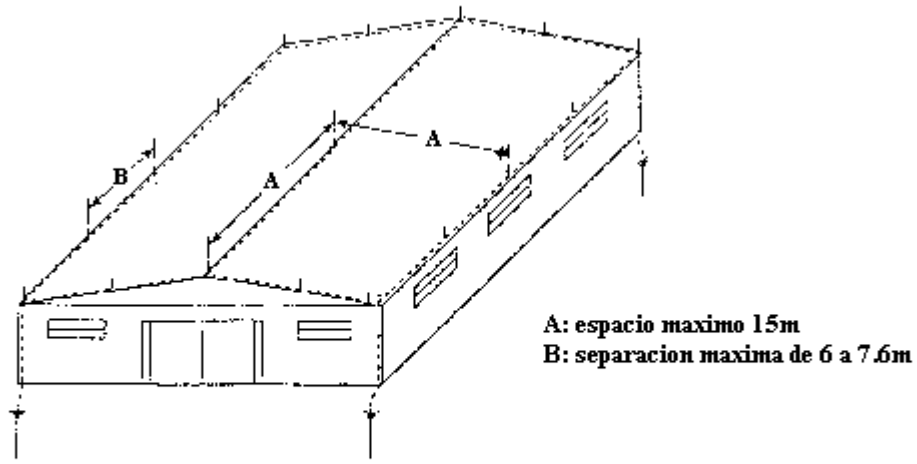


figura 3.3.5.b

En estructuras cuyos techos presenten un perímetro irregular, las protecciones podrán localizarse sobre el borde exterior “imaginario” que cumpla con las características establecidas anteriormente respecto a distancias. FIGURA 3.3.6

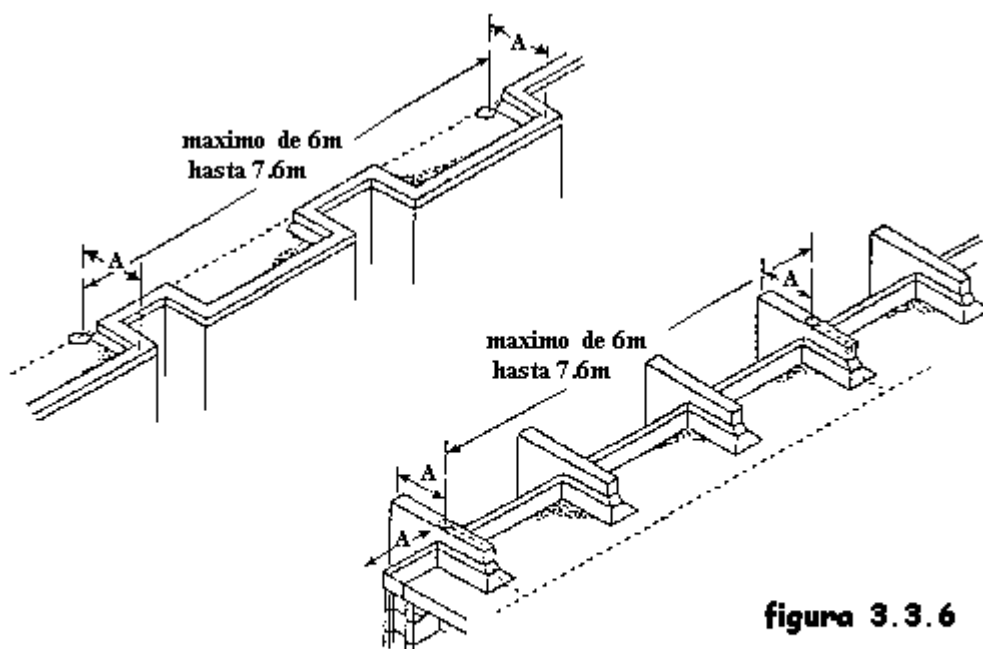


figura 3.3.6

Los dispositivos colocados en elementos verticales en el techo, como barandillas, etc. deben facilitar su conexión con un conductor que enlace todas las terminales, dicho conductor, debe correr adyacente a tal clase de elementos para lograr que el cable de unión entre conductor y terminal de descarga sea lo más corto posible, evitando superar los 4m, preferentemente la conexión debe hacerse con un conector del tipo "T". FIGURA 3.3.7

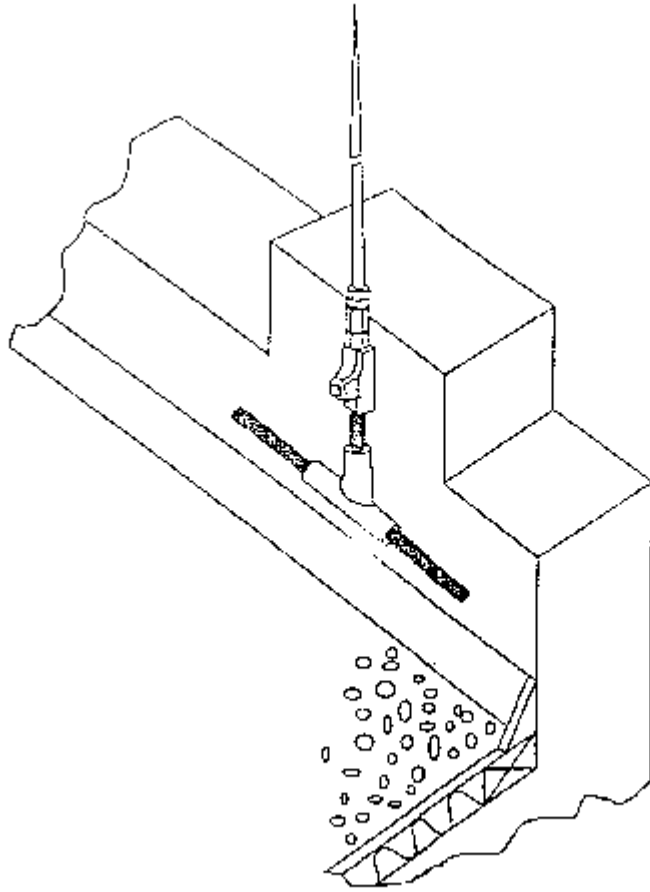


figura 3.3.7

Áreas abiertas en techos planos, como pozos de iluminación o mecánicos deberán protegerse si su perímetro excede los 92m (300 pies) o bien, si sus dos dimensiones rectangulares superan los 15m.

En el caso de techos abovedados o con cúpulas las terminales de descarga deben colocarse como sea necesario para que ninguna porción de la estructura quede fuera de la zona de protección [puede usarse como referencia una distancia de atracción o de descarga de 45m (150 pies)].

Chimeneas y respiraderos que no se encuentren dentro de alguna zona de protección necesitan la instalación de terminales de descarga en su parte superior, esto incluye chimeneas metálicas con un grosor de 3 / 16 de pulgada (4.8 mm) o menor, aquellos elementos con un espesor mayor sólo necesitan una conexión a los conductores principales del sistema de protección. Las terminales aéreas ubicadas sobre chimeneas no deben estar a una distancia superior de 60cm del borde de la misma. FIGURA 3.3.8

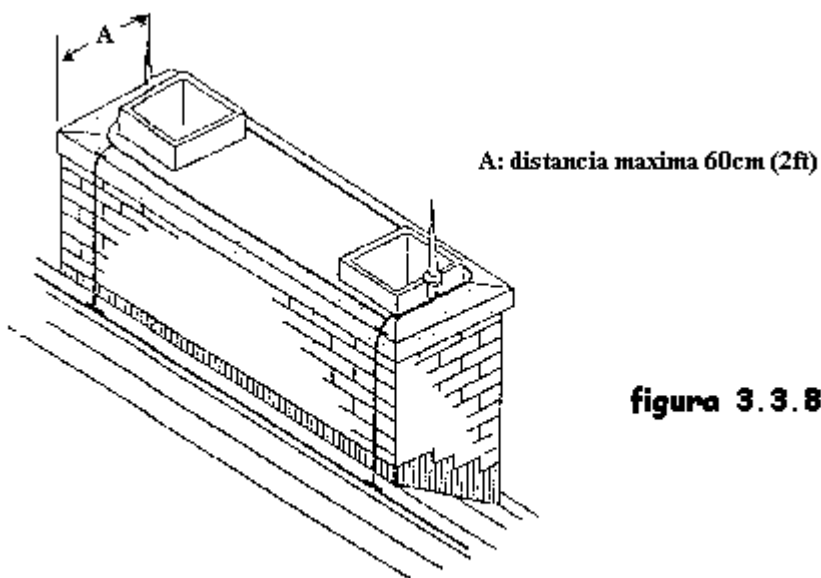


figura 3.3.8

Conductores.

Los conductores principales de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, son aquellos que interconectan a todas las terminales de descarga entre sí y forman dos o más trayectorias de descenso hacia las terminales de puesta a tierra.

Las terminales de descarga ubicadas en un nivel bajo, pueden conectarse por medio de un solo conductor proveniente de un nivel superior siempre que su trayectoria no supere los 12m (40 pies).

Se permite el uso de trayectorias abiertas para conectar terminales de descarga de niveles inferiores con elementos de niveles superiores siempre que el conductor de unión entre dicha terminal y el conductor principal no supere los 5m y conserve un trayecto horizontal.

FIGURA 3.3.9

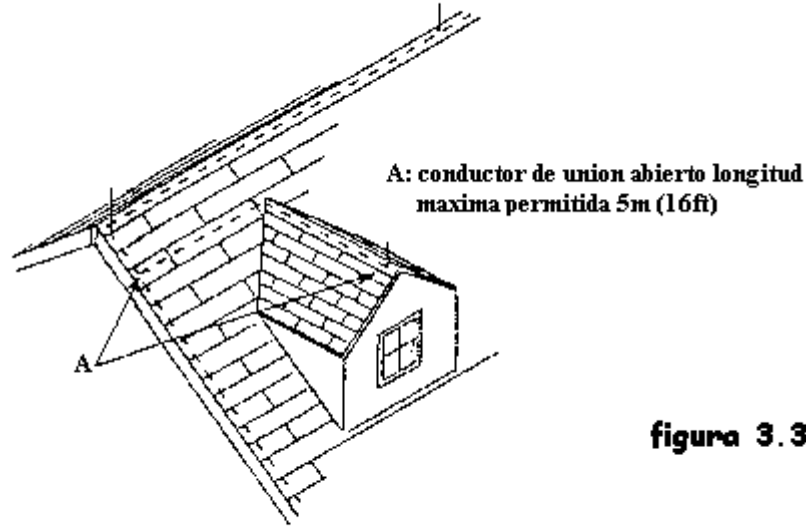


figura 3.3.9

Las partes metálicas en una estructura, canalizaciones para agua de lluvia, tubos de drenaje, escaleras, barandales, u otras partes metálicas, no son sustituto de los conductores principales, del mismo modo, aquellas partes metálicas con un grosor menor a 3 / 16 de pulgada (4.8 mm) no deben ser empleados con ese fin.

Los conductores deben fijarse en su trayectoria a intervalos que no superen los 90 cm (3 pies). Los conductores en los techos deben tenderse a lo largo de los bordes, alrededor del perímetro, por detrás o encima de parapetos y a través de áreas planas o ligeramente inclinadas para enlazar todas las terminales de descarga. Los conductores principales deben colocarse alrededor de obstrucciones; ventiladores, cúpulas, etc. ubicadas en los techos.

Los conductores principales pueden instalarse cruzados para interconectar las terminales de descarga en techos planos o con poca pendiente que superen los 15m de ancho, por ejemplo, los techos de 15 a 30 m de ancho (50 a 100 pies) necesitan un conductor cruzado, techos de 30 a 46 m de ancho (100 a 150 pies) necesitaran dos conductores cruzados, etc. Los conductores cruzados deben conectarse con el conductor perimetral a intervalos no mayores a 46m (150 pies). FIGURAS 3.3.5.a y 3.3.5.b

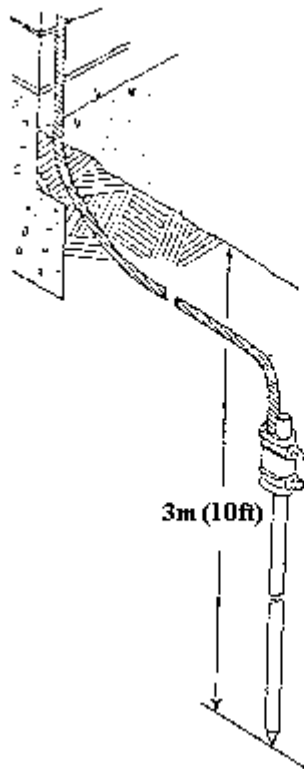


figura 3.3.10

Conductores de bajada.

Los conductores de bajada deben tener una separación adecuada, su localización dependerá de condiciones como:

- a) la ubicación de las terminales de descarga
- b) la trayectoria más corta a tierra
- c) condiciones del terreno
- d) seguridad contra desplazamientos
- e) ubicación de grandes estructuras metálicas
- f) ubicación de tuberías subterráneas

Número de conductores de bajada.

Como mínimo, dos conductores de bajada deben colocarse en cualquier tipo de estructura. Aquellas que superen los 76m (250 pies) en perímetro deben tener un conductor de bajada cada 30 m. El número total de conductores de bajada en estructuras con techo plano o ligeramente inclinado debe ser tal que la distancia promedio entre conductores no supere los 30 m indicados.

Los conductores de bajada ubicados junto a caminos, accesos públicos, patios escolares o zonas similares, deben protegerse contra daños físicos y desplazamientos, si el conductor se protege con tubo metálico, éste debe unirse al conductor por sus dos extremos, el tubo usado deberá tener una longitud mínima de 1.8m (6 pies).

Los conductores de bajada que entren a suelos corrosivos deberán protegerse contra la misma con una capa protectora que comience en un punto a 90 cm del suelo y extenderse a todo lo largo del cable que quede bajo tierra.

Los conductores deben estar asegurados a la estructura sobre la cual se colocan a intervalos máximos de 1m. Los elementos usados para este fin deben ser del mismo material que el conductor y deben ser igualmente resistentes a la corrosión, debe evitarse combinar materiales que puedan resultar en un par electrolítico en presencia de humedad, lo que aceleraría su corrosión.

Terminales de tierra.

Cada conductor de bajada debe tener una terminal de toma de tierra dedicada en específico al sistema de protección contra rayos. El diseño, tamaño, profundidad y número de las terminales de tierra usados debe cumplir con las siguientes especificaciones.

Electrodos

El diámetro de los electrodos no debe ser menor a 1 / 2 pulgada (12.7mm) y 2.4 m de longitud (8 pies). Los materiales usados pueden ser acero recubierto de cobre, cobre sólido, acero galvanizado o acero inoxidable, todo electrodo debe estar libre de pintura u otras cubiertas aislantes.

Los electrodos de tierra de los sistemas eléctrico y de telecomunicaciones no deben usarse en lugar de los propios electrodos del sistema de protección contra rayos, esta condición sin embargo, no prohíbe la unión de los electrodos de puesta a tierra de los diferentes sistemas.

Los conductores de bajada deben unirse a los electrodos por medio de pernos, soldadura o conectores de compresión hechos para tal fin. Las abrazaderas también son adecuadas en el caso de electrodos directamente enterrados en el suelo.

Suelos arcillosos con humedad en niveles inferiores

En este caso, los electrodos deben tener una extensión vertical no menor a 3m (10 pies) dentro del suelo, el terreno debe compactarse a su alrededor para lograr un mejor contacto entre tierra y el electrodo.

Suelos arenosos o pedregosos

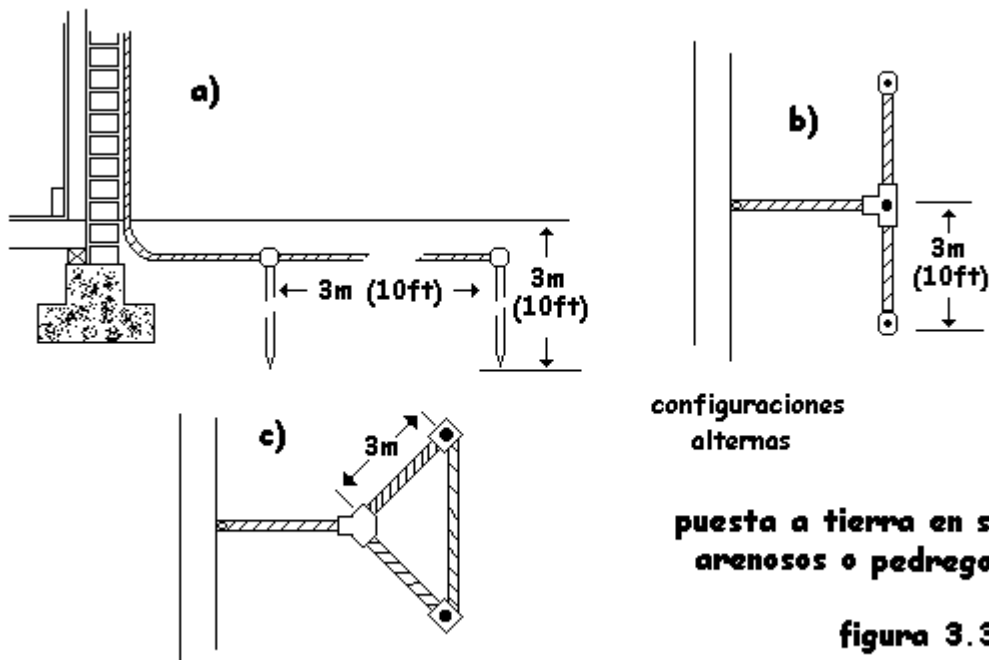
Para estos suelos, serán necesarios dos o más electrodos de 3m de largo distribuidos con una separación no menor a la propia longitud del electrodo, 3m.

Capas superficiales del suelo poco profundas

En suelos donde las capas rocosas se encuentran cerca de la superficie, el conductor de bajada debe colocarse en zanjas, su longitud no debe ser menor de 3.7m (12 pies) y de 30 a 60 cm (1 a 2 pies) de profundidad.

En suelos arenosos o con grava, la zanja será de no menos de 7.5m de largo y de 60 cm de profundidad, si esto no fuera posible, se permiten profundidades menores o directamente sobre la roca al menos una distancia de 60cm, el cable debe estar unido en su extremo a un electrodo laminar o placa de cobre con un área mínima de 0.18 m cuadrados (2 pies cuadrados) y un espesor no menor a 0.8mm (0.032 pulgadas). Si la capa de tierra del terreno es menor a 30cm de espesor, el conductor de bajada deberá conectarse a un conductor en anillo instalado en una trinchera rodeando la estructura, dicho conductor debe ser de un diámetro mayor o igual al del conductor principal del sistema de protección contra rayos. También pueden usarse electrodos de placa para mejorar el contacto con la tierra si la resistencia del terreno es muy elevada.

FIGURAS 3.3.10, 3.3.11 y 3.3.12



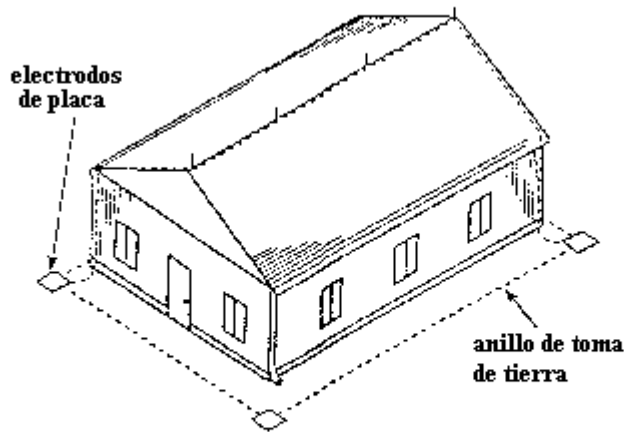


figura 3.3.12

Electrodos encerrados en concreto

Este tipo de electrodos sólo deben usarse en construcciones nuevas, el electrodo debe colocarse cerca o en las zapatas de las columnas o en los cimientos del edificio, los cuales se encuentran en contacto directo con la tierra, tal tipo de electrodos deben cubrirse por no menos de 51mm (2 pulgadas) de concreto. Los electrodos encerrados en concreto deben consistir en lo siguiente:

- a) No menos de 6m (20 pies) de conductor de cobre desnudo del mismo calibre o mayor que el conductor principal del sistema de protección.
- b) Un electrodo que consista en al menos 6m de una o más barras de acero reforzado o bastones de 1 / 2 pulgada de diámetro que estén efectivamente conectados o unidos entre sí por medio de soldadura.

Los conductores de bajada deben unirse de forma permanente al electrodo formado en alguna de las formas descritas en los incisos anteriores, podrán usarse pernos, abrazaderas, soldadura o conectores de compresión.

Electrodo en anillo

Un electrodo en anillo que rodee toda la estructura debe estar en contacto directo con la tierra a una profundidad no menor de 76 cm, o cubierto en concreto de acuerdo al punto anterior, en cuyo caso deberá ser de un conductor de cobre desnudo continuo no menor a los 6m con diámetro igual al del conductor principal.

Los conductores de bajada se deben unir en forma efectiva y permanente al anillo empleando alguno de los métodos ya mencionados, cabe señalar que está permitida la combinación de los diferentes electrodos de toma de tierra mencionados, respetando sus características y condiciones particulares.

Tierra común

Todas las tomas de tierra de una estructura deben interconectarse para obtener un potencial de tierra común, pueden incluirse las tomas de tierra del servicio eléctrico, teléfono, antenas, el sistema de protección contra rayos, así como tuberías metálicas subterráneas.

Por tubería metálica subterránea se incluye tuberías de agua, de gas, tubos conduit, tuberías de gas licuado, etc. La conexión a tuberías de gas debe hacerse del lado del usuario partiendo del medidor, debe observarse además las especificaciones y normas establecidas para ello.

Las uniones de estos sistemas con el sistema de protección contra rayos deben hacerse con conductores de igual calibre a los de ésta última.

Si algún sistema eléctrico, datos, teléfono o algún otro está unido a tuberías de agua, será necesaria una conexión del sistema de protección contra rayos hacia esa tubería si ésta es eléctricamente continua, si no lo es, debido al uso de alguna sección de tubo de plástico u otra razón, será necesario librar esa sección no conductora con cable igual al del sistema de protección para asegurar la continuidad eléctrica del conjunto.

Sistemas ocultos

Para este tipo de sistemas deben cumplirse los mismos requerimientos que se han descrito para los sistemas expuestos, excepto que en este caso se permite colocar los conductores ocultos en los techos, debajo de tejados, detrás de los revestimientos de las paredes exteriores, en tuberías conduit o incrustados directamente en el concreto o mampostería. Si uno de estos conductores se pone en tubo conduit de metal, debe conectarse el conductor al conduit en sus dos extremos, asimismo, debe asegurarse la continuidad eléctrica del conduit en toda su extensión y empalmes.

Los conductores y otros componentes del sistema de protección ocultos en concreto reforzado con acero, deben conectarse con dichos elementos de acero, las uniones deben hacerse de acuerdo a las especificaciones ya mencionadas.

Conductores que corran en forma horizontal se conectan al acero estructural a intervalos no mayores de 30m.

Las terminales de tierra deben colocarse tan cerca como sea posible del perímetro exterior de la estructura cumpliendo las características descritas anteriormente.

Sistemas con acero estructural

Está permitido que el armazón de acero estructural de una construcción se utilice como conductor principal de un sistema de protección contra rayos siempre que esté garantizada su continuidad eléctrica. Siempre que esto se cumpla, se podrá hacer una conexión directa entre las terminales de descarga (puntas pararrayos) y dichos elementos de acero, las terminales de descarga pueden unirse individualmente a estos elementos por medio de un conductor, o bien, se pueden enlazar todas las terminales con una red de conductores, la cual se une a la estructura de acero en intervalos no mayores a los 30m. Las uniones de las terminales de descarga o de los conductores con la estructura de acero, deben hacerse en áreas de acero libres de pintura, polvo, etc., usando placas de acero que tengan un área de contacto no menor a 8 pulgadas cuadradas (5200mm²), éstas deben ir soldadas o remachadas.

Las terminales de tierra deben unirse a las columnas de acero en el perímetro de la estructura a intervalos aproximados de 18m, la conexión debe hacerse cerca de la base de la columna y en la forma ya especificada.

Antenas, mástiles y soportes de metal ubicados sobre una estructura protegida deben unirse con el sistema de protección contra rayos, a menos que se encuentren o formen parte de una zona de protección del sistema.

Cuerpos de metal localizados en el interior o exterior de la estructura, que contribuyan al riesgo de descarga del rayo debido a que están aterrizados u ofrecen un camino a tierra, deben unirse con el sistema de protección.

Para determinar si es necesario unir un cuerpo metálico con el sistema de protección deben considerarse los siguientes factores:

- a) La unión eléctrica será únicamente necesaria si es probable que surjan arcos entre el sistema de protección y algún otro cuerpo metálico.
- b) La influencia de un cuerpo metálico no aterrizado, tal como la estructura de una ventana, está limitada por su efectividad como conductor de corto circuito si es que llega a ocurrir arqueo, por lo tanto, no necesariamente requieren estar conectados al sistema de protección contra rayos.
- c) Las distancias de unión entre elementos dependerán de una evaluación técnica sobre el número de conductores de bajada así como de su localización, la interconexión de otros sistemas de tierra, la proximidad que exista entre otros cuerpos metálicos aterrizados y los conductores de bajada, así como el medio de descarga; aire, materiales sólidos, etc..
- d) Aquellos cuerpos metálicos ubicados en el interior de una estructura con armazón de acero, que por medio de la construcción misma están unidos a dicho armazón de acero, no necesitarán mayores interconexiones.

Igualación de potenciales

Igualación de potencial a nivel de tierra

Todo dispositivo unido a tierra situado dentro o sobre una estructura protegida contra rayos debe unirse al sistema de protección si se encuentra a menos de 3.6m (distancia vertical) de la base de la estructura.

Para estructuras que superen los 18m de altura la interconexión entre las terminales de tierra del sistema de protección contra rayos y otros elementos puestos a tierra debe ser en forma de un lazo o anillo conductor de tierra.

Igualación de potencial a nivel de techo

Para estructuras con una altura superior a los 18m, todos los elementos dentro o sobre la construcción que estén unidos a tierra, deben estar interconectados si se encuentran a menos de 3.6m del nivel principal del techo.

Igualación de potenciales en niveles intermedios

La igualación de potencial a niveles intermedios se logra con la interconexión de los conductores de bajada del sistema de protección contra rayos con los elementos conectados a tierra que se encuentren en un nivel intermedio entre el techo y la base de la estructura, de acuerdo a los siguientes puntos:

* Construcciones con estructura de acero

Lazos de conducción intermedios no serán necesarios en este tipo de construcciones en aquellas partes en las que el armazón sea eléctricamente continuo.

* Estructuras de concreto reforzado

En aquellas estructuras de concreto reforzado que estén interconectadas y puestas a tierra según se mencionó en el párrafo referente a sistemas ocultos; los conductores de bajada y otros elementos puestos a tierra deben enlazarse en los niveles intermedios a distancias no mayores a los 60m.

* Estructuras de otro tipo

En estos casos, los conductores de bajada y otros elementos puestos a tierra deben unirse en lazos conductores a niveles intermedios que no superen los 18m.

Unión de cuerpos metálicos

Cuerpos metálicos verticales deben enlazarse de acuerdo con las siguientes condiciones:

Estructuras de acero:

Cuerpos metálicos con unión a tierra o sin ella, que superen los 18m de altura deben unirse a los miembros de acero estructural tan cerca de sus extremos como resulte práctico, a menos que ya exista en dichos puntos una unión inherente al tipo de construcción.

Estructuras de concreto reforzado:

Cuerpos metálicos con unión a tierra o sin ella que superen los 18m de altura deben unirse al sistema de protección contra rayos tan cerca de sus extremos como sea práctico.

Otras estructuras:

La unión de cuerpos metálicos con unión a tierra o sin ella estará determinada de la siguiente forma;

- Cuerpos de metal aterrizados. Este párrafo considera la unión y puesta a tierra de cuerpos metálicos no considerados en los párrafos anteriores.

Donde se cuente con un cuerpo de metal unido al sistema de protección en sólo uno de sus extremos, se podrá usar la siguiente fórmula para determinar si son necesarias más uniones.

Las ramificaciones o bifurcaciones de los cuerpos metálicos conectados al sistema de protección en sus extremos, pueden requerir uniones con el sistema de protección contra rayos de acuerdo a la siguiente fórmula si sus cambios de dirección vertical son mayores de 3.6m.

- Estructuras que superen los 12m de altura. Cuerpos de metal conectados a tierra se unen con el sistema de protección cuando se encuentren a menos de una distancia de unión (D) calculada con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{h}{6n} \cdot K \dots (A)$$

donde:

h: distancia vertical entre la unión en consideración y la unión con el sistema de protección más cercana.

El valor de n está relacionado con el número de conductores de bajada separados al menos 7.6m y ubicados a una distancia menor a 30m de la unión en cuestión, se le determina de la siguiente forma:

Cuando la unión se necesita dentro de una distancia vertical de 18m desde la parte superior de la estructura; n=1 si sólo existe un conductor de bajada en dicha zona, n=1.5 si hay dos conductores de bajada, y n=2.25 si hay tres o más conductores de bajada en la zona.

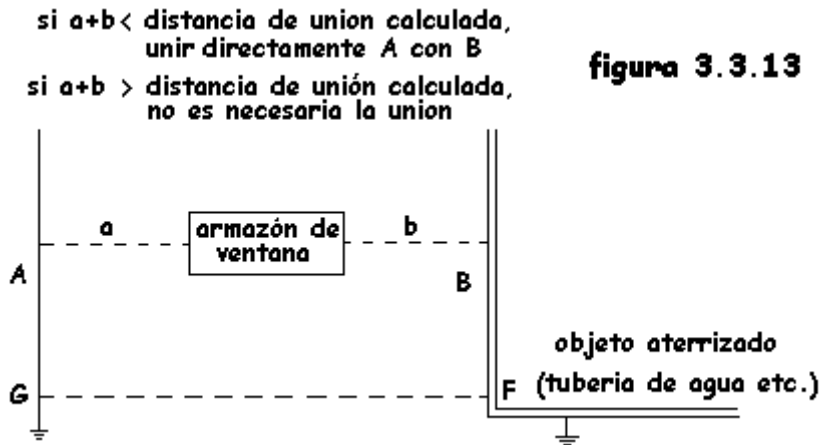
K=1 si chispas o una descarga lateral ocurren en el aire, o K=0.5 si las mismas atraviesan materiales densos como concreto, ladrillo, madera, etc.

Cuando la unión se necesita por debajo de los 18m desde el borde superior de la estructura, n es el número total de conductores de bajada del sistema de protección contra rayos.

- Estructuras con una altura menor o igual a 12m. Cuerpos metálicos con conexión a tierra deben unirse al sistema de protección si están localizados dentro de la distancia de unión D determinada por la fórmula anterior, en la cual, para este caso, h es la altura del edificio o bien la distancia vertical del punto en el cual se quiere hacer la unión hasta la conexión más cercana entre el sistema de protección y el cuerpo metálico. Los valores de n y K se conservan sin cambios.

Cuerpos metálicos no aterrizados (aislados de tierra)

Un cuerpo metálico aislado, tal como el armazón de una ventana, en un medio no conductor que se encuentre cerca de un conductor del sistema de protección o de un cuerpo metálico aterrizado, puede necesitar una unión sólo si el total de las distancias de aislamiento entre el conductor del rayo y el cuerpo aislado, y entre el cuerpo metálico aterrizado y el cuerpo aislado, es igual o menor que la distancia de unión calculada. FIGURA 3.3.13



Una conexión de unión será necesaria cuando el total de las distancias más cortas entre el conductor del rayo y el cuerpo aislado, y la distancia entre el cuerpo aislado y el cuerpo conectado a tierra es igual o menor que la distancia de unión calculada de acuerdo a la fórmula (A).

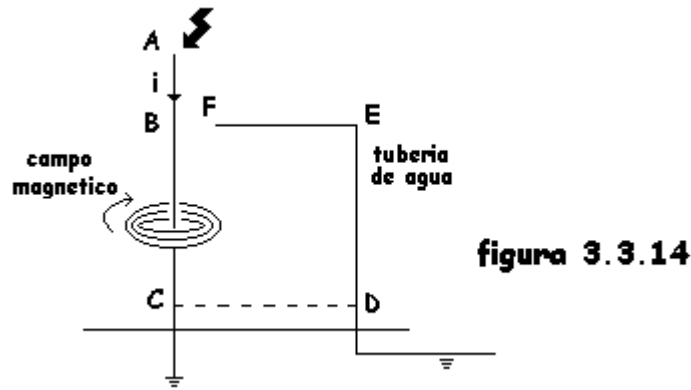
La unión debe hacerse entre el sistema de protección contra rayos y el cuerpo metálico conectado a tierra, no es necesario conectar el cuerpo aislado con ninguno de estos elementos o hacer pasar a través de él dicha conexión. FIGURA 3.3.13.

Necesidad de las uniones

La descarga del rayo puede provocar peligrosas diferencias de potencial sobre un edificio y hacia el interior del mismo. La mayor preocupación en la protección de un edificio recae en la ocurrencia de diferencias de potencial entre los conductores del sistema de protección contra rayos y otros cuerpos metálicos conectados a tierra, así como hacia cables o conductores pertenecientes al edificio.

Estas diferencias de potencial son provocadas por efectos resistivos e inductivos, y pueden ser de tal magnitud que pueden surgir peligrosas descargas laterales y chispas o arcos entre los elementos en cuestión, a fin de reducir estas posibilidades es necesario igualar los potenciales enlazando los cuerpos metálicos aterrizados con el sistema de protección.

La FIGURA 3.3.14 ilustra la generación de diferencias de potencial entre los conductores del sistema de protección y otros cuerpos metálicos aterrizados.



Efecto resistivo

En la situación en la cual el conductor C está conectado sólo a la terminal de tierra y la tubería tiene una conexión a tierra independiente, puede surgir un enorme potencial entre los puntos B y F. Suponiendo una resistencia de 20 ohms entre el punto C y tierra, y una corriente de rayo de 100 kA (100 000 amperes), entonces, la ley de Ohm (voltaje = corriente x resistencia) indica que un potencial de 2 millones de volts existe en el conductor ABC. Debido a que en un principio no fluye corriente por la tubería, su potencial es cero volts. La diferencia de potencial de 2 millones entre B y F es suficiente para que se produzca una descarga lateral o arco de más de 2 m (6 pies).

A fin de reducir dicha diferencia de potencial a cero, es necesaria una igualación de potencial a nivel de tierra, tal como se indicó en la sección del mismo título.

Esta unión se representa en la figura 3.3.14 con el segmento CD. Con la unión CD, la resistencia entre B y F es prácticamente cero, por lo cual durante la descarga del rayo el potencial en B debido al efecto resistivo es igual al que aparece en el punto F, de este modo, el efecto resistivo ha sido neutralizado por medio de la unión.

Efecto inductivo

Cuando una corriente atraviesa el conductor ABC se genera un campo magnético alrededor del conductor, tal como se muestra en la figura 3.3.14, a mayor magnitud de la corriente, mayor será el campo magnético.

El lazo BCDEF es interceptado por estas líneas de flujo magnético, la variación del flujo a través de este lazo induce en él una diferencia de potencial entre B y F. Dicha diferencia de potencial puede ser del orden de algunos millones de volts, lo que fácilmente produce descargas laterales.

Las técnicas de unión sugieren la unión de huecos o claros como el segmento BF, sobre los cuales existen elevados potenciales, así; se elimina el potencial y la posibilidad de chispas o descargas laterales entre ambos puntos, ofreciendo un camino a tierra seguro para la corriente de rayo.

Las fórmulas para determinar las distancias de unión están calculadas considerando corrientes de rayo muy elevadas, lo que resulta en general en distancias de unión bastante confiables.

La diferencia de potencial a través de BF está relacionada con el tamaño del lazo BCDEF, pero principalmente con la altura BC más que con CD, de lo cual surge el término h en la fórmula (A).

Igualar los potenciales a intervalos regulares (distancia vertical) ayuda a reducir el tamaño del lazo BCDEF, lo cual sirve para mantener la tensión entre huecos en valores controlables que pueden eliminarse con uniones simples.

Un problema que no es fácil de controlar son las líneas de energía y de comunicaciones que entran a los edificios. Si la línea DEF fuera una línea de teléfono, energía o datos, sin conexión a tierra, la tensión a través del lazo se incrementaría por los efectos resistivo e inductivo, por lo tanto el segmento o hueco BF pronto sufriría una descarga, lo que conduce a chispas entre ambos terminales y posibles incendios así como riesgos y daños para equipo y personal. De este modo, todas estas líneas deberán contar con una unión eléctrica a tierra a través de equipos supresores de sobretensión adecuados.

Protección de estructuras y locales especiales

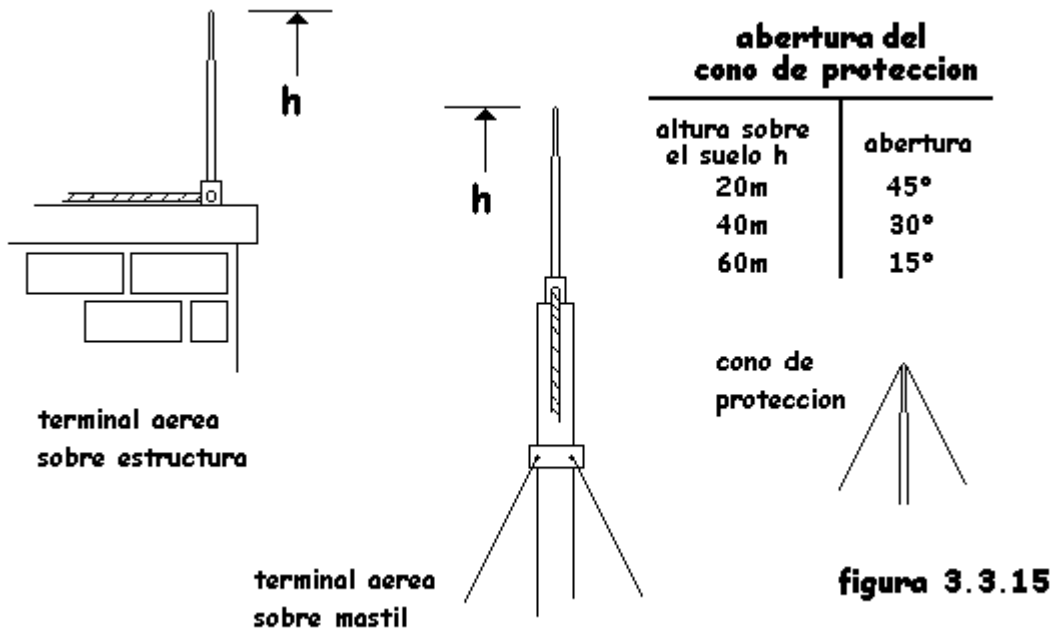
Por locales especiales se entenderá aquellas estructuras destinadas al almacenamiento, fabricación o procesamiento de productos inflamables; gases o vapores inflamables, combustibles o materiales explosivos.

Todas las especificaciones de protección hasta ahora mencionadas son igualmente aplicables para proteger instalaciones especiales, sin embargo, en algunos casos es necesario aplicar consideraciones particulares y algunas modificaciones, para mayor referencia de ello, se recomienda consultar bibliografías más específicas en el tema como son las prácticas recomendadas de la IEEE y los estándares de la NFPA, IEC, entre otros.

4.3.2 ZONAS DE PROTECCIÓN

Una zona de protección es el espacio considerado como protegido por un dispositivo pararrayos (terminal aérea o de descarga) frente a las descargas atmosféricas. Comúnmente se subordina a los dispositivos pararrayos ubicados a una altura determinada sobre el nivel del piso, un espacio de protección dentro del cual se considera que las construcciones, equipo e instalaciones se encuentran protegidos.

Así por ejemplo, se expresa la zona de protección de una terminal pararrayos ubicada a una altura de 20 metros por medio de un cono cuyas paredes tienen una abertura máxima de 45 grados medidos frente a la vertical, y cuyo vértice coincide con la punta superior del propio pararrayos. Figura 3.3.15



La forma más convencional del tendido de conductores sobre la terraza, superficie de remate o techo de un edificio se describe como un dispositivo pararrayos en forma de malla, cuya abertura de mallas no debe ser mayor a 10x20m, todo el espacio del edificio situado por debajo de esta estructura puede considerarse como protegido.

Cabe señalar que se trata aquí de un espacio protegido estadístico, en el que se detiene el 95% de los rayos que pueden descargar en ese sitio, para aproximadamente un 5% de los eventuales rayos, hay que contar que estos pueden descargar en el espacio protegido mismo o entre las mallas, pero, como en estos casos se trata de descargas con valores pico bajos, inferiores a 7kA, se considera que los daños que pudieran ocasionar son mínimos.

Modelo de la esfera rodante o Electrométrico

Internacionalmente se emplea el denominado procedimiento de esfera rodante para determinar el espacio verdaderamente protegido contra las descargas atmosféricas.

Este procedimiento se puede aplicar en general y en los objetos o construcciones a proteger que presenten las más variadas y complejas formas, asimismo, se podrá aplicar con todo tipo de dispositivos pararrayos (puntas Franklin, dispositivos ionizantes, etc.) por muy sofisticado o complejo que sea su funcionamiento.

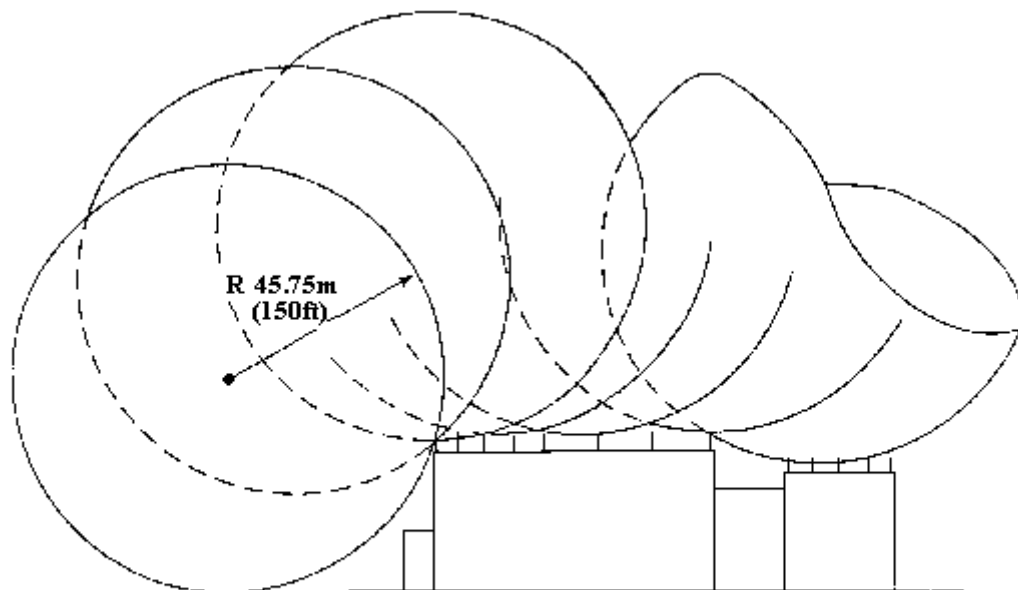
El procedimiento se basa sobre la física de la descarga del rayo y tiene en cuenta sus condiciones físicas marginales en la determinación del espacio protegido. Por lo general se procede de la forma que se describe a continuación.

Se reproducen los objetos a proteger; edificios, estadios deportivos o instalaciones industriales, así como los dispositivos pararrayos previstos, en un modelo a escala; por ejemplo 1:100 o hasta 1:500. Después se construye una esfera, de acuerdo con la escala, con un radio que equivale a la longitud postulada de la descarga de captación del rayo. El modelo electrogeométrico se basa en considerar que el centro de la esfera se corresponde con la cabeza del rayo directriz (líder de pasos) el cual se ha acercado tanto a la tierra que la descarga de captación (líder ascendente) que se produce desde el objeto puesto a tierra más próximo a él, da lugar a la unión con el rayo.

En la práctica se aplican radios de esfera de 30m y de hasta 60m, sin olvidar que la seguridad de la protección se reduce conforme aumenta el radio.

La esfera de rayo se hace pasar rodando alrededor y sobre todo el modelo, en todas las posiciones posibles. Si al hacer esto la esfera únicamente toca los dispositivos pararrayos, ello indica que el objeto a proteger se encuentra totalmente situado dentro del espacio o zona de protección. Si no se tocan algunos de los pararrayos, los mismos pueden ser considerados superfluos y eliminarse. Por el contrario, si al girar la esfera sobre el modelo toca el objeto a proteger en algún punto que no sea un pararrayos, dicho objeto se encuentra insuficientemente protegido en ese lugar y hay que complementar la instalación de protección de forma que la esfera toque únicamente estos elementos para conseguir una protección eficaz, conviene señalar que se puede dar solución a estos casos instalando un pararrayos adicional o aumentando la altura de uno ya existente por medio de un mástil adecuado en cuanto a su altura e instalación.

La zona de protección o protegida, será todo el espacio que no queda en contacto con la esfera. Cuando la esfera es tangente a tierra y descansa sobre un pararrayos, el espacio en el plano vertical entre estos dos puntos y por debajo de la esfera conforman la zona de protección. Figura 3.3.16



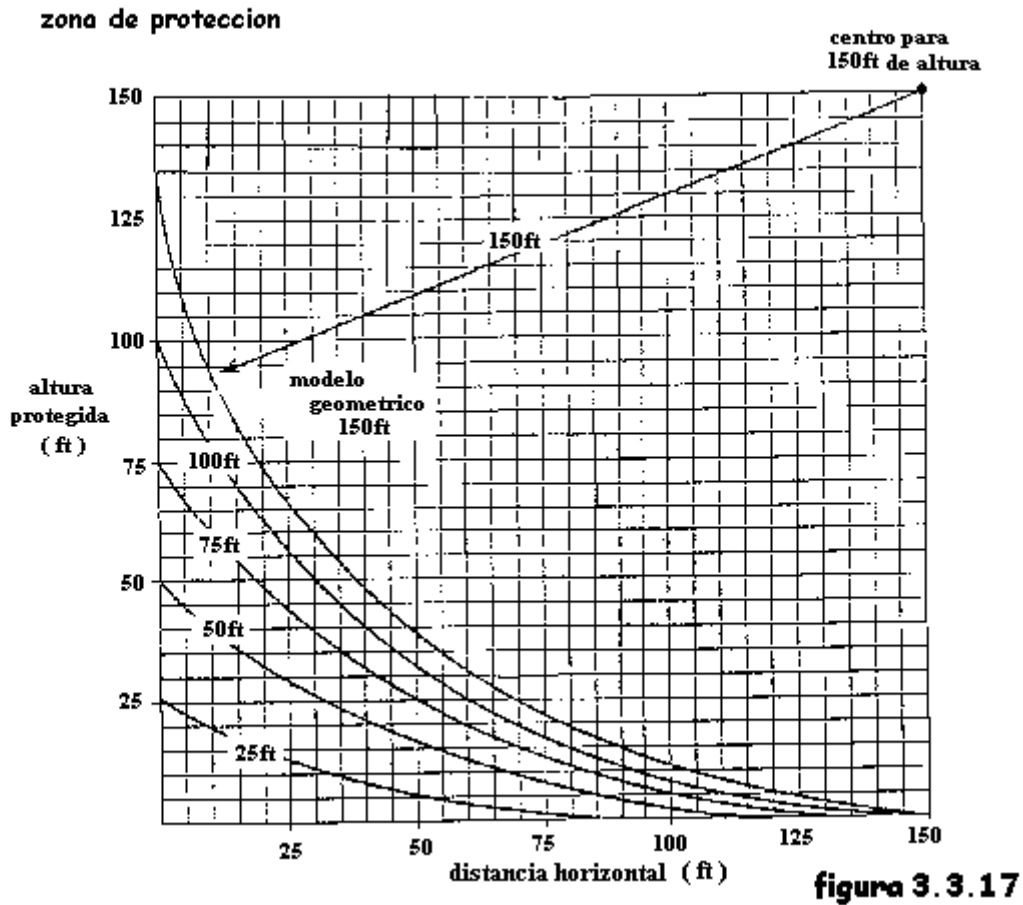
zona de proteccion

figura 3.3.16

La siguiente figura ilustra algunos ejemplos de aplicación de la esfera de rayo, se basa en la altura a la cual se instaló el pararrayos; 7.6m (25ft), 15m (50ft), 23m (75ft), 30m (100ft), 46m (150ft).

El gráfico muestra la distancia protegida (distancia horizontal) medida en forma radial desde la estructura protegida.

La distancia horizontal protegida estimada se corresponde sólo con una altura protegida.
 Figura 3.3.17



4.4 CONEXIÓN A TIERRA

Resistencia a tierra.

La resistencia de toma de tierra de un electrodo se forma por:

- 1) Resistencia del electrodo (metal)
- 2) Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo
- 3) Resistencia del terreno, desde la superficie del electrodo hacia fuera, en la geometría fijada por el flujo de corriente que sale del electrodo hacia tierra.

Las primeras dos resistencias son o pueden hacerse de un valor muy pequeño (fracciones de ohm) y pueden despreciarse para fines prácticos. El tercer término sin embargo, debe considerarse siempre y con todo detalle.

Como la Tierra es (relativamente) infinita en su tamaño comparada con el sistema de tierra que conocemos o identificamos como tal, también lo es su capacidad de absorber una cantidad virtualmente ilimitada de corriente. Sin embargo, en la práctica esa corriente ilimitada se transmite a tierra a través de la interfaz electrodo-tierra, este proceso se describe a continuación:

Alrededor del electrodo de tierra, la resistencia del suelo es la suma de resistencias en serie de las diferentes capas de tierra ubicadas progresivamente hacia el exterior del electrodo.

La capa más próxima al electrodo tiene la sección transversal más pequeña y con ello la mayor resistencia. Las capas sucesivas tienen progresivamente áreas más grandes y resistencias más bajas. Esto es, a medida que el radio, a partir del electrodo, crece, la resistencia disminuye prácticamente a cero.

La figura 3.5.1 muestra un electrodo típico del tipo pica o barra, de 3m de largo y un diámetro de 16mm (5/8in). El camino de la corriente hacia tierra parte de la superficie de la pica y consiste de capas cilíndricas y semiesféricas sucesivas. A medida que la distancia hacia fuera de la barra aumenta, también lo hace el área de la sección transversal de las capas individuales y, mientras aumenta su área, su resistencia individual disminuye.

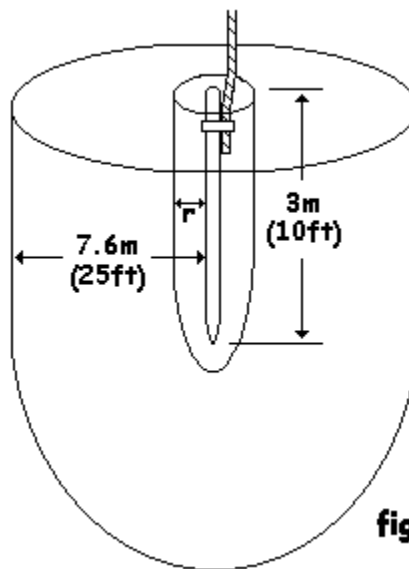


figura 3.5.1

La tabla 1 muestra los resultados de algunos cálculos del valor de la resistencia del suelo, tomando una distancia de 7.62m (25ft) que representa el 100% de la misma. Los resultados indican que en los primeros 3cm a partir de la superficie de la barra se tiene el 25% de la resistencia total, a los 15 y a los 30cm se tiene el 52 y 68% de la resistencia respectivamente. De esta forma, se observa que los primeros centímetros del material que rodea a la pica son los más importantes en lo que se refiere a reducir la resistencia con el electrodo. En zonas con suelos de resistividad muy elevada, la reducción de la resistividad del suelo por tratamientos químicos o con el uso de concreto, puede ser de mucha utilidad para mejorar la efectividad del sistema de electrodos de puesta a tierra.

DISTANCIA HACIA LA SUPERFICIE DEL ELECTRODO r (m)	PORCENTAJE APROXIMADO DE LA RESISTENCIA TOTAL
0.03	25
0.06	38
0.09	46
0.15	52
0.3	68
1.5	86
3.0	94
4.6	97
6.1	99
7.6	100

TABLA 1 Resistencia del suelo a una distancia r del electrodo

Instalar mas electrodos junto a un primero con la finalidad de reducir la resistencia no tiene un efecto significativo si se les instala demasiado cerca del primero. Los electrodos múltiples con poco espaciamiento no tienen una resistencia recíproca proporcional a su número, esto se debe a la resistencia común, en la cual la corriente proveniente de cada electrodo eleva el potencial del otro. Debido a que el potencial es mayor para el mismo flujo de corriente, el efecto resistivo aumenta por la resistencia mutua.

Valores aceptados

En general, los sistemas de puesta a tierra más elaborados pueden no funcionar satisfactoriamente a menos que la conexión con tierra sea la adecuada para esa instalación particular. Se comprende por lo tanto, que la conexión con la tierra, con el suelo, es una de las partes más importantes de todo el sistema de puesta a tierra, también es la parte más difícil de diseñar.

Una perfecta conexión a tierra debería tener cero resistencia, pero esto es imposible de conseguir, se puede obtener resistencias menores a 1 ohm por diferentes métodos, sin embargo tales valores tan bajos pueden no ser necesarios.

Una adecuada conexión a tierra es esencial para un funcionamiento efectivo del sistema de protección contra rayos y debe hacerse el mejor esfuerzo para conseguir el mejor contacto posible con la tierra, esto sin embargo no necesariamente significa que la resistencia a tierra deba tener un valor muy pequeño sino que; más bien, la distribución de metal en el suelo o sobre su superficie, en casos extremos, debe ser tal que permita disipar la corriente del rayo sin provocar daños.

Una resistencia baja es lo más deseable, pero no es esencial, esto se muestra considerando los casos extremos; una construcción sobre suelo arcilloso húmedo y otra sobre roca sólida. En el primer caso, si el suelo tiene una resistividad normal de 4000 a 50 000 ohms por centímetro la resistencia de una conexión a tierra hecha extendiendo 3m de conductor en el terreno tendría un valor de 15 a 200 ohms, además, la experimentación ha llevado a comprobar que dos conexiones de este tipo en construcciones pequeñas resultan suficientes. Bajo este tipo de condiciones favorables, disponer de los medios adecuados para interceptar y disipar la energía de un rayo en forma segura se vuelve algo relativamente simple y de bajo costo.

En el segundo caso, será imposible hacer una conexión a tierra, en el sentido común en que es usado el término, debido a que la mayoría de las rocas son aislantes o al menos de gran resistividad, y para conseguir un efectivo contacto con tierra son necesarios métodos más elaborados.

El método más efectivo será un anillo conductor tendido sobre la superficie de la roca rodeando la construcción en la que se encuentran las terminales pararrayos.

La resistencia a tierra en algunos puntos distantes de tal arreglo puede ser alta, pero al mismo tiempo la distribución de potencial alrededor del edificio será prácticamente la misma, tal como si el anillo estuviera en un terreno conductor, lo que resulta en un efecto protector prácticamente igual.

En general, el alcance de los preparativos para la conexión de tierra dependerá de las características del suelo, y comprenderá desde la simple extensión de un conductor en el suelo cuando la tierra es profunda y de gran conductividad, hasta una elaborada red o malla de conductores enterrada cuando la tierra es muy seca o de muy poca conductividad.

Cuando es necesaria una malla, debe enterrarse siempre que la profundidad del suelo (capa de tierra antes de llegar a roca) lo permita, ya que esto ayuda a mejorar su efectividad. Su extensión estará determinada por las dimensiones de la estructura y el juicio de la persona encargada de la instalación, quien debe considerar que a mayor disponibilidad de metal enterrado o puesto en íntimo contacto con la tierra, la protección será más efectiva.

Naturaleza del terreno

Cuanto menor sea la resistividad del terreno, tanto más fácilmente se pueden alcanzar valores bajos de resistencia para la instalación de tierra. La resistividad del terreno puede ser medida, sin embargo, ese valor varía con la temperatura y el grado de humedad, por lo tanto no es aconsejable efectuar mediciones de la resistencia de tierra cuando la temperatura es excesivamente alta o cuando el terreno está impregnado de agua debido a lluvias recientes.

Tratamiento del terreno

Los terrenos de aluvión (formados por depósitos de materias transportadas por ríos desbordados) ofrecen las mejores condiciones para la realización de instalaciones de tierra de muy baja resistencia, aún cuando su humus (parte del terreno que contiene diversas sustancias orgánicas en descomposición) es generalmente poco profundo.

Las zonas ricas en vegetación o que dan cauce a las aguas pluviales o residuales son asimismo apropiadas dada la elevada humedad del terreno. Cabe observar que está prohibido colocar placas u otros elementos conductores con función de electrodos de tierra en las aguas de lagos, ríos, torrentes, acequias o en el mar, debido a la posibilidad de que se produzcan fenómenos de corrosión, lo que exigiría un control frecuente de los electrodos y además la necesidad de prohibir el acceso a dicha zona ya que ello podría resultar peligroso.

Existen métodos para reducir la resistividad del terreno, por ejemplo se puede recurrir a las sales minerales (cloruro de sodio, cloruro de calcio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre) disueltas en agua y vertidas sobre el terreno o en el electrodo si éste es tubular, sin embargo los resultados no siempre se corresponden con lo previsto y en algunos casos se producen fenómenos de corrosión. Es mucho mejor, siempre que sea posible, hacer uso de un terreno que tenga un contenido orgánico.

Siguiendo con la idea de modificar la naturaleza química del terreno, se puede recurrir a la colocación de capas de carbón (o grafito en polvo) situadas directamente en contacto con los electrodos. Este procedimiento, de difícil aplicación cuando los electrodos tienen forma de pica, puede ser utilizado siempre que se recurra a electrodos en forma de placa, anillo o malla.

Puede adquirirse en el mercado productos especiales para rociar el terreno inmediato al electrodo, se trata de soluciones que originan precipitados inatacables por los ácidos del terreno y que dan lugar a la formación de masas gelatinosas que se desparraman produciendo numerosas ramificaciones de agua, de esta forma, no sólo resulta aumentada la conductividad del terreno sino también la superficie de contacto entre el electrodo y el suelo, sin embargo no está garantizada su duración en el tiempo, por otra parte, algunas de estas soluciones contienen productos tóxicos cuya manipulación exige cautela.

Electrodos

Con el término electrodo se entiende un cuerpo metálico puesto en íntimo contacto con el terreno y destinado a dispersar en el mismo las corrientes eléctricas de rayo. Puede estar constituido por un solo elemento o por diversos elementos conectados entre sí mediante conductores desnudos enterrados.

Según las características del terreno, (mayor o menor posibilidad de hundir profundamente los electrodos) se dispone de los siguientes tipos de electrodos: Figura 3.5.2

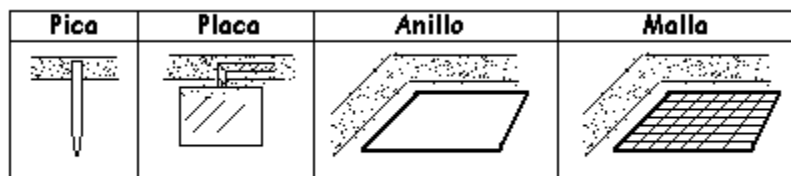


figura 3.5.2

Pueden combinarse los tipos de electrodos mencionados para obtener así mejores resultados (anillo o malla complementados con picas, por ejemplo).

Influencia recíproca

La resistencia de tierra de una pica depende mucho más de su longitud (profundidad de penetración) que de las dimensiones transversales, si se alcanza la capa freática (capa de agua subterránea) la resistencia de tierra disminuye sensiblemente. Para los electrodos en forma de placa, la resistencia de tierra depende de sus dimensiones, en electrodos en anillo de su perímetro y para electrodos en forma de malla de la longitud total de los conductores que la forman.

Se ha mencionado que una gran cantidad de metal enterrado permite reducir la resistencia de contacto, esto es cierto, sin embargo, se debe señalar que no es posible obtener valores bajos de resistencia de tierra sólo con aumentar el número de electrodos, picas por ejemplo, sin tener en cuenta sus respectivas áreas de influencia o sección del suelo en la cual cada electrodo va a disipar la corriente que conduce (ya sea corriente de rayo o de falla). El mismo concepto es válido para los electrodos de placa, en los electrodos en anillo; no proporciona ninguna mejora la colocación de dos conductores muy juntos, por ejemplo en la misma zanja, es preferible tratar de instalar una malla o bien un doble anillo.

Los siguientes diagramas ilustran estos conceptos. Para su elaboración se han considerado constantes las características del terreno, con independencia de la separación entre electrodos, así como iguales las dimensiones de estos últimos.

En la figura 3.5.1, los porcentajes de variación están referidos a la resistencia de tierra del primer electrodo, se debe tomar en cuenta que a partir de un determinado número de electrodos dejan de obtenerse resultados apreciables que se justifiquen económicamente.

La figura 3.5.3 muestra el porcentaje de variación de la resistencia de tierra resultante con relación al número de electrodos y a la separación entre ellos. Fácilmente se puede comprobar que colocando dos electrodos en paralelo el porcentaje de la resistencia de tierra baja aproximadamente a la mitad si aquellos se colocan a una distancia de 50m entre sí, en cambio, disminuye poco si únicamente les separa una distancia de 2m.

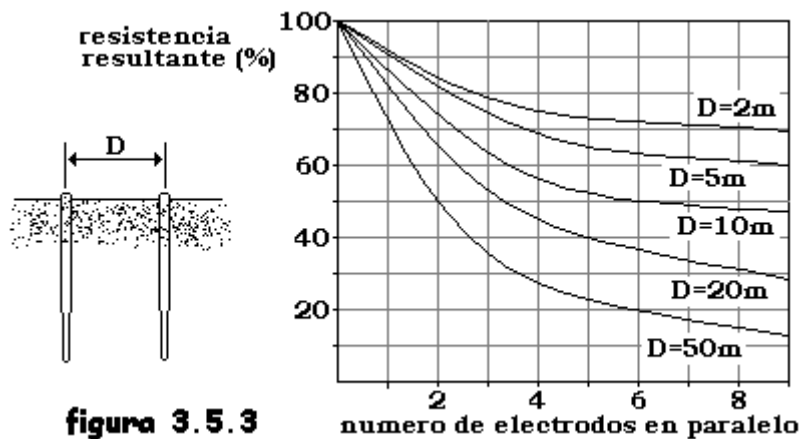


figura 3.5.3

Evaluación de la resistencia de tierra

Las curvas que aquí se ofrecen se han trazado en base a una resistividad del terreno del orden de los 100 ohms por metro, si la resistividad fuera diferente, (ρ_T) , téngase en

cuenta el coeficiente $K = \frac{\rho_T}{100}$.

La figura 3.5.4 ilustra el caso de un electrodo en anillo cuadrado, hecho con cable de 35mm² enterrado a 0.5, 1 y 2 m. Utilizando cables de distinta sección se obtienen variaciones despreciables en el valor de la resistencia de tierra.

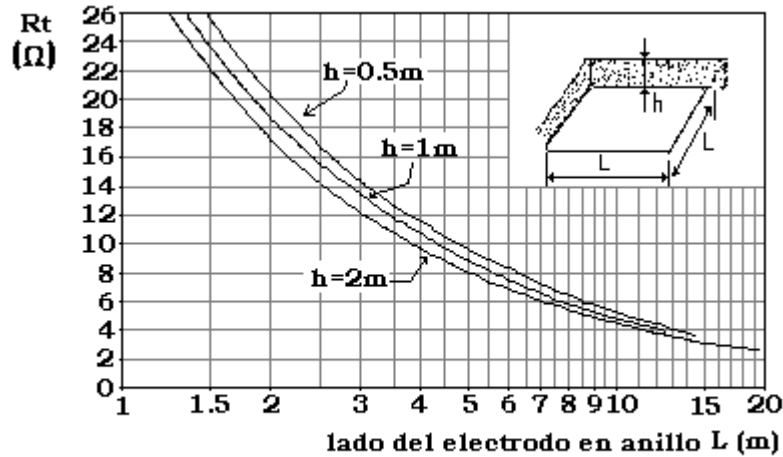


figura 3.5.4

Ejemplos:

- 1- Si la resistencia de tierra R_t , que se desea obtener es de 19 ohms, el diagrama indica que el anillo debe medir 2m por lado, siempre y cuando el cable se coloque a 1m de profundidad y la resistividad del terreno sea de 100 ohms por metro.
- 2- Si se tiene una resistividad del terreno de 400 ohms por metro, y se desea obtener 19 ohms con un cable enterrado a 1m, el desarrollo es el siguiente:

$$K = \frac{\rho_T}{100} = \frac{400}{100} = 4 \quad \frac{R_t}{K} = \frac{19}{4} = 4.75$$

de este último resultado (aplicado al eje de las ordenadas), se deduce que el lado del anillo debe ser de 10m.

- 3- Un cable de cobre de 35mm², enterrado 2m, está dispuesto de modo que forme un cuadro (o un rectángulo de perímetro equivalente) de 20m de lado. Mediante la gráfica se obtiene $R_t = 2.7$ ohms, en el caso de que la resistividad del terreno sea de

$$R_t = K \cdot 2.7 = \frac{200}{100} \cdot 2.7 = 5.4 \Omega$$

200 ohms por metro se tiene:

La figura 3.5.5 muestra un grupo de 4 picas conectadas entre sí con un conductor aislado. Utilizando picas de diferente diámetro se obtienen variaciones despreciables en la resistencia de tierra.

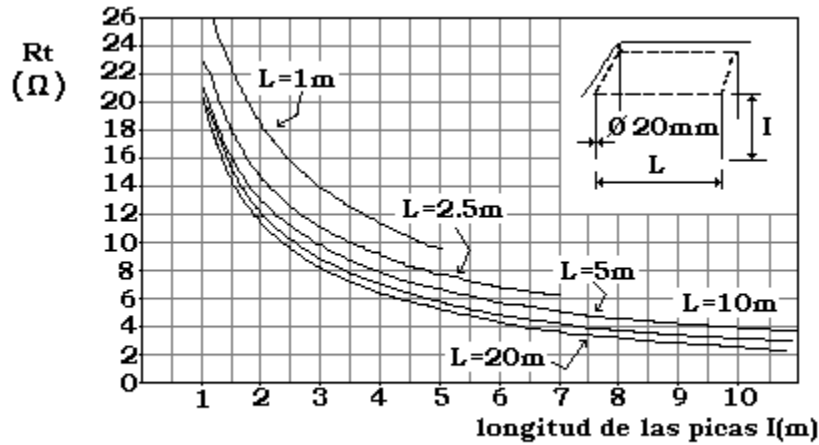


figura 3.5.5

Ejemplos:

- 1- Con 4 picas situadas en los ángulos de una construcción de planta cuadrada y 10m de lado, (o rectangular con un perímetro equivalente), clavadas a 5m de profundidad en un terreno cuya resistividad es de 100 ohms por metro y conectadas con cable aislado de 16mm² (por lo tanto no evaluable a efectos de la resistencia de tierra) se tendrá $R_t = 6.2$ ohms.
- 2- Si la resistividad del terreno es de 200 ohms por metro, y se pretende obtener una resistencia de tierra de 18 ohms con 4 picas situadas a 10m de distancia entre sí, tendremos:

$$K = \frac{\rho_T}{100} = \frac{200}{100} = 2 \quad \frac{R_t}{K} = \frac{18}{2} = 9$$

Localizando este valor en el eje de las ordenadas y utilizando la curva correspondiente a una separación entre picas $L = 10m$, se leerá en el eje de las abscisas la profundidad a la cual deben clavarse, o sea, unos 3,3m aproximadamente.

La figura 3.5.6 muestra un electrodo en anillo cuadrado, hecho con cable desnudo de 35mm², enterrado a 0.5m y complementado con cuatro picas en sus vértices.

Utilizando diferentes secciones de cable y picas cuyo diámetro esté comprendido entre 40 y 60mm, se obtiene una disminución de la resistencia de tierra aunque de orden relativamente moderado, lo mismo se puede decir respecto a enterrar el cable a diferente profundidad.

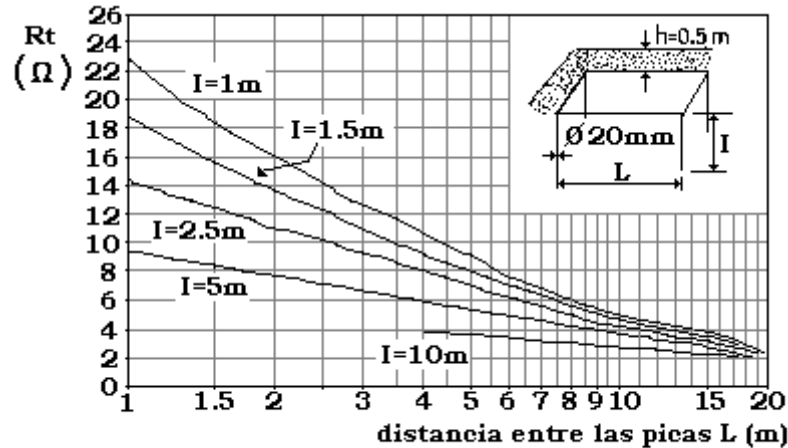


figura 3.5.6

Ejemplos:

- 1- Una instalación de tierra está formada por un cable de cobre desnudo de 35mm², enterrado a 0.5m y dispuesto de modo que forma un cuadrado de 10m de lado. Dicho cuadrado se complementa con cuatro picas situadas en los vértices y enterradas 5m. Cable y picas forman, por lo tanto, un conjunto único de tierra cuya resistencia será aproximadamente de 4.2 ohms, siempre y cuando la resistividad del terreno sea de 100 ohms por metro. De ser distinta, se debe proceder como se ha indicado en los ejemplos de las figuras anteriores.
- 2- Teniendo que llevar a cabo una instalación de tierra, preestableciendo un valor de resistencia, localícese dicho valor en el eje de las ordenadas y, utilizando la curva adecuada, léase en el eje de las abscisas la longitud que corresponde al lado del anillo.

Cabe aclarar nuevamente que la aplicación de las fórmulas y los diagramas de las páginas precedentes, parte del supuesto de que la resistividad del terreno sea homogénea en toda el área donde deberá realizarse la instalación de tierra, de no ser así, habrá que efectuar numerosas mediciones de resistividad y extraer el valor promedio.

Téngase siempre en cuenta la influencia recíproca entre electrodos, según se ha indicado, aún cuando la explicación se limitó a los electrodos de pica, el concepto se extiende a cualquier tipo de electrodo.

Puesta a tierra de grandes masas metálicas

Para conectar a tierra grandes masas metálicas expuestas a las descargas atmosféricas, debe emplearse preferentemente electrodos en forma de picas, la conexión entre distintas partes que no proporcione una garantía de continuidad eléctrica (por ejemplo por existir pintura interpuesta), se deberá efectuar por medio de puentes de unión.

En general el número de derivaciones a tierra (en cobre o hierro galvanizado de sección no inferior a 50mm²) para proteger estas estructuras está en función del perímetro de la estructura metálica que se debe proteger. Se deberán satisfacer las siguientes relaciones:

$$n = \frac{P}{25} \quad R_t = \frac{50}{n}$$

donde:

n: número de derivaciones a tierra con sus picas respectivas

P: perímetro en metros de la estructura

Rt: resistencia total aproximada del conjunto de derivaciones a tierra en ohms

En cualquier caso, el número de derivaciones a tierra nunca será menor a 2.

Por ejemplo, para un cobertizo metálico con un perímetro de 130m se tendrá:

numero de derivaciones

$$n = \frac{130}{25} = 5.2 \text{ redondeando a } 6$$

resistencia total de tierra

$$R_t = \frac{50}{6} = 8.33 \Omega$$

Es posible estimar la resistencia de cualquier sistema de electrodos, pero varios factores pueden afectar el valor calculado debido a variaciones considerables de la resistividad del suelo en una localidad y momento dados.

La resistividad del suelo depende de los materiales que lo componen, el contenido de humedad y la temperatura. Aún si todos los factores son considerados, las fórmulas para calcular el comportamiento de un sistema de tierra se vuelven bastante complicadas y resultan de poco valor, se han desarrollado muchas fórmulas que sin embargo sirven únicamente como guía, el valor real de la resistencia de un sistema de puesta a tierra puede determinarse sólo por medición.

Métodos para determinar la resistencia de tierra

Los equipos portátiles disponibles en el mercado para medir la resistencia de los electrodos de tierra, normalmente pueden utilizarse también para medir la resistividad del suelo. Con este fin, se les conecta a cuatro pequeños electrodos espaciados en línea uniformemente. La separación entre los electrodos del centro es un reflejo directo de la profundidad efectiva que se tiene para obtener cierta resistividad, por ejemplo, una separación de 3m dará la resistividad promedio de los primeros 3m de la capa del suelo, y así en forma sucesiva. Este método de prueba es conocido como el método de Wenner de cuatro postes y es el más popular para determinar la resistividad del suelo. El instrumento entrega una lectura en ohms, la cual, multiplicada por dos veces la separación en centímetros y multiplicada por π , es la resistividad del terreno en ohms por centímetro. Hay varios tipos de instrumentos de medición en el mercado y cada uno de ellos incluyen instrucciones completas para efectuar esta prueba, también existen diferentes métodos para determinar el valor de la resistividad del terreno.

Para determinar la resistencia a tierra de un sistema de protección contra rayos es necesaria su desconexión de cualquier otro sistema de tierra, esto se debe a que los equipos de medición trabajan a frecuencias bajas comparadas con la del rayo, y la resistencia que determinan puede verse afectada por la resistencia de los electrodos de un sistema de potencia o un medio similar de puesta a tierra que puede estar localizado a cientos de metros de la estructura que se desea proteger. La resistencia de tierra usada para calcular los potenciales en los conductores cuando descarga un rayo, debe ser la resistencia en el área inmediata al edificio, no la de sitios remotos que pudiera monitorear el equipo de medición.

Si el edificio es pequeño, y el sistema de protección contra rayos puede desconectarse completamente de otros sistemas de tierra, su resistencia puede medirse usando el método de los tres postes, descrito a continuación; si el edificio es grande o no puede desconectarse por completo el sistema de tierra del sistema de protección, entonces será necesario medir la resistencia individual de cada pica por el mismo método, esta resistencia se multiplicará por un factor que depende del número de picas. El principio para desarrollar estas mediciones está indicado en la figura 3.5.7.

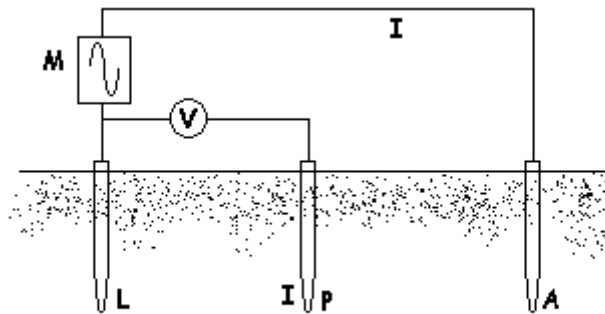


figura 3.5.7

En la figura 3.5.7, L es la pica del sistema de tierra, o el sistema de puesta a tierra, P es una punta de prueba y A es una punta auxiliar, M es un equipo de medición estándar de corriente alterna adecuado para efectuar la prueba.

Una distancia adecuada para LP y LA es de 22 y 36m respectivamente, en general, P debe estar a un 62% de la distancia entre L y A, si 36m no es una distancia conveniente se le puede incrementar (o reducir, a no menos de 15.2m) ajustando LP en forma proporcional.

Una corriente I pasa a través del electrodo o electrodos bajo prueba, L, y por la pica auxiliar A. La distancia LA es larga comparada con la longitud del electrodo. El voltaje V entre L y P es medido por el equipo de prueba, que también mide la corriente I y calcula la resistencia de tierra R.

Se utiliza corriente alterna para evitar errores provocados a factores electrolíticos en el suelo y para eliminar los efectos de corrientes vagabundas. El equipo usado para este método permite una lectura directa de la resistencia y es de un costo relativamente bajo.

Variaciones en la resistividad del suelo provocadas por fluctuaciones en humedad y temperatura pueden afectar las mediciones, un buen diseño deberá considerar la resistencia de tierra bajo condiciones de alta resistividad o condiciones promedio a fin de que el sistema de protección tenga un adecuado desempeño.

Si es necesario medir la resistencia individual de cada pica, se debe multiplicar el valor promedio R_m por un factor que depende del número total de picas, n, separadas entre sí al menos una distancia de 10.7m. La resistencia total del sistema R se determina con la

siguiente fórmula:

$$R = 1.1 \left(\frac{R_m}{n} \right)$$

TABLA 2 Datos de resistividad según la naturaleza de los suelos, o de sus principales materiales constituyentes.

Naturaleza del terreno	Resistividad [omhs x metro]
Terrenos pantanosos	2 a 30
Limos	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Arena arcillosa	50 a 100
Arena silíceas	200 a 3 000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1 500 a 3 000
Piedras calizas blancas	100 a 300
Piedras calizas compactas	1 000 a 5 000
Piedras calizas agrietadas	500 a 1 000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito y areniscas poco alteradas	1 500 a 10 000
Granito y areniscas muy alteradas	100 a 600
Agua de mar	1
Mineral conductor	0.1
Aluviones con agua dulce	20 a 200
Aluviones secos	50 a 100
Aluviones con agua salada	1 a 5

4.5 INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Se comprende que una instalación de protección nueva debe revisarse en el momento de terminar su montaje, sin embargo, es muy importante también hacer inspecciones periódicas a los sistemas ya existentes.

El intervalo de tiempo entre inspecciones se puede determinar con ayuda de factores como:

- a) Clasificación de la estructura protegida
- b) Nivel de protección que brinda el sistema
- c) Medio ambiente inmediato (atmósferas corrosivas)
- d) Materiales con los que están hechos los componentes del sistema
- e) Tipo de superficie en la cual se instalaron los elementos de protección
- f) Reporte de problemas, ampliaciones o modificaciones

Además de los factores citados, un sistema de protección contra rayos debe revisarse siempre que se haga cualquier reparación o alteración a la estructura, así como ante el conocimiento de la ocurrencia de alguna descarga sobre el sistema de protección.

Es recomendable que anualmente se haga una revisión visual del sistema de protección, en zonas donde ocurran severos cambios climáticos puede resultar conveniente efectuar dos o tres revisiones en el mismo periodo; las cuales pueden coincidir al advertir los cambios ambientales de temperatura por ejemplo.

Una inspección más profunda de todo el sistema de protección debe hacerse cada tres o cinco años aunque pudieran hacerse cada uno o tres años dependiendo del medio ambiente en el cual se localiza la estructura así como de su ocupación.

En zonas geográficas en las que se experimenten cambios extremos de temperatura y humedad con las estaciones, es aconsejable también realizar mediciones de resistividad del suelo en los meses secos y calurosos así como durante los meses lluviosos y fríos. Estas inspecciones y pruebas son importantes para asegurar la efectividad de funcionamiento del sistema de protección en cualquier estación del año.

Inspección visual

La inspección visual debe asegurar los siguientes objetivos:

- a) El sistema se encuentra en buen estado
- b) No hay conexiones sueltas, sin apretar o faltantes, que pueden resultar en empalmes de alta resistencia
- c) Ninguna parte del sistema se ha debilitado por corrosión o vibraciones
- d) Todos los conductores de bajada y electrodos se encuentran intactos (no están aplastados, no presentan cortes)
- e) Todos los conductores y componentes del sistema están fijos con firmeza a las superficies, y en su caso están protegidos contra daños mecánicos y desplazamientos
- f) No se han hecho modificaciones o ampliaciones en la construcción que podrían necesitar protección adicional

- g) No existe indicación visual de daño a los dispositivos supresores de sobretensión
- h) El sistema cumple con las especificaciones dadas por los estándares de protección

Inspección y prueba completas

Una inspección y prueba completa del sistema de protección contra rayos incluye una inspección visual, así como las siguientes pruebas:

- a) Verificar la continuidad de aquellas partes del sistema que se instalaron ocultas y que ahora no se encuentran disponibles para una inspección visual.
- b) Medir la resistencia de las terminales a tierra del sistema y de los electrodos individuales si se cuenta con un medio de desconexión simple (la conexión no se hizo con soldadura).

Estos resultados deben compararse con los de pruebas anteriores, el resultado original y los valores aceptados por las normas para las mismas condiciones del terreno.

Si resulta una variación significativa bajo las mismas condiciones de prueba, deberá hacerse una investigación mas profunda para determinar la razón de tales diferencias.

- c) Pruebas de continuidad para determinar si las uniones para igualar potenciales son adecuadas, o si fueron incluidas hacia nuevos servicios o construcciones aumentados desde la última inspección.

Mantenimiento del sistema de protección

El mantenimiento de un sistema de protección es muy importante aún cuando se hayan tomado las precauciones pertinentes en cuanto al dimensionado de los componentes y contra la corrosión.

Muchos componentes del sistema tienden a perder su efectividad con los años debido a factores provocados por la corrosión, el medio ambiente y la propia descarga de los rayos. Las características físicas y eléctricas del sistema de protección deben conservarse a fin de garantizar su adecuado funcionamiento.

Debe establecerse un programa de mantenimiento periódico para todo el sistema de protección, la frecuencia de los procedimientos de mantenimiento dependerá de lo siguiente:

- a) degradación por efectos climáticos
- b) frecuencia de las descargas
- c) nivel de protección requerido

Los procedimientos de mantenimiento del sistema de protección se deben establecer para cada sistema, y deben formar parte del programa de mantenimiento general de la construcción. El programa de mantenimiento debe contar con una lista de pasos que pueda seguirse fácilmente y con regularidad, deben incluirse los siguientes puntos:

- a) revisar componentes y conductores del sistema
- b) apretar abrazaderas, empalmes y puntos de contacto entre elementos
- c) medir la resistencia del sistema

- d) medir la resistencia de los electrodos
- e) prueba de los supresores de sobretensión, si es factible comparar su efectividad con dispositivos más nuevos

Toda esta información, permitirá la oportuna corrección de defectos menores o el reemplazo de aquellos elementos del sistema de protección que hayan resultado dañados por alguna descarga, accidente o de forma intencional.

CAPÍTULO 5

PRÁCTICAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Un sistema de energía eléctrica consiste en una gran diversidad de cargas eléctricas repartidas en una región, las plantas generadoras para producir la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas generadoras a los puntos de consumo y todo el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio y regulación de tensión requeridas por el usuario.

La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción en su suministro causa trastornos y pérdidas económicas insoportables.

Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse las disposiciones necesarias para hacer frente a una falla en algún elemento del sistema, tales disposiciones deben contemplar las posibles fallas y salidas del servicio por descargas atmosféricas.

5.1 Sobretensiones eléctricas.

Sobretensión es una alteración del potencial de un sistema, o parte de él, con la tendencia a sobrepasar ampliamente su valor normal. En cierto modo, la sobretensión es lo contrario de la variación de tensión, aquella significa un aumento, mientras que esta indica una disminución; sin embargo se parecen en que ambas son momentáneas y obedecen a causas ajenas al circuito y de difícil o imposible previsión. Las sobretensiones pueden ser clasificadas, según su origen en externas e internas.

Las sobretensiones internas son resultado de disminuciones o aumentos de carga, o por operación de interruptores, las más elevadas se obtienen al efectuarse la apertura de líneas largas o cables de potencia en vacío, apertura de corrientes de excitación de transformadores o reactancias, y sobre todo cuando se efectúan recierres en líneas que hubieran quedado cargadas a una tensión elevada, al producirse la desconexión inicial. Los elementos utilizados para limitar las sobretensiones por maniobra, van de acuerdo con el tipo y diseño de cada interruptor.

El fenómeno de abrir una corriente y que aparezca una sobretensión, se basa en el principio de la conservación de la energía, es decir, existe una energía cinética debida al flujo de una corriente, al interrumpirse el flujo de ésta, la energía cinética se transforma en energía potencial, apareciendo una tensión eléctrica entre las terminales de los contactos abiertos. Como protección para evitar las sobretensiones de este tipo, cada subestación y planta de energía debe tener una red de tierra bien diseñada a la que se conectan los neutros de los transformadores, los apartarrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos, rejillas y partes metálicas en general que estarán siempre al potencial de la tierra circundante.

Conviene aclarar aquí el término apartarrayos en este tipo de instalaciones, pues algunos autores emplean los términos pararrayos y apartarrayos como sinónimos, lo cual es un grave error, pues cada término identifica a dispositivos totalmente diferentes en forma, construcción y principio de funcionamiento.

Por pararrayos se entiende y será correcto identificar únicamente a los elementos como los que se han identificado en el texto, los apartarrayos; por otra parte, son dispositivos eléctricos formados por una serie de elementos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, operación de interruptores o desbalanceo de sistemas. Estos elementos se conectan directamente entre la línea de alta tensión (uno por fase) y tierra, su operación es la siguiente; el apartarrayos se comporta como un aislador mientras la tensión aplicada no exceda de cierto valor predeterminado, convirtiéndose en conductor al alcanzar la tensión de la línea ese valor, conduciendo a tierra la onda de corriente producida por la onda de sobretensión. Una vez desaparecida la sobretensión, y restablecida la tensión normal, el dispositivo debe ser capaz de interrumpir la corriente y volver a comportarse como un aislador.

Los apartarrayos deben quedar conectados permanentemente a los circuitos que protegen y entrar en operación en el instante en que la sobretensión alcanza un valor convenido superior a la tensión máxima del sistema. Existen varios tipos de apartarrayos con diferentes principios de funcionamiento, además las características del apartarrayo a emplear se deben seleccionar cuidadosamente de acuerdo con las condiciones específicas de cada sistema, esto requiere de un estudio detallado que, debido a su extensión queda fuera del alcance de esta obra.

Las sobretensiones externas pueden ser causadas por:

- a) Absorción de cargas flotantes en la atmósfera. Esta clase se distingue por crecimiento lento del potencial y larga duración. Si el sistema tiene el neutro o un polo conectado a tierra, la carga colectada puede escurrir fácilmente sin que el potencial se altere en forma sensible; pero si el sistema está aislado, la carga no puede escapar y su potencial crece más y más, hasta que se produce una descarga en algún punto, seguida de un arco de polo a polo y de una variación profunda. Sólo cuando la descarga se produce en un pararrayo construido ex profeso, no hay variación.
- b) Influencia de nubes cargadas. Cuando una nube positiva se acerca a la línea, los electrones que a aquella le faltan afluyen de todas partes y tratan de pasarse a la nube. Si el sistema está aislado, sus propios electrones se moverán hacia el lugar más cercano a la nube, y la línea tendrá carga negativa en ese lugar, y positiva en sitios abandonados por los electrones. El potencial de la línea será positivo respecto a tierra, e irá creciendo conforme la nube se acerca, pudiendo llegar a causar una descarga en algún punto débil. Cuando la nube se aleja, las cargas regresan a su origen y las condiciones normales quedan restablecidas.
- c) Rayos indirectos. Supóngase que la nube, antes de irse, descarga sobre un árbol u objeto separado de la línea. En ese momento desaparece el campo de la nube, y la carga negativa de los conductores queda en libertad, pero no es fácil que un alud de electrones sueltos pase a tierra venciendo la resistencia cortical de los conductores y la inductancia general que se opone al establecimiento instantáneo de una corriente de intensidad elevada, aunque la salida a tierra se halle muy cerca. Entonces, es posible y probable que los electrones busquen el primer aislador que se les presenta como una invitación a saltar, y descarguen a tierra en torno suyo, formando un arco de fase a fase en muchas ocasiones.

En tales circunstancias los apartarrayos de estación no ofrecen ayuda importante, y se limitan a recibir los restos de la avalancha de corriente que no pudo salir por la brecha abierta en la línea.

Para este tipo de sobretensiones es prácticamente lo mismo que el sistema esté conectado a tierra, o que esté totalmente aislado; la protección debe ser local, en cada torre, en cada aislador, para que la descarga sea hecha en forma tal que no cause daños graves y su duración se limite al tiempo indispensable.

- d) Rayos directos entre nube y línea. En este caso la sobretensión llega al valor más alto y se forman arcos de fase a tierra en todos los conductores, que en muchos casos se convierten en arcos de fase a fase. Las cargas caídas de la nube, exceden en mucho a las que existían un momento antes en los conductores, estableciéndose una corriente transitoria de gran intensidad entre estos y tierra para dar salida al exceso de carga, o mejor dicho; se forma una poderosa corriente de electrones de tierra hacia la nube, a través de los arcos de los conductores. Los apartarrayos de línea de las estaciones cercanas contribuyen a servir el pedido de electrones, pero están tan lejos, eléctricamente, y hay tanta resistencia e inductancia de por medio que no es posible que ellos solos atiendan el pedido y lo sirvan por completo. Es casi imposible evitar que un rayo directo produzca arcos a tierra en todos o parte de los conductores de transmisión, de manera que, si no destruye los aisladores, corta los cables y funde parte de una torre, o hace astillas de los postes, el rayo directo causa interrupción en el circuito por la sobrecorriente que se establece a través de dos o más arcos a tierra en polos diferentes. Si el sistema esta conectado a tierra originalmente, basta un solo arco para hacer salir la línea del sistema.
- e) Cruzamiento de la línea con otras de mayor tensión, debido a fallas mecánicas en los conductores, aisladores o apoyos, inducción eléctrica o magnética de circuitos paralelos, etc. Las reglas de seguridad, transposiciones correctas y numerosas, y la desconexión inmediata de la línea causante y de la dañada, son los remedios indicados.

5.2 Plantas generadoras y subestaciones.

Las plantas generadoras de energía y las subestaciones eléctricas deben contar con sistemas de protección contra descargas atmosféricas directas.

Mástiles, conductores elevados (hilos de guarda) o ambos deben utilizarse para conseguir esta protección, también, será necesaria la unión de estos elementos con la usual malla de tierra utilizada en dichas instalaciones.

El hilo de guarda es un conductor desnudo, de 9.5 a 19mm de diámetro, comúnmente fabricado con alambre de acero galvanizado, cobre duro, ACSR (cable de aluminio reforzado con acero), copperweld, bronce fosforado, etc. sujeto directamente a la parte más alta de las torres o postes y con numerosas conexiones a tierra. El cable de guarda bien instalado va a disminuir la carga inducida por la nube en la línea o estructura que está protegiendo, al ofrecer inmediatamente cargas traídas del suelo en cantidad ilimitada para satisfacer las necesidades del campo de la nube, es por esto que el cable debe tener muy amplia comunicación con tierra, una mala conexión a tierra nulifica el efecto protector del cable.

Si el cable está bien situado y bien conectado, puede suceder alguno de lo siguientes casos: a) que sea el único conductor en la línea tocado por la descarga, es poco probable, pero no imposible, todo depende de la conductancia a tierra de ese cable, b) que la mayor parte de la corriente transitoria sea conducida por él, de donde resulta una disminución considerable de la sobretensión para el sistema, c) que los rayos indirectos de mediana magnitud hagan flamear los aisladores de una sola fase, en lugar de afectar a los tres polos y causar una falla de aislamiento de polo a polo, inevitable con grandes magnitudes.

Se sabe que la causa principal de las sobretensiones que afectan a subestaciones y plantas de energía es la incidencia directa de los rayos sobre las líneas de transmisión o sus proximidades, siendo necesario proteger instalaciones y equipo, se considera que si las líneas entrantes y salientes de dichas instalaciones están protegidas con hilos de guarda una cierta longitud antes y después de la subestación, el blindaje es bueno y se puede considerar que es poco probable que los rayos incidan sobre los conductores de fase en la zona considerada.

Se recomienda la protección de estas líneas de transmisión por medio de un conductor unido a tierra colocado por encima de la línea por lo menos en los primeros 610m (2000 pies) medidos a partir de la estación. Este cable excluirá las descargas directas en esa sección de la línea y reducirá el trabajo de los apartarrayos de la estación.

La distancia entre los hilos de guarda y los conductores de fase no debe ser menor que el nivel de aislamiento básico de impulso del sistema, de otro modo, pueden ocurrir descargas laterales hacia los conductores de fase, lo que provocaría salidas del servicio innecesarias. Es altamente recomendable disponer de conductores aéreos conectados a tierra sobre líneas de energía que operen con tensiones menores a los 66kV, especialmente si dichas líneas operan en o atraviesan regiones con altos niveles cerámicos. (Hay que recordar que las sobretensiones de origen atmosférico afectan mayormente a los sistemas de 230kV y menores, mientras que para tensiones mayores a los 230kV tienen mayor efecto las sobretensiones debidas a la operación de interruptores).

La protección contra rayos de las plantas generadoras y subestaciones incluye la protección del equipo de estación con supresores de tensión o apartarrayos, estos dispositivos deben montarse sobre o en la cercanía de los armados del equipo principal que van a proteger, especialmente los transformadores. Pueden también instalarse en los armados de acero de las subestaciones, donde todos los componentes están interconectados por medio de la malla de tierra. Para una protección satisfactoria, dicha red de tierra, debe tener una resistencia, en subestaciones de transmisión de potencia menor a 1 ohm, mientras que en subestaciones de distribución debe ser menor a 5 ohms.

Blindaje

Es una malla formada por cables de guarda que se instalan sobre la estructura de la subestación.

Cables de guarda. Se entiende por cables o hilos de guarda una serie de cables desnudos, generalmente de acero, que se fijan sobre la estructura de una subestación, formando una red que actúa como un blindaje para proteger las partes “vivas” de la subestación contra descargas atmosféricas directas.

La red de cables de guarda actúa como contraparte del sistema de tierra, a veces se la complementa o se sustituye con una serie de bayonetas (terminales de descarga) de tubo de acero galvanizado, también conectadas a la red de tierra de la instalación, que se fijan en la parte superior de los remates de las columnas de la estructura de la subestación.

La altura de los hilos de guarda es máxima en el punto donde un 60% de los rayos suelen caer en las torres y un 40% en el claro.

El número de descargas atmosféricas que ocurren sobre un cable de guarda depende del nivel cerámico de la región. Si se considera un nivel cerámico de 30 días/año, la densidad de las descargas (N_g) será:

$$N_g = 0.063(30)^{1.25} = 44 \text{ descargas /km}^2$$

El área expuesta de los hilos de guarda se puede obtener de forma aproximada por la fórmula $A = L (2R_a + S_g)$, en donde:

L: longitud del conductor en metros

S_g : distancia entre hilos de guarda (para este ejemplo, unos 10.36m o 34 pies)

Ra: radio de atracción dado por $R_a = 14.4(h)^{0.44}$

h: altura de la estructura en metros (para el ejemplo, 30.48m o 100 pies)

$$R_a = 14.4(30.48)^{0.44}$$

N_c : nivel cerámico

N_r : número de rayos que recibe el hilo de guarda/km/año

Si el índice cerámico es de 4 rayos por km cuadrado al año, el número de rayos que recibe el hilo de guarda por km y por año es de $N_r = N_c (0.14)$

$$N_r = 4 (0.14) = 0.56 \text{ rayo / km / año}$$

De acuerdo con lo anterior el área de descarga sobre un hilo de guarda es

$$A = L (2 \times 64.76 + 10.36) = 140 \text{ m}^2 / \text{m de conductor}$$

Para el caso unitario en que $L = 1\text{m}$.

El número de salidas por torre / 100 km / año = N_s y como el 60% de los rayos tocan la torre; $N_s = N_r \times 0.6 \times P$, donde P, es la probabilidad de arqueo que se considera con un promedio de 25%, por lo que: $N_s = 0.56 \times 0.6 \times 0.25 = 0.084$, es decir, se tienen 0,084 salidas / torre /100km / año.

El índice de salidas disminuye a medida que se utilizan torres más pequeñas. A mayor número de hilos de guarda, menor índice de salidas por 100km y por año.

Para el cálculo del blindaje se puede utilizar de igual forma, más o menos aproximada, el método electrogeométrico.

El cálculo del blindaje a partir del método electrogeométrico se desarrolla de la siguiente forma:

La tensión que aparece en los conductores se calcula en forma análoga a las líneas de transmisión $V = \frac{Z_0 \times I_0}{2}$ donde;

I_0 : corriente de rayo obtenida de curvas de distribución de la corriente de rayos

Z_0 : impedancia característica de los conductores

La corriente de rayo y la impedancia característica se pueden determinar también por las siguientes expresiones:

$$I_0 = \frac{2 \times (TFC)}{Z_0} \quad ; \quad Z_0 = 60 \log \frac{2Y}{r_e} \quad \Omega$$

donde:

TFC : tensión crítica de flameo

r_e : radio externo del conductor

Y : altura efectiva del conductor,

que a su vez se determina por: $Y = Y_t - \frac{2}{3} f$

donde:

Y_t : altura de remate del conductor en la torre (m)

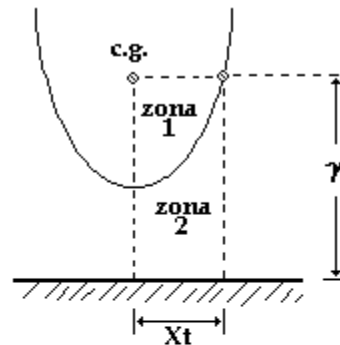
f : flecha del conductor (m)

El modelo electrogeométrico de blindaje considera a I_0 como el valor de la corriente mínima que produce salidas de la instalación por falla del blindaje.

Esta corriente establece una distancia r_{cf} llamada radio crítico de flameo, respecto a los conductores más elevados de la subestación, y cuya expresión es

$$r_{cf} = 9.06 \times (I_c)^{2/3}$$

En el modelo electrogeométrico se considera que al quedar protegidos los conductores más altos de una subestación, los niveles inferiores quedan automáticamente protegidos, además se considera que la zona de atracción de los rayos en el hilo de guarda genera una parábola, tal como indica la figura 5.1



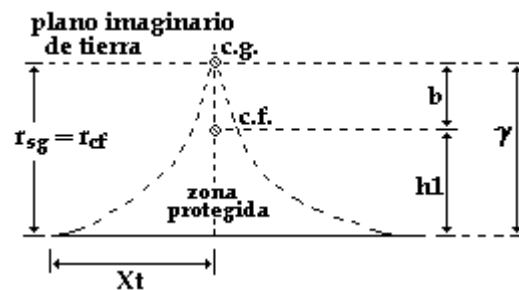
Zona de atracción de un rayo

γ : altura del cable de guarda sobre el suelo en metros

X_t : distancia máxima a la que se localizan los puntos protegidos por el cable de guarda

figura 5.1

En la figura 5.2 se observa la posición del cable de guarda (c.g.), y del cable de fuerza (c.f.) por proteger, la elaboración del modelo electrogeométrico se realiza considerando la zona de protección limitada por dos parábolas que parten de los cables de guarda.



Protección de un cable de fuerza

h_1 : altura máxima del objeto por proteger, ubicada exactamente debajo del hilo de guarda

r_{sg} : altura del plano imaginario

figura 5.2

Normalmente se considera que:

$$r_{sg} = \gamma \quad \text{o bien ;}$$

$$r_{sg} = r_{cf} \quad \text{cuando } r_{cf} < \gamma$$

por lo que la altura maxima del cable de fuerza será :

$$h_1 = 2r_{cf} - \gamma$$

Como en realidad los cables de guarda no se instalan exactamente encima de los cables a proteger, entonces conviene establecer la protección por zonas, como se indica en la figura 5.3, donde aparece la magnitud θ_B que se denomina ángulo del blindaje.

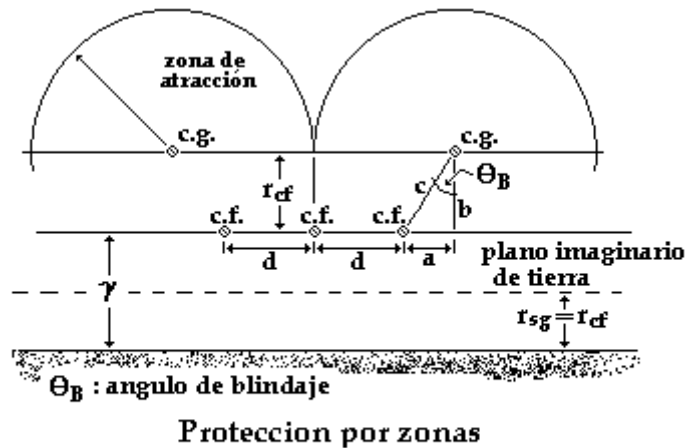
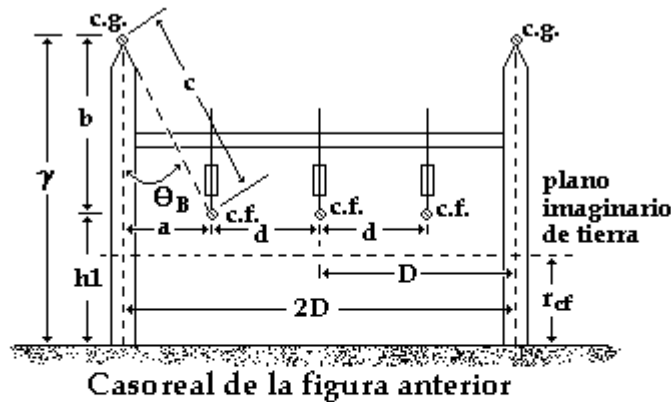


figura 5.3

La figura 5.4 representa el caso real de la figura anterior.



- | | |
|---|--|
| a: distancia horizontal entre c.f. y c.g. | r_{cf}: radio crítico de flameo o radio de la zona de atracción |
| b: distancia vertical entre c.f. y c.g. | d: distancia entre fases |
| c: distancia entre centros de los cables c.f. y c.g. | θ_B: ángulo de blindaje |

figura 5.4

Con estos datos se pueden determinar dos de las cuatro variables a, b, c, θ_B

Normalmente, r_{sg} que es la altura del plano imaginario de tierra, es igual a la altura h del cable de guarda. La altura mínima de las posibles posiciones que pueden ocupar los

cables de guarda se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$b_{\min} = r_{cf} - \sqrt{r_{cf}^2 - D^2}$$
 Dividiendo miembro a miembro entre d , y considerando que D es mayor o igual a d :

$$\frac{b_{\min}}{d} = \frac{r_{cf}}{d} - \sqrt{\left[\frac{r_{cf}}{d}\right]^2 - 1}$$

El área total de la subestación A , se puede dividir en n subáreas a , (puede ser el área de un módulo), o sea: $n = \frac{A}{a}$, el número de áreas consideradas puede ser el número de módulos más el número de bancos $a = 2D \times L$. El área de un módulo que se va a proteger es: $a = 2D \times L$.

$$X_t = \frac{a}{120}$$

La distancia protegida, de la figura 5.2,
 El número de cables de guarda (N_{cg}) requeridos para el blindaje del área A es:

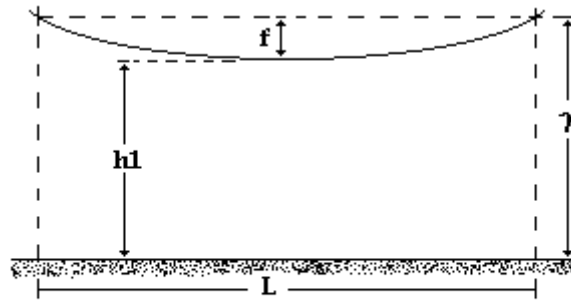
$$N_{cg} = \frac{30n}{L} = \frac{30n}{2D}$$

donde; N_{cg} es el número de cables de guarda, y n es el número de subáreas en que se divide el área A .

La separación entre los cables de guarda, en la figura 5.4 es de $2D$, es decir; $2D = 2Xt$
 La altura mínima del cable de guarda se calcula a partir de:

$$\gamma = \frac{2}{3} h_1 + \sqrt{\frac{1}{9} h_1^2 + \frac{1}{3} \left[\frac{L}{2} \right]^2}$$

tomada de la figura 5.5



Alturas entre dos soportes de cable

figura 5.5

Ejemplo:

Comprobar el blindaje, por medio de cables de guarda, de un módulo de 85kV, cuyo $NBI=500kV$.

Tensión crítica de flameo:

$$TCF = \frac{NBI}{0.962} = \frac{550}{0.962} = 572kV$$

$$* TCF = \frac{NBI}{0.922} \text{ para sistemas de más de } 300kV$$

Suponiendo una impedancia característica de 200 ohms:

$$Z_0 = 200 \Omega$$

$$I_0 = \frac{2 \times 572}{200} = 5.72kA$$

cuya corriente establece un radio crítico de flameo de:

$$r_{cf} = 9.06 (I_0)^{2/3} = 9.06 (5.72)^{2/3} = 29\text{m}$$

La distancia entre los ejes de las columnas que forman el módulo que contiene los cables de guarda es de 10m, o sea:

$$\begin{aligned} 2D &= 10\text{m} \\ D &= 5\text{m} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la altura mínima de las posibles posiciones que pueden ocupar los cables de guarda es de:

$$b_{\min} = r_{cf} - \sqrt{r_{cf}^2 - D^2} = 29 - \sqrt{29^2 - 5^2} = 0.434\text{m}$$

Si se considera que los cables de guarda se encuentran a una altura de 14.90m, la altura máxima a que puede instalarse el equipo bajo protección h_1 es de:

$$\begin{aligned} \gamma &= 14.9\text{m} \\ h_1 &= 2r_{cf} - \gamma = (2 \times 29) - 14.9 = 43\text{m} \end{aligned}$$

aunque el valor real viene dado por la expresión:

$$\gamma_{\text{real}} = h_1 - r_{cf} = 43 - 29 = 14\text{m}$$

Finalmente, se puede calcular la altura mínima a la que deben instalarse los cables de guarda, sabiendo que los cables de fuerza (c.f.) se encuentran a $h_1 = 12.4\text{m}$ sobre el nivel del suelo, es decir:

$$\begin{aligned} h_1 &= 12.4\text{m} \\ L &= 5\text{m} \\ \gamma &= \frac{2}{3} h_1 + \sqrt{\frac{1}{9} h_1^2 + \frac{1}{3} \left[\frac{L}{2} \right]^2} \\ \gamma &= \frac{2}{3} (12.4) + \sqrt{\frac{1}{9} (12.4)^2 + \frac{1}{3} \left[\frac{5}{2} \right]^2} \\ \gamma &= 12.64\text{m} \end{aligned}$$

Como los cables de guarda se consideraron originalmente a $\gamma = 14.9\text{m}$, el resultado anterior indica que la protección contra rayos es adecuada para el ejemplo.

Método de bayonetas.

Las bayonetas son piezas de tubo de hierro galvanizado, con su extremo superior cortado en diagonal, terminado en punta, de una longitud variable que depende de la zona que va a proteger, y con un diámetro que depende de la longitud del tubo, por ejemplo se puede considerar una longitud de 3m de largo por 32mm de diámetro.

Las bayonetas constituyen un método adicional de protección contra las descargas atmosféricas directas, aunque no siempre son necesarias si la red de cables de guarda está correctamente calculada. Éstas actúan como electrodos que provocan, mediante el efecto de punta, la concentración de cargas electrostáticas. Dichos electrodos pueden tener diferentes configuraciones como las siguientes:

- Varilla o tubería terminada en punta biselada, que son las más utilizadas en la parte superior de las columnas de las estructuras que sostienen los buses.
- Varillas terminadas en punta esférica, no se acostumbra su uso, pero en pruebas efectuadas resultan ser más efectivas que las anteriores.
- Conductor desnudo, instalado en forma horizontal (cable de guarda), parece ser el más eficiente de los tres casos.

En los electrodos utilizados para descarga de rayos es más importante reducir la inductancia de los cables de conexión a la red de tierra que la propia punta del electrodo.

Las bayonetas se colocan sobre las partes más altas de las estructuras, sobre los capiteles de las columnas, protegiendo un área igual a la sección del cono que corta. El ángulo de protección máxima del cono se ha determinado, en forma experimental, de 30 grados respecto a su eje, aunque se acostumbra en algunos casos llegar a utilizar ángulos de hasta 45 grados.

La zona de protección de una bayoneta se determina a partir de la distancia llamada radio crítico de flameo r_{cf} de la figura 5.6 se tiene:

r_{sg} : altura del plano de tierra imaginario

K_{sg} : constante del efecto de tierra. Su valor depende del nivel cerámico del lugar de la instalación de acuerdo con

$$0.8 \leq K_{sg} \leq 1.0$$

X_t : distancia radial de protección

θ_B : ángulo de blindaje

A : área protegida al nivel del suelo $A = \pi X_t^2$

b : altura total de la estructura más la bayoneta

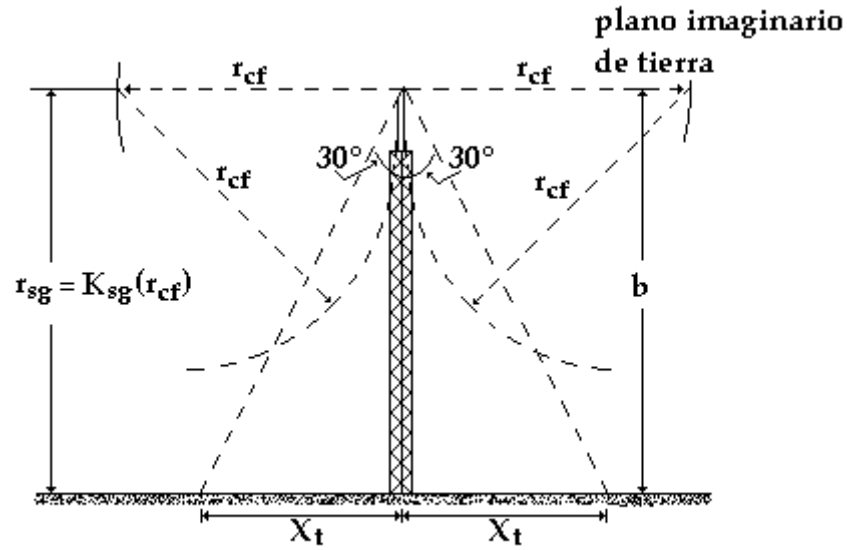
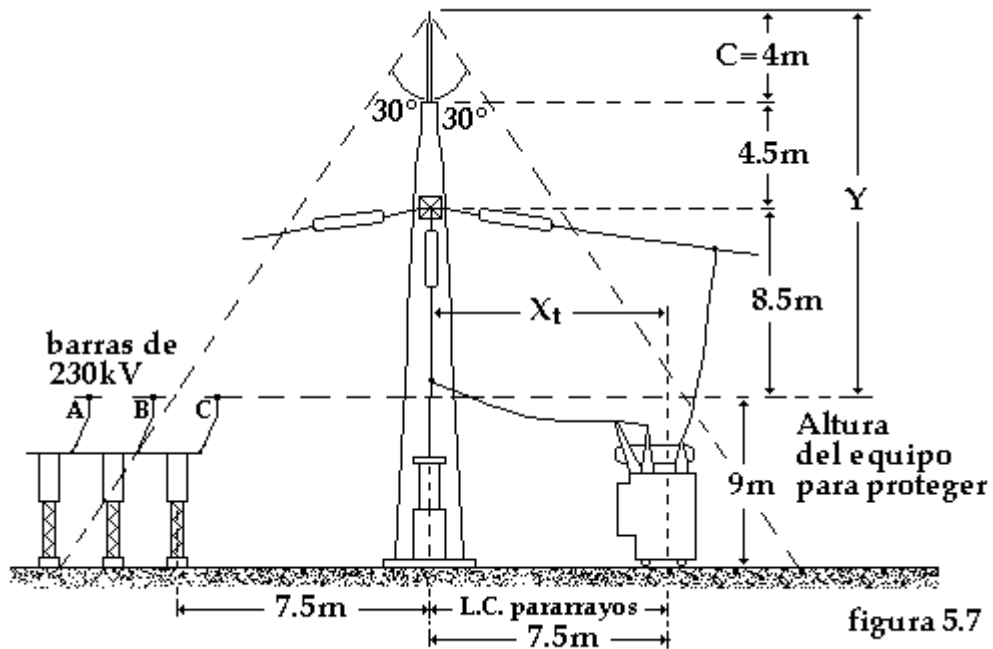


figura 5.6

En la práctica, para normalizar las dimensiones de todas las bayonetas de una instalación, se calcula la más crítica y todas las demás se fabrican de la misma longitud, aún quedando excedidas.

Ejemplo:

Dimensionar las bayonetas en un módulo de 230kV, en la zona de transformadores de 230/85kV, para proteger de descargas directas al equipo circundante, tal como indica la figura 5.7.



En la figura, si se considera la longitud de la bayoneta $C=4\text{m}$, la distancia horizontal X_t protegida por la bayoneta es:

$Y = \text{altura de la estructura} + \text{longitud de la bayoneta} - \text{altura del equipo por proteger}$

$$Y = 22 + 4 - 9 = 17\text{m}$$

La distancia horizontal a la altura del equipo por proteger se obtiene:

$$X_t = Y \tan(30^\circ) = 17 \tan(30^\circ) = 9.81\text{m}$$

Distancia que cubre el transformador, el apartarrayos y parte de las barras de 230kV.

Ejemplo:

Dimensionar las bayonetas para proteger un módulo de 23kV, de acuerdo con la figura 5.8

En este caso, se requiere que las bayonetas protejan la fase central. Suponiendo que la fase central se encuentra a $X_t=2\text{m}$, y suponiendo un ángulo de blindaje de 30° :

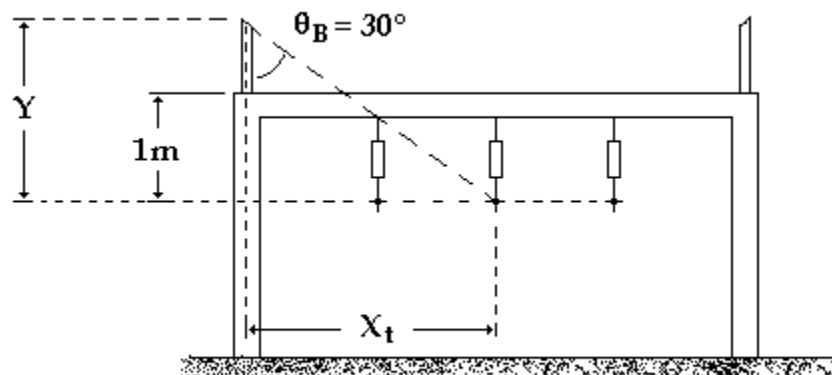


figura 5.8

$$Y \geq \frac{X_t}{\tan 30} = \frac{2}{0.577} = 3.46\text{m}$$

lo que proporciona que la altura de la bayoneta sea:

$$C = Y - 1 = 3.46 - 1 = 2.46 \text{ m}$$

es decir, en la práctica se fijaría una bayoneta de 3m de largo.

5.3 Líneas de transmisión.

Desde el punto de vista de las descargas atmosféricas, el proyecto de una línea de transmisión involucra la determinación de los siguientes elementos:

- distancias eléctricas
- ángulo de blindaje
- puesta a tierra

Los cuales son ajustados de modo de determinar una tasa de salidas de servicio preestablecida en los criterios básicos de proyecto. Falta analizar la mejor ubicación de los cables de guarda, si es que están presentes, y el comportamiento de la construcción frente a las descargas atmosféricas.

A medida que aumenta la tensión de la línea, los eventos de origen atmosférico disminuyen en importancia para la determinación de las distancias, siendo la tasa de fallas inferior debido al aumento del nivel de aislamiento de las líneas.

El efecto de una descarga atmosférica, cuando ésta supera cierta magnitud, es iniciar un arco entre fases, o más comúnmente entre fase y tierra o hacia partes de la estructura a tierra. En la mayoría de los casos la tensión de línea es suficiente para mantener el arco iniciado, y este debe ser eliminado por la apertura de un interruptor.

La incidencia de las descargas atmosféricas en los sistemas eléctricos se debe analizar en tres aspectos principales:

- a) Falla de blindaje, se analiza la incidencia de la descarga directamente sobre el conductor. La ocurrencia de una falla de aislamiento depende principalmente de la intensidad de la corriente del rayo, de la impedancia de los conductores, aislamiento del sistema y del valor de la tensión de fase en el momento de la descarga.
- b) Contorneo inverso, la descarga incide en la torre o en el cable de guarda pero se propaga a los conductores. Este estudio involucra una gran cantidad de parámetros de origen aleatorio; corriente del rayo, aislamiento del sistema, puesta a tierra de las torres, etc, por tal razón, se lo trata generalmente con métodos estadísticos.

- c) Acoplamiento capacitivo, la descarga incide en las proximidades de la línea, y la sobretensión inducida provoca una descarga. Para líneas de más de 69kV, la posibilidad de que ocurran fallas por esta razón se considera despreciable.

Fallas de blindaje. Descargas directas.

Una descarga atmosférica impactando directamente en el conductor de fase desarrolla una elevada sobretensión, la que en la mayoría de los casos, provocará la falla de aislamiento de la línea.

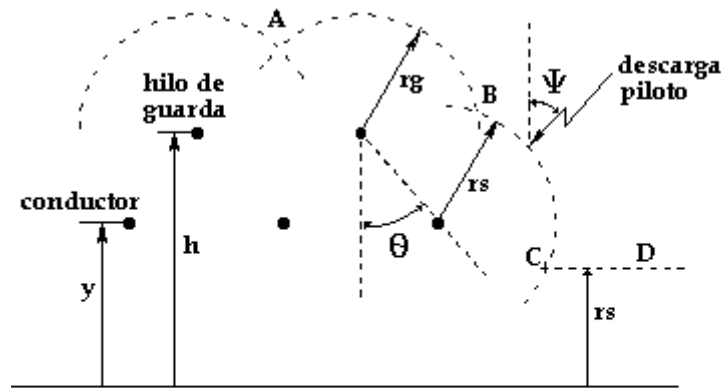
Se estima que el 50% de los rayos supera los 30kA, y por ejemplo, un rayo de 30kA impactando en un conductor de fase de una línea desarrollará una tensión de:

$$V = \frac{I \times Z}{2} = \frac{30\text{kA} \times 400}{2} = 600\text{kV}$$

suponiendo una impedancia de 400 ohms para la línea, el 2 tiene en cuenta que la línea se prolonga hacia ambos lados del punto de impacto.

Obviamente, líneas y muchos otros equipos no pueden aislarse para soportar sobretensiones de ese orden, la alternativa es limitar las sobretensiones a valores inferiores, esto se consigue utilizando cables de guarda, de manera de blindar los equipos y circuitos contra descargas directas.

La base de este modelo es el establecimiento de una relación entre la intensidad de la corriente del rayo y la región de alcance del extremo de la descarga piloto (líder), la que permite establecer que un rayo, en su trayectoria hacia la tierra tiene preferencia en alcanzar los objetos más próximos, esta relación, entre la intensidad de la corriente y la distancia de atracción puede comprenderse mejor si consideramos que campos eléctricos de gran intensidad se establecen alrededor de una línea de transmisión debido a cargas desviadas por la descarga piloto en su progresión hacia el suelo, provocando un movimiento ascendente de cargas que va en dirección a la punta de la descarga piloto, este movimiento de cargas ascendentes puede desviar el rayo de su trayectoria inicial atrayéndolo hacia la tierra, el conductor o el cable de guarda. De este modo, se puede afirmar que el punto de impacto en la línea queda indefinido hasta que la descarga piloto alcance una determinada distancia sobre el suelo, ocurriendo entonces la orientación definitiva en función de las cargas ascendentes, hacia el punto de impacto; suelo, conductor de fase o cable de guarda. Estas tres posibilidades se observan en la figura 5.9, que muestra el modelo electrogeométrico; los cables de guarda, conductores, la descarga piloto, el ángulo de protección, la distancia de incidencia, el ángulo de incidencia. Utilizando el concepto de distancia de atracción, el punto de incidencia sería aquel que se encontrará primero a esta distancia de la punta de la descarga piloto cuando el rayo se mueve en dirección de la línea de transmisión.



θ : ángulo de protección
 r_s : distancia de incidencia
 Ψ : ángulo de incidencia

figura 5.9

Las distintas regiones AB, BC, CD, de la figura 5.9 representan las áreas de exposición para los cables de guarda, el conductor y el suelo, respectivamente. Para cada valor de corriente del rayo, la distancia de incidencia define una superficie ABCD para la cual todas las descargas que crucen el tramo BC terminarán en el conductor.

En la figura 5.10, se observa que el arco de exposición BC se reduce al aumentar la corriente de descarga, o lo que es lo mismo, con la distancia de incidencia, hasta tornarse nulo para una distancia d_3 llamada crítica, de esta forma, corrientes de rayos de valores más elevados siempre serán desviados hacia el cable de guarda o hacia el suelo.

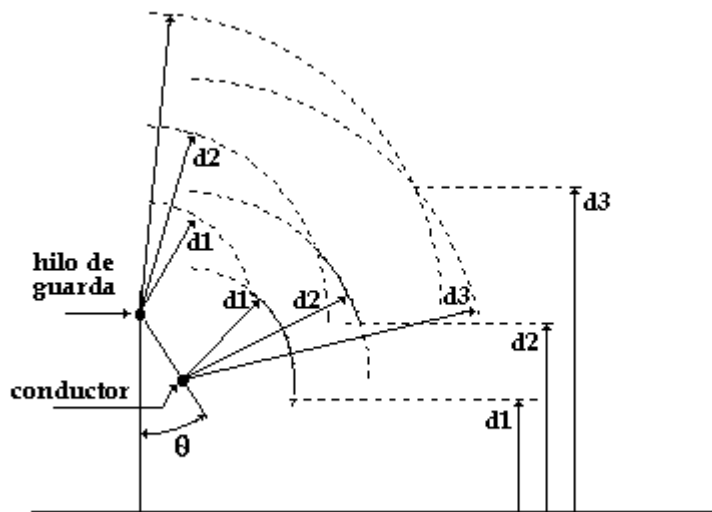


figura 5.10

Para corrientes menores, el área de exposición aumenta pero la sobretensión debida a la descarga se reduce, no debiendo ocasionar falla de la línea. Surge un criterio para dimensionar el aislamiento de la línea; debe soportar una sobretensión correspondiente a la distancia de incidencia crítica de los conductores. Modificando el ángulo de blindaje se modifica el valor de la máxima corriente que puede alcanzar al conductor, es posible entonces ubicar los cables de guarda de manera tal que para una corriente máxima el conductor esté protegido naturalmente, y corrientes menores no puedan causar la ruptura del aislamiento, en esta situación sólo las descargas con intensidad de corriente inferior a la mínima necesaria para causar fallas podrán alcanzar al conductor.

La máxima distancia de incidencia, relativa a la máxima corriente que ocasiona una falla en los conductores puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$r_{\text{máx}} = \frac{h + Y}{2 \operatorname{sen} \theta}$$

donde:

$r_{\text{máx}}$: máxima distancia de incidencia
distancia crítica (m)

h : altura el cable de guarda

Y : altura del conductor

θ : ángulo de protección

Se debe destacar que no siempre es posible un blindaje electrogeométrico completo, en toda la línea, según el dimensionamiento adecuado del ángulo de protección de los conductores. Para líneas de alta tensión y extra alta tensión, gran número de descargas en el conductor no causaran la falla de la línea porque su aislamiento es suficiente para soportar las tensiones generadas por una descarga de pequeña amplitud. Estas sobretensiones se propagan por la línea hasta la estación, donde en función de los cambios de impedancia y las discontinuidades; reactor, transformador, interruptor, etc., pueden aparecer elevadas sobretensiones de reflexión.

Impacto directo sobre el cable de guarda.

La incidencia de una descarga atmosférica en los cables de guarda o en la torre de una línea de transmisión puede ocasionar su salida de servicio debido al crecimiento de la tensión en el punto de incidencia de la descarga.

A diferencia del impacto directo, la ocurrencia de fallas a consecuencia de este fenómeno difícilmente es eliminado, sin embargo, estos efectos pueden minimizarse a través de la optimización de las puestas a tierra de las estructuras y del ajuste de los elementos del cabezal de la torre.

Descargas en las torres.

Cuando un rayo impacta una torre se establece un proceso de propagación de ondas de tensión y corriente en los cables de guarda, en las torres próximas y en los sistemas de puesta a tierra, con reflexiones según las impedancias involucradas.

La tensión resultante de la descarga atmosférica es el producto de la corriente del rayo por la impedancia equivalente vista en ese punto, para la descarga en la torre, la impedancia equivalente es el paralelo de las impedancias de los cables de guarda (Z_g), con el factor que corresponde a que los cables se alejan del punto de contacto en ambas direcciones (2), y la impedancia de la torre (Z_t), esto es:

$$Z = Z_t // Z_g // Z_g$$

$$Z = \frac{Z_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}$$

Esta onda de tensión resultante está modificada por reflexiones en la base de la torre y en las torres adyacentes. La propagación de un impulso de tensión en los cables de guarda induce en los conductores de fase ondas de tensión acopladas según la relación de capacitancias propias y mutuas entre cables de guarda y conductores. Las tensiones involucradas son de igual polaridad y K veces la tensión del cable de guarda.

De esta manera, la cadena de aisladores estará sometida a la diferencia de tensión entre la punta de la torre y la tensión inducida en el conductor

$$V_t = I Z$$

$$V_g = (1 - K) V_t = \frac{(1 - K) I Z_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}$$

siendo K del orden de 0.15 a 0.3

El valor de la resistencia de pie de torre (R), es bastante significativo para el desarrollo de la tensión en la punta de la torre porque, siendo normalmente inferior a la impedancia de la torre (Z_t), es este el objetivo de un buen proyecto, el coeficiente de reflexión para las ondas reflejadas en la base de la torre es negativo, lo que provoca una acentuada reducción del crecimiento de la tensión en la punta de la torre que se presenta en un tiempo pequeño.

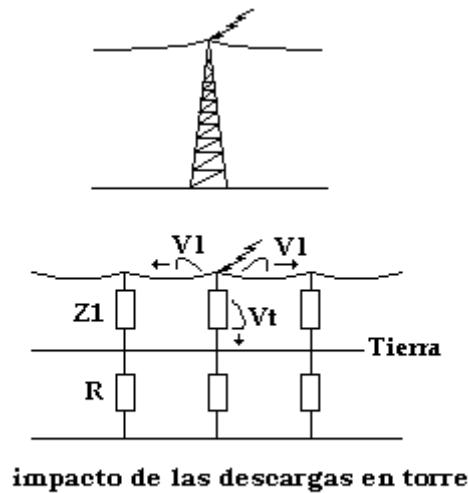


figura 5.11

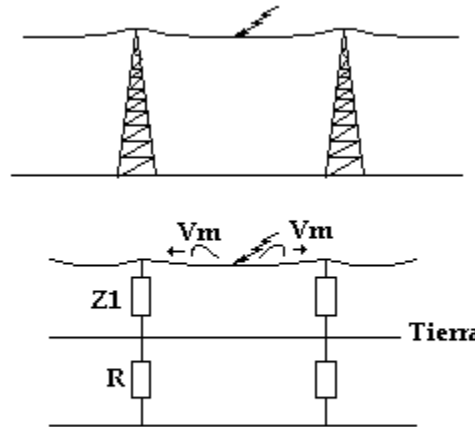
El coeficiente de reflexión de las ondas reflejadas en las torres adyacentes también es negativo, pero el tiempo de propagación de la onda en el vano es del orden de 10 veces el tiempo de propagación en la torre, éstas ondas reflejadas llegan a la torre donde se ha producido el impacto posteriormente a la presentación del máximo de tensión en el extremo de la torre.

Descargas en el vano del cable de guarda.

La incidencia de la descarga en los cables de guarda presenta como característica básica una tensión en el punto de incidencia superior al caso de impacto en la torre debido a la impedancia distinta. La tensión resultante es:

$$V_m = \frac{I Z_g}{2}$$

Esta tensión tendrá valores mayores cuanto mayor sea la distancia del punto de impacto respecto a las torres, siendo máximo el crecimiento de tensión para una incidencia en el medio del vano. Este hecho se entiende si se considera que la impedancia equivalente en el punto de impacto es superior al caso de impacto en la torre, y el efecto de las torres (ondas reflejadas negativas), sólo se presenta después de pasado dos veces el tiempo de propagación a la torre más cercana. La tensión $(1 - K)V_m$, a la cual está sometido el aislamiento en aire entre los cables de guarda y los conductores es considerablemente mayor que la tensión a la que es sometida la cadena de aisladores si una descarga de igual intensidad hubiera impactado en la torre. Normalmente la flecha de los cables de guarda es inferior a la de los conductores; éstos estarán suficientemente alejados para impedir la ocurrencia de fallas debidas a ruptura de la rigidez del aire entre conductores y cable de guarda a lo largo del vano.



Impacto de las descargas en medio del vano

figura 5.12

Asumiendo que no ocurren fallas en el medio del vano, la tensión V_m viajará por los cables de guarda hacia las torres adyacentes donde será atenuada por las reflexiones, la torre es una discontinuidad para V_m , en ella se producen reflexiones y refracciones, de las cuales una onda seguirá al próximo vano por el cable de guarda, y la otra se propagará por la torre drenándose hacia el suelo.

La tensión en el extremo de la torre será: $V_t = bV_m$ siendo b el coeficiente de refracción:

$$b = \frac{2Z}{Z + Z_g}, \text{ donde } Z \text{ es la impedancia equivalente del cable de guarda y la torre;}$$

$$Z = \frac{Z_g Z_t}{Z_g + Z_t} \quad \text{resultando:} \quad V_t = \frac{Z_t V_m}{Z_t + \frac{Z_g}{2}}$$

La tensión a la que en este caso se somete la cadena de aisladores será entonces:

$$V_s = \frac{(1 - K) Z_t V_m}{Z_t + \frac{Z_g}{2}}$$

Para las descargas que impactan en los cables de guarda, los máximos esfuerzos que se imponen al aislamiento de la torre son del mismo orden de magnitud a las de aquellas que impactan directamente en la torre, de esta manera, las descargas en el medio del vano pueden provocar fallas en la torre pero no a lo largo del vano.

Descargas próximas a la línea.

Una descarga atmosférica próxima a la línea puede inducir una tensión considerable aunque difícilmente excede los 500kV. Las líneas blindadas con cables de guarda, de tensión nominal superior a 69kV generalmente tienen aislamiento suficiente para impedir la ocurrencia de descargas por esta causa. Líneas de tensiones menores, con niveles de aislamiento substancialmente inferiores a los 500kV pueden fallar por sobretensiones inducidas.

En la mayoría de los casos, estas líneas no tienen cables de guarda y también están sujetas a fallar cada vez que sean alcanzadas por una descarga directa. En general, las fallas por sobretensiones inducidas no son un problema mayor, ya que el mínimo de fallas por descargas directas excede bastante las fallas provocadas por sobretensiones inducidas.

ANEXO A

ANÁLISIS DE RIESGOS

El siguiente texto es una guía para asistir en el análisis de varios criterios que determinan el riesgo de descarga directa de rayo en una estructura. Se debe señalar que no es posible cubrir el diseño especial de cada estructura, al mismo tiempo, cada una será más o menos susceptible a la descarga del rayo, de este modo, factores económicos y personales serán muy importantes y deben ser considerados en el análisis y resultados obtenidos al utilizar esta guía.

Por medio de éste análisis se asigna un índice de riesgo R que permite determinar la situación en que se encuentra una estructura.

La tabla 1 muestra los índices de riesgo utilizados:

Tabla 1

valor de R	nivel de riesgo
0-2	ligero
2-3	ligero a moderado
3-4	moderado
4-7	moderado a severo
mas de 7	severo

El índice de riesgo se determina sumando los valores obtenidos de la tabla 2 y hasta la tabla 5, que analizan el tipo de estructura y construcción; y dividiendo por un valor relacionado con la frecuencia de descargas atmosféricas de la región, éste se obtiene de la tabla 6 y a partir de un mapa de niveles cerámicos de la zona en cuestión. El índice de riesgo R se calcula con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{A+B+C+D+E}{F}$$

donde los términos A, B, C, D, E, y F se obtienen de las siguientes tablas, el resultado permite estimar el riesgo de que una estructura sufra una descarga de rayo.

TABLA 2 ÍNDICE A TIPO DE ESTRUCTURA

ESTRUCTURA	VALOR
Residencia familiar sencilla menor a 465m ²	1
Residencia familiar sencilla mayor a 465m ²	2
Construcción residencial, oficina, fábrica con una altura menor a 15m:	
Que cubre un área menor a 2323 m ²	3
Que cubre un área mayor a 2323 m ²	5
Construcción residencial, oficina, fábrica entre 15 y 23m de altura	4
Construcción residencial, oficina, fábrica entre 23 y 46m de altura	5
Construcción residencial, oficina, fábrica con más de 46m de altura	8
Construcciones de servicios públicos, policía, bomberos, agua, etc.	7
Hangares	7
Estaciones generadoras de energía, centrales telefónicas	8
Torres de enfriamiento, tanques elevados	8
Bibliotecas, museos, edificios históricos	8
Estructuras de uso agrícola	9
Campos de golf, áreas recreativas	9
Lugares de asamblea pública, escuelas, iglesias, teatros, estadios	9
Estructuras esbeltas, chimeneas de fábricas, campanarios de iglesias, torres de control, faros, etc.	10
Hospitales, clínicas de maternidad, guarderías, asilos	10
Estructuras en las que se fabriquen, almacenen, manipulen materiales peligrosos	10

TABLA 3 ÍNDICE B TIPO DE CONSTRUCCIÓN

ARMAZÓN ESTRUCTURAL	TIPO DE TECHO	VALOR
No metálico (que no sea madera)	Madera	5
	Composición*	3
	Metal (no continuo)	4
	Metal (continuidad eléctrica)	1
Madera	Madera	5
	Composición*	3
	Metal (no continuo)	4
	Metal (continuidad eléctrica)	2
Concreto reforzado	Madera	5
	Composición*	3
	Metal (no continuo)	4
	Metal (continuidad eléctrica)	1
Acero estructural	Madera	4
	Composición*	3
	Metal (no continuo)	3
	Metal (continuidad eléctrica)	1

*Composición: Los techos compuestos incluyen asfalto, brea, teja, azulejo, pizarra, baldosas, etc.

TABLA 4 ÍNDICE C UBICACIÓN RELATIVA

UBICACIÓN	VALOR
Construcciones en áreas con estructuras elevadas:	
Construcciones pequeñas, área menor a 929 m ²	1
Construcciones grandes, área mayor a 929 m ²	2
Construcciones en áreas con estructuras bajas:	
Construcciones pequeñas, área menor a 929 m ²	4
Construcciones grandes, área mayor a 929 m ²	5
Construcciones que se extienden 15m o menos sobre las estructuras adyacentes o nivel del terreno	7
Construcciones que se extienden más de 15m sobre las estructuras adyacentes o nivel del terreno	10

TABLA 5 ÍNDICE D TOPOGRAFÍA

UBICACIÓN	VALOR
Terreno plano, llanura	1
Ladera	2
Cima o cumbre de una colina	4
Cima o cumbre de montaña	5

TABLA 6 ÍNDICE E OCUPACIÓN Y CONTENIDO

OCUPACIÓN Y CONTENIDO	VALOR
Materiales no combustibles, desocupado	1
Mobiliario residencial	2
Muebles y equipo común	2
Ganado	3
Reunión de personas (menos de 50)	4
Materiales combustibles	5
Reunión de personas (más de 50)	6
Equipo y material costoso	7
Servicios esenciales (policía, bomberos, etc.)	8
Enfermos en cama	8
Líquidos o gases inflamables (gasolina, hidrógeno, etc.)	8
Equipo de gran valor	9
Artículos o piezas históricas	10
Sustancias explosivas y sus componentes	10

TABLA 7 ÍNDICE F
FRECUENCIA DE DESCARGA

NIVEL CERAUNICO	VALOR
0 - 5	9
6 - 10	8
11 - 20	7
21 - 30	6
31 - 40	5
41 - 50	4
51 - 60	3
61 - 70	2
Más de 70	1

CONCLUSIÓN

En general puede parecer lógica la afirmación de que un rayo hará contacto con el punto metálico más elevado que encuentre en su camino, esto sin embargo no siempre se cumple; un rayo podrá descargar en un objeto elevado o a poca altura sobre el suelo por igual, esto se debe a que el rayo en todo momento buscará el camino o el medio que le resulte más fácil, aquel que le presente la menor resistencia; dicho de otra manera, aquella trayectoria que en ese momento tenga la mayor disponibilidad de partículas cargadas, iones, que permitan a la descarga fluir con mayor libertad.

Este comportamiento es, en principio, la razón por la cual los rayos pueden llegar a ser sumamente destructivos, por otra parte también ofrece el medio de evitar o minimizar dichos efectos.

Se sabe que en sus primeras etapas el rayo se presenta en forma de descargas individuales que se aproximan de la nube hacia el suelo en forma pausada, cada una siguiendo por su cuenta el trayecto con la mayor ionización que le facilite su desplazamiento.

La última de estas descargas, el salto final que cierra la unión entre nube y el suelo surge de este último desde el punto que presente la mayor acumulación de carga, es de aquí, que pueden darse graves daños; una vez que se ha dado este último paso se establece un flujo de corriente de gran magnitud, lo que produce los daños si dicha acumulación de carga se da en un medio no conductor o en uno que no tenga la suficiente capacidad para soportar tales corrientes, aquí se resalta la función del sistema de protección contra las descargas atmosféricas, en específico del dispositivo pararrayos propiamente dicho, el pararrayo va a propiciar la acumulación de cargas eléctricas en suficiente cantidad para que sea él mismo el punto del cual surja el líder ascendente, la descarga final que une el suelo con la nube, una vez que se establece contacto entre estos puntos se inicia el flujo de corriente entre ellos drenándola a tierra o bien permitiendo que surja desde ésta hacia la nube ofreciendo un medio propicio para ello, esto se consigue con otros elementos del sistema de protección igualmente importantes que el pararrayos; los conductores de bajada y los electrodos de puesta a tierra, los cuales facilitarán el paso de la corriente impidiendo que resulten afectados sistemas o elementos de la estructura que no posean esa propiedad.

En cuanto a los beneficios que puede aportar un sistema de protección contra rayos, basta mencionar la protección de vidas humanas, protección de equipo, material y continuidad de los procesos.

En cuanto a la forma en que se ha de instalar el sistema de protección, existen varios textos (internacionales, E.U., Francia, entre otros) que ofrecen prácticas recomendadas para hacer la instalación de protección, y estándares o normas que deben cumplirse rigurosamente para garantizar; por un lado, el funcionamiento adecuado de la misma ante una eventual descarga y, por otra parte, que en efecto se encuentra protegida la totalidad de la estructura bajo consideración.

En el presente texto se presentan las características que debe cumplir un sistema de protección contra rayos, sin embargo, aún en las fuentes que fueron consultadas parece quedar sin respuesta una interrogante: ¿cuándo es necesario instalar un sistema de protección?

En el anexo A de este texto se incluye una pequeña guía que es de utilidad para ayudar a responder esa pregunta, dicha guía da como resultado un factor de riesgo que indicará la posibilidad de que una cierta estructura se vea afectada por un rayo, de lo cual surge otra pregunta, establecido un factor de riesgo, ¿cuánta protección será necesaria?

No hay reglas que indiquen una correspondencia directa entre el nivel de riesgo y el número de pararrayos, por ejemplo, que deben instalarse para proteger una instalación, tampoco hay tablas que relacionen un nivel cerámico con el número de electrodos necesarios para disipar la corriente del rayo.

Los documentos disponibles, normas y recomendaciones de varios organismos internacionales, reúnen prácticas que han venido efectuándose con los años tanto en campo como en el laboratorio y han demostrado ser eficaces para cumplir su objetivo, incluyen todo lo referente a distancias entre pararrayos, conductores de bajada, puentes de unión, materiales permitidos etc, todos estos aspectos, considerados en dichos documentos van a garantizar que el sistema de protección va a resultar de utilidad puesto que son métodos que han sido probados con los años y que han demostrado ser los que mejor se ajustan a un fenómeno tan aleatorio como el rayo.

Será, por otra parte, el criterio de las personas encargadas al diseño de un sistema de protección lo que decidirá la instalación o el alcance de dicho sistema, ese criterio se debe formar considerando cuidadosamente la mayor cantidad posible de factores que pudieran involucrarse directa o indirectamente, ya que una vez decidida una instalación no hace falta más que seguir las normas referentes al tema.

Esto es particularmente importante sobre todo en casas habitación u oficinas en las que no se tenga una visión clara de la necesidad del sistema de protección, aquellos casos en los que la estructura estudiada, de acuerdo a las guías disponibles queda clasificada como propensa a un riesgo de descarga bajo o moderado.

De lo anterior resalta la importancia de algunas guías que permiten determinar el riesgo o probabilidad que puede tener un edificio de ser alcanzado por un rayo, sin embargo, el problema surge con la interpretación de estos resultados; claramente se podrá decidir si se obtiene una probabilidad alta o un factor de riesgo de descarga severo, no así si el resultado es un riesgo moderado o bajo, en cuyo caso para determinar la necesidad de instalar un sistema de protección tendrán un mayor peso factores de tipo económico, usos de la instalación, valores almacenados o el deseo o decisión del dueño del inmueble.

Conviene señalar que el objetivo principal de estos sistemas es la protección de vidas humanas, para lo cual un punto de suma importancia es el sistema de puesta a tierra y la igualación de potencial entre elementos conductores del edificio y el propio sistema de protección, respectivamente; con el fin de garantizar la pronta disipación de la corriente y evitar riesgos de descargas eléctricas fatales a las personas y la destrucción o daños en equipo dentro del edificio. Hay que recordar aquí la importancia del sistema de puesta a tierra de los pararrayos ya que estos por sí mismos no ofrecen protección alguna, el poner un pararrayos o varios de ellos no va a impedir la descarga de un rayo en un sitio, por el contrario, el pararrayo va a propiciar la descarga de los rayos sobre sí mismo, por otra parte, un pararrayo por sí solo no va a disipar la energía contenida en el rayo, será únicamente por medio de un sistema de puesta a tierra eficaz de los pararrayos que podrá lograrse este objetivo en forma rápida y segura.

Conviene resaltar también la importancia de la instalación de tierra que debe formar parte de la instalación eléctrica en general, así como la necesidad de unir a tierra elementos expuestos como los mástiles de antenas receptoras de televisión, tuberías de agua, y la igualación de potencial con tuberías y otros elementos metálicos entre los cuales podrían surgir diferencias de potencial que resulten en descargas eléctricas para aquellas personas que puedan entrar en contacto con dichos elementos.

Como último comentario, con este texto se busca exponer la necesidad de una normatividad oficial en nuestro país que aborde este tema, ya que hasta el momento, a excepción de los sistemas de generación y de transmisión de energía, no se cuenta con disposiciones oficiales que aborden la protección contra descargas atmosféricas por medio de pararrayos como parte integral de las instalaciones eléctricas o que señalen los aspectos técnicos que deben cumplirse para una adecuada instalación de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

Atmósfera, tiempo y clima

Roger G. Barry
Richard J. Chorley

Barcelona 1992, Omega

Meteorología aplicada a la aviación

Manuel Ledesma
Gabriel Baleriola

Madrid 1997, Paraninfo

Atmospheric Electricity

B. F. J. Schonland

Londres 1957, University Press

Protección contra sobretensiones de instalaciones de baja tensión

Peter Hasse

Madrid 1991, Paraninfo

NFPA 780, Standard for the Installation of Lightning Protection Systems (1997)

IEEE Std. 142-1991, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial
Power Systems (IEEE Green Book)

Instalaciones de puesta a tierra

Vittorio Re

Barcelona 1988, Marcombo

Líneas e Instalaciones Eléctricas

Carlos Luca M.

México 1970, Alfaomega

Diseño de Subestaciones Eléctricas

José Raúl Martín

México 2000, Facultad de Ingeniería, UNAM

Electrical Transients in Power Systems

Allan Greenwood

U.S.A. 1971, John Wiley & Sons

PÁGINAS ELECTRÓNICAS CONSULTADAS

<http://www.lightningsafety.com>

<http://www.paas.unal.edu>

<http://www.lpsnet.com>

<http://www.lightningrod.com>

<http://www.contenidos.com>

<http://www.seratech.com.sg/lps.htm>

<http://www.lightningmaster.com>

<http://www.ing.unlp.edu.ar/sisplot/le-index.htm>

<http://230nscl.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/ligseq.html>