



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***"ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA
PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS"***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

ALFREDO ALFARO LEÓN

ROBERTO ALANIS OSORNIO



DIRECTOR DE TESIS:
ING. JAVIER BROSA CURCÓ

MÉXICO, D.F.

JUNIO, 2007

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es realizada con la contribución de cada una de las personas que han apoyado en ella, mi más sincero agradecimiento por su valiosa aportación en la realización de este trabajo.

Agradezco a la máxima casa de estudios la “Universidad Nacional Autónoma de México” quien me dio la formación durante estos años en la Facultad de Ingeniería. A todos mis maestros, por sus clases y sus consejos hicieron posible que pudiera conseguir esta meta; de igual manera a mis amigos y compañeros de generación, su amistad ha sido pilar importante en mi carrera.

A mi familia por el apoyo que siempre tuve de ellos para la realización de mis objetivos, mis padres Fidencio Alfaro Mejía y Magdalena León González, a quienes les debo su comprensión, su optimismo y su cariño, este trabajo es de ustedes. A mi hermano Alejandro por todo lo que hemos compartido, se que siempre cuento contigo.

A todos ustedes muchas gracias.

Alfredo Alfaro León

AGRADECIMIENTOS

Sin lugar a duda este trabajo no pudo haberse realizado sin la formación que recibí durante mi estancia como estudiante en la Facultad de Ingeniería (UNAM). Gracias a todos los maestros que contribuyeron realmente en mi formación, por todos sus consejos, paciencia, y su amistad como personas. A mis compañeros que al creer en mí y en mi trabajo me comprometen a ser una persona mejor cada día.

Agradezco a mis Padres y hermana por enseñarme el camino correcto de la vida, con la educación que me brindaron a lo largo de todo este tiempo, por el esfuerzo que conllevo mi educación, por creer y confiar siempre en mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado. Debo a ellos lo que soy.

Quiero agradecer muy especialmente a mi querida esposa, por traer tanta ternura a mi existencia y enseñarme que la oportunidad de ser padre es una de las bendiciones más grandes de la vida y que durante todo este tiempo ha tenido la paciencia suficiente para apoyarme profundamente, para darme su comprensión, su cariño y su amor. Gracias por hacer de esos momentos un verdadero vivir.

Por último quiero dar las gracias a todos aquellos que me han devuelto una sonrisa, a todos aquellos que me han tendido su mano en tiempos difíciles, a todos aquellos que han puesto de su parte para que el trajín diario sea más llevadero y muy en especial a la vida que, me ha dado tanto.

Roberto Alanis Osornio

ÍNDICE

	Página
Introducción.	I
CAPITULO I	
1. Antecedentes.	1
1.1. Carga eléctrica.	4
1.2. Propiedades eléctricas de los sólidos.	4
1.3. Conductores y dieléctricos.	6
1.4. Inducción y polarización de carga.	7
1.4.1. Inducción de un dieléctrico.	8
1.5. Ley de Coulomb.	10
1.6. Campo eléctrico.	13
1.7. Comportamiento de un conductor electrizado.	14
1.8. Rigidez dieléctrica.	17
1.9. Naturaleza y formación del rayo.	19
1.9.1. Ionización.	19
1.9.2. Nubes.	21
1.9.3. Acumulación de electricidad en las nubes.	23
1.9.4. Formación de la descarga.	24
1.9.5. Otros tipos de descarga.	27
CAPITULO II	
2. Características y consecuencias de los rayos en estructuras e instalaciones.	30
2.1. Magnitudes y características de los rayos.	31
2.1.1. Probabilidad de que se produzcan tormentas.	32
2.1.2. Intensidad de corriente.	33
2.1.3. Diferencia de potencial.	35
2.1.4. Duración y número de descargas.	37
2.1.5. Otras magnitudes energéticas.	37
2.1.6. Otras magnitudes características del rayo.	38
2.1.7. Onda convencional.	39
2.2. Generalidades sobre efectos de los rayos.	42
2.2.1. Consecuencias térmicas del rayo.	42
2.2.2. Consecuencias dinámicas del rayo.	45
2.2.3. Efectos acústicos.	46
2.2.4. Efectos químicos.	46
CAPITULO III	
3. Elementos de protección contra descargas atmosféricas.	47
3.1. Protección externa. Constitución de una instalación de pararrayos.	48
3.2. Tipos de pararrayos.	49
3.3. Pararrayos de Franklin, terminales áreas.	50
3.3.1. Cono de protección.	51
3.4. Pararrayos de Jaula.	54
3.5. Telepararrayos.	55
3.6. Pararrayos radiactivo.	56
3.7. Pararrayos ionizantes o con dispositivo de cebado.	57
3.7.1. Principio de funcionamiento del pararrayos ionizante.	57
3.7.2. Dispositivo de cebado en los pararrayos ionizantes.	58
3.8. Protección interna.	59
3.8.1. Unión equipotencial.	60

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

CAPITULO IV	
4. Protección contra descargas atmosféricas.	62
4.1. Valoración de riesgo	63
4.1.1. Área equivalente de captura.	64
4.1.2. Evaluación de la necesidad de protección.	68
4.2. Diseño del sistema externo de protección.	68
4.2.1. Distancia de seguridad.	69
4.2.2. Materiales.	70
4.2.3. Método de la esfera rodante.	72
4.2.4. Terminales aéreas.	74
4.2.5. Conductores de bajada.	75
4.2.6. Sistema de puesta a tierra.	80
4.3. Protección contra descargas atmosféricas de estructuras con peligro de fuego y/o explosión.	85
4.4. Comprobación, actividades preventivas y correctivas.	89
CAPITULO V	
5. Aplicación práctica del método de la esfera rodante.	91
5.1. Procedimiento de elección de un sistema de protección	92
5.1.1. Generalidades	92
5.1.2. Clasificación de la estructura	92
5.1.3. Determinación del sistema de protección	93
5.1.4. Aplicación del método para el sistema de protección externo	96
Conclusiones	104
Apéndice A	
Mapa del promedio anual de densidad de rayos a tierra por Estado de la Republica Mexicana.	106
Apéndice B	
Tabla sobre resistencia a la corrosión de algunos metales y aleaciones comunes.	112
Apéndice C	
Método de la esfera rodante.	113
Apéndice D	
Medición de la Resistividad del suelo.	118
Apéndice E	
Cálculo simplificado y método de medición para la resistencia a tierra.	122
Bibliografía.	128

INTRODUCCIÓN

La dependencia que el ser humano tiene con el clima es obvia, ya que éste tiene serias consecuencias en todas nuestras actividades, un buen clima para las labores agrícolas hasta condiciones de desastre para las personas y propiedades. El rayo, o más técnicamente, la descarga eléctrica atmosférica a tierra, es una condición especial del clima que ha sido objeto, desde tiempos remotos, de fascinación y miedo, lo que generó el hecho de representar al rayo como un poder divino en la mitología de casi todos los pueblos del mundo.

Las tormentas son de los fenómenos atmosféricos más espectaculares, aquí se dan lugar las descargas eléctricas atmosféricas, con características muy complejas de representar, ya que depende de diversos factores, siendo un fenómeno estocástico, con diferentes configuraciones e intensidades energéticas. Por su naturaleza y sus efectos directos e indirectos pueden producir daños de los cuales, es posible protegerse con medios adecuados, sin tener secuelas catastróficas ni cuantiosas pérdidas económicas.

La descarga también puede alcanzar las instalaciones interiores de fábricas, hogares, comercios e industrias, a través de las líneas de conexión del suministro de energía eléctrica, por las líneas de conexión de teléfonos, fax, módems, televisión por cable, y también a través de la estructura metálica de los edificios, por contacto directo o por inducción, por lo cual es necesario que los equipos estén protegidos frente a todas estas posibilidades.

La protección de los edificios contra los rayos y las sobretensiones de origen atmosférico constituye un tema de vasto alcance al que van unidos importantes problemas de protección y seguridad, por lo cual, diferentes países se han preocupado por elaborar normas que sirvan de guía de diseño de este sistema.

Esta tesis tiene como objetivo explicar el fenómeno, el peligro de sus efectos así como la realización de instalaciones protectoras contra los rayos para las estructuras. Desgraciadamente, una instalación de pararrayos efectuada de un modo irracional, en lugar de disminuir el peligro aumenta y puede dar lugar a daños de importancia. Esta circunstancia justifica un estudio minucioso y con cuidado especial en la realización de las instalaciones, por modestas que estas sean.

Resulta evidente, por lo tanto, la enorme importancia del uso de los medios destinados a proteger a las personas, animales y bienes de los efectos del rayo limitando sus consecuencias.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En este texto nos ocuparemos particularmente de la protección de estructuras contra las descargas atmosféricas directas, tema más modesto y de alcance más limitado, pero no menos importante por las aplicaciones prácticas que tiene.

La técnica de proteger a las estructuras contra los rayos, se beneficia de los profundos conocimientos del fenómeno derivados de los estudios que se han desarrollado con el tiempo, así como ideas novedosas que han surgido actualmente.

La preparación de los medios de protección requiere en efecto un conocimiento, lo más a fondo posible, el mecanismo de la creación y acumulación de las cargas eléctricas en la atmósfera, así como también de la forma y magnitudes características de las descargas que constituyen al rayo propiamente dicho.

En el primer capítulo se hablara de nociones fundamentales incluyendo teoría básica sobre cargas eléctricas, conductores y dieléctricos, la polarización de los cuerpos y acumulación de la electricidad en las nubes, piezas clave para entender la naturaleza y la formación del rayo.

Con el propósito de conocer las características y consecuencias producidas por las descargas atmosféricas, el capítulo dos estudia mediante análisis estadístico y observaciones realizadas los efectos y magnitudes energéticas que pueden llegar a ser muy peligrosas, se analizará la intensidad de corriente y la diferencia de potencial para que posteriormente se pueda anular o reducir las consecuencias a límites inofensivos.

El capítulo tres estudia el conjunto de medidas adoptadas contra las repercusiones del rayo sobre las instalaciones y los componentes que forman a un sistema de protección, los elementos que se usaron en el pasado y los que se utilizan en la actualidad.

En el capítulo cuatro ponemos en práctica la instalación de protección contra descargas atmosféricas, realizando un estudio de un sistema externo de protección para estructuras de acuerdo a las normas.

Se realiza un cálculo y simulación del método de la esfera rodante con la ayuda de los programas de cómputo, de tal forma que se lograra un mejor entendimiento para la instalación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en el capítulo número cinco.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

CAPITULO I

1. ANTECEDENTES

Las primeras observaciones de fenómenos eléctricos registradas en la historia fueron realizadas por los griegos en la antigüedad. Estos acontecimientos observados quedan contenidos en la parte del electromagnetismo que estudia los cuerpos en reposo conocida como electricidad estática ó electrostática.

En el año 600 a.C. el filósofo y matemático Tales de Mileto observó que al frotar ámbar con la piel, aquel adquiría la propiedad de atraer pequeños pedazos de paja, papel o tela. A pesar de este acontecimiento tan antiguo, la comprensión del fenómeno se llevo a cabo después del siglo XVI y la mayor parte de los experimentos y desarrollos teóricos sobre la electricidad y el magnetismo fueron realizadas en el siglo XIX.

Fue entonces cuando empezaron a realizarse observaciones sistemáticas y cuidadosas de los fenómenos eléctricos, entre las cuales destacan los trabajos del médico ingles William Gilbert. Este científico observó que algunos otros cuerpos, se comportan como el ámbar al frotarlos, y que la atracción que ejercen se manifiesta sobre cualquier otro cuerpo, aun cuando sea ligero.

Como designación griega que corresponde al ámbar es electrón, Gilbert comenzó a usar el termino “eléctrico” para referirse a todo cuerpo que se comportaba como el ámbar, con lo cual surgieron las expresiones “electricidad”, “electrizar”, “electrización”, etc. En la actualidad sabemos que todas las sustancias pueden presentar un comportamiento similar al del ámbar; es decir, pueden electrizarse al ser frotadas con otras sustancias u objetos.

La primera máquina para producir una carga eléctrica fue descrita en 1672 por el físico alemán Otto von Guericke. Estaba formada por una esfera de azufre movida por una manivela, sobre la que se inducía una carga cuando se apoyaba la mano sobre ella. El científico francés Charles François de Cisternay Du Fay fue el primero en distinguir claramente los dos tipos diferentes de carga eléctrica: positiva y negativa. El condensador más antiguo, la botella de Leyden, fue desarrollado en 1745. Estaba formado por una botella de vidrio recubierta por dos láminas de papel de estaño, una en el interior y otra en el exterior. Si se cargaba una de las láminas con una máquina electrostática, se producía una descarga violenta si se tocaban ambas láminas a la vez.

El inventor estadounidense Benjamin Franklin dedicó mucho tiempo a la investigación de la electricidad. Su famoso experimento con una cometa o papalote demostró que la electricidad

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

atmosférica que provoca los fenómenos del relámpago y el trueno es de la misma naturaleza que la carga electrostática de una botella de Leyden.

La ley de que la fuerza entre cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas fue demostrada experimentalmente por el químico británico Joseph Priestley alrededor de 1766. Charles de Coulomb inventó una balanza de torsión para medir con precisión la fuerza que se ejerce entre las cargas eléctricas. Con ese aparato confirmó las observaciones de Priestley y demostró que la fuerza entre dos cargas también es proporcional al producto de las cargas individuales. Michael Faraday, que realizó numerosas contribuciones al estudio de la electricidad a principios del siglo XIX, también desarrolló la teoría de las líneas de fuerza eléctricas.

Los físicos italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta llevaron a cabo los primeros experimentos importantes con corrientes eléctricas. Galvani produjo contracciones musculares en las patas de una rana aplicándoles una corriente eléctrica. En 1800, Volta presentó la primera fuente electroquímica artificial de diferencia de potencial, un tipo de pila eléctrica o batería. La existencia de un campo magnético en torno a un flujo de corriente eléctrica fue demostrada por el científico danés Hans Christian Oersted en 1819, y en 1831 Michael Faraday demostró que la corriente que circula por una espira de cable puede inducir electromagnéticamente una corriente en una espira cercana. Alrededor de 1840, James Prescott Joule y el científico alemán Hermann von Helmholtz demostraron que los circuitos eléctricos cumplen la ley de conservación de la energía, y que la electricidad es una forma de energía.

El físico matemático británico James Clerk Maxwell realizó una contribución importante al estudio de la electricidad en el siglo XIX; Maxwell investigó las propiedades de las ondas electromagnéticas y la luz y desarrolló la teoría de que ambas tienen la misma naturaleza. Su trabajo abrió el camino al físico alemán Heinrich Hertz, que produjo y detectó ondas eléctricas en la atmósfera en 1886, y al ingeniero italiano Guglielmo Marconi, que en 1896 empleó esas ondas para producir el primer sistema práctico de señales de radio.

La teoría de los electrones, que forma la base de la teoría eléctrica moderna, fue presentada por el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz en 1892. El primero en medir con precisión la carga del electrón fue el físico estadounidense Robert Andrews Millikan, en 1909. El uso generalizado de la electricidad como fuente de energía se debe en gran medida a ingenieros e inventores pioneros de Estados Unidos, como Thomas Alva Edison, Nikola Tesla o Charles Proteus Steinmetz.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

1.1 Carga eléctrica.

Algunas de las partículas que forman los átomos, adicionalmente a la propiedad fundamentalmente llamada masa, poseen otra propiedad llamada carga eléctrica.

La carga de dichas partículas puede ser de dos tipos: una partícula subatómica puede poseer la carga que caracteriza el protón o la típica del electrón; además existen partículas que poseen ambos tipos de carga simultáneamente llamada neutrón, en este caso decimos que la partícula no posee exceso de carga.

El protón es una partícula nuclear con carga positiva igual en magnitud a la carga negativa del electrón; junto con el neutrón, está presente en todos los núcleos atómicos. Al protón y al neutrón se les denomina también nucleones. Por tanto, la masa de un átomo está concentrada casi exclusivamente en su núcleo. El número atómico de un elemento indica el número de protones de su núcleo, y determina de qué elemento se trata.

El electrón es un tipo de partícula elemental de carga negativa que, junto con los protones y los neutrones, forma los átomos y las moléculas. Los electrones están presentes en todos los átomos y cuando son arrancados del átomo se llaman electrones libres. Los electrones intervienen en una gran variedad de fenómenos físicos y químicos.

1.2 Propiedades eléctricas de los sólidos.

Analizaremos a continuación un experimento que nos permite darnos cuenta de la existencia de los dos tipos de carga mencionados y de algunas características del fenómeno de atracción y repulsión entre cuerpos con exceso de carga.

Al tomar una barra de vidrio y frotarla con un pedazo de seda; observaremos que después de frotada es capaz de atraer pequeños pedazos de papel o cualquier otro material ligero.

Si, por otro lado, frotamos una barra de ebonita (hule duro) con piel, observaremos que también adquiere la capacidad de atraer pequeños pedazos de materiales ligeros.

Con un dispositivo semejante al de la *figura 1.1* podremos notar que las dos barras, previamente frotadas con sus respectivos excitadores, se atraen entre sí.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Repitiendo el experimento anterior, ahora con dos barras de mismo material frotadas con el mismo excitador, observaremos que se rechazan.

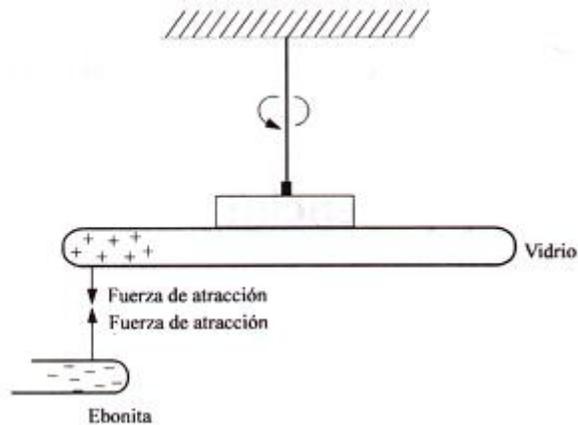


FIGURA 1.1. Dispositivo para detectar la fuerza de atracción entre dos barras con carga opuesta.

Con base en el experimento descrito, repetido con diversos materiales, concluimos que existen dos tipos de carga eléctrica. A los materiales que adquieren un exceso de carga del mismo tipo que el vidrio frotado con seda les llamaremos materiales con exceso de carga positiva o simplemente cargados positivamente (con defecto de electrones). De manera semejante, a los que adquieren un exceso de carga del mismo tipo que la ebonita frotada con piel le llamaremos materiales con exceso de carga negativa o cargados negativamente (con exceso de electrones).

La convención mencionada fue originalmente propuesta por Benjamín Franklin.

- a) Cargas del mismo tipo se rechazan
- b) Cargas de diferente tipo se atraen.

Dado que los átomos de cualquier sustancia normalmente poseen igual número de partículas positivas y negativas y que además, la magnitud de las cargas positivas y negativas de las partículas es la misma con una exactitud de una parte en 10^{20} , podemos afirmar que la materia en condiciones normales no posee exceso de carga de ningún tipo.

Como no se ha encontrado una carga de magnitud menor que la del electrón, un cuerpo cargado posee solamente una cantidad de carga en exceso, múltiplo entero de dicha carga. Se dice que la carga eléctrica está cuantizada; entendiéndose con ello que no existen fracciones de la carga básica "e" del electrón.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS**1.3 Conductores y dieléctricos.**

Para poder comprender los primeros fenómenos observados es necesario que distingamos entre materiales conductores y materiales aislantes o dieléctricos.

Cuando algunos átomos se combinan para formar sólidos, frecuentemente quedan libres uno o más electrones, que pueden moverse con facilidad a través del material. En algunos materiales, llamados conductores, ciertos electrones se liberan fácilmente. Los metales, en particular el cobre y la plata, son buenos conductores. Los electrones de las orbitas más lejanas no permanecen unidos a sus respectivos átomos, y adquieren libertad de movimiento en el interior del sólido.

Los materiales en los que los electrones están fuertemente ligados a los átomos se conocen como aislantes, no conductores o dieléctricos. Algunos ejemplos son el vidrio, la goma o la madera seca. Por lo tanto, no será posible el desplazamiento de carga eléctrica libre a través de estos cuerpos.

Existe un tercer tipo de materiales en los que un número relativamente pequeño de electrones puede liberarse de sus átomos de forma que dejan un 'hueco' en el lugar del electrón. El hueco, que representa la ausencia de un electrón negativo, se comporta como si fuera una unidad de carga positiva. Un campo eléctrico hace que tanto los electrones negativos como los huecos positivos se desplacen a través del material, con lo que se produce una corriente eléctrica. Generalmente, un sólido de este tipo, denominado semiconductor, tiene una resistencia mayor al paso de corriente que un conductor como el cobre, pero menor que un aislante como el vidrio. Si la mayoría de la corriente es transportada por los electrones negativos, se dice que es un semiconductor de tipo n. Si la mayoría de la corriente corresponde a los huecos positivos, se dice que es de tipo p.

Si un material fuera un conductor perfecto, las cargas circularían por él sin ninguna resistencia; por su parte, un aislante perfecto no permitiría que se movieran las cargas por él. No se conoce ninguna sustancia que presente alguno de estos comportamientos extremos a temperatura ambiente. A esta temperatura, los mejores conductores ofrecen una resistencia muy baja (pero no nula) al paso de la corriente y los mejores aislantes ofrecen una resistencia alta (pero no infinita). Sin embargo, la mayoría de los metales pierden toda su resistencia a temperaturas próximas al cero absoluto; este fenómeno se conoce como superconductividad.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

1.4 Inducción y polarización de carga.

Consideremos un conductor *AB* en estado neutro (no electrizado), sostenido por un soporte aislante. Aproximemos al conductor, sin tocarlo, un cuerpo *I* electrizado positivamente (*figura 1.2*). Los electrones libres existentes en gran cantidad en el conductor, serán atraídos por la carga positiva del cuerpo *I* y se acumularán en el extremo *A*. Debido a este desplazamiento de las cargas negativas hacia *A*, el extremo *B* presentará un exceso de cargas positivas, como se indica en la *figura 1.2*.

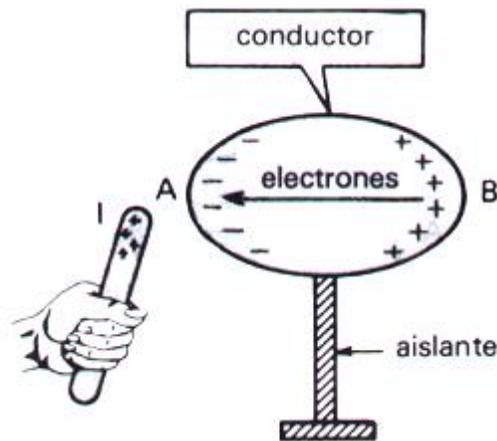


FIGURA 1.2. Cuando aproximamos un cuerpo electrizado a un conductor, observamos en éste una separación de cargas.

Observe que la aproximación del cuerpo cargado produjo en el conductor una separación de cargas, aun cuando en su totalidad siga estando neutro (su carga total es nula). Esta separación de cargas en un conductor, producida por el acercamiento de un cuerpo electrizado, se denomina inducción electrostática (por influencia). El cuerpo *I* que produjo la inducción se denomina inductor, y las cargas que aparecen en los extremos del conductor se denominan cargas inducidas.

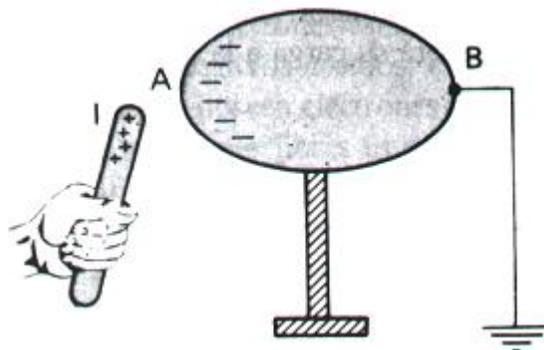


FIGURA 1.3. Al ser conectado a tierra el conductor que sufrió inducción, quedará electrizado negativamente, pues los electrones libres de tierra pasarán hacia él.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Supóngase que manteniendo el inductor fijo en su posición dada conectamos a tierra, mediante un hilo metálico, al conductor que sufrió la inducción electrostática (*figura 1.3*). Esta conexión hará que los electrones libres pasen de la tierra hacia el conductor. Estos electrones neutralizarán la carga positiva inducida que se localiza en el extremo *B* del conductor (*figura 1.3*).

Si deshacemos la conexión a tierra, y en seguida, alejamos el inductor, la carga negativa inducida que se encontraba acumulada en el extremo *A*, se distribuirá por la superficie de dicho conductor, como se ve en la *figura 1.4*. Observemos entonces, que el conductor adquirió así carga negativa, es decir, carga de signo contrario al de la carga del inductor. Este a su vez no recibió ni recibió carga alguna durante el proceso. Esta forma de electrizar un cuerpo conductor se denomina electrización por inducción.

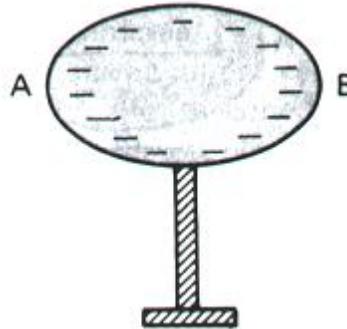


FIGURA 1.4. La carga negativa inducida en el conductor, se distribuye ahora sobre toda su superficie.

1.4.1 Inducción de un dieléctrico.

Algunas substancias como el agua, presentan moléculas denominadas moléculas polares. En ellas, el centro de las cargas positivas no coincide con el centro de las cargas negativas, y por lo tanto hay una asimetría en la distribución de cargas en la molécula. Las sustancias cuyas moléculas poseen cargas eléctricas distribuidas en forma simétrica se denominan apolares, como se ilustra en la *figura 1.5*.

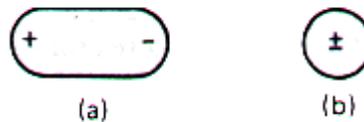


FIGURA 1.5. Molécula polar (a) y molécula apolar (b)

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Consideremos un dieléctrico AB , no electrizado, cuyas moléculas son polares y que está alejado de influencias eléctricas externas. En estas condiciones, las moléculas de esta sustancia están distribuidas al azar como se representan en la *figura 1.6(a)*. Al acercar a este aislante o dieléctrico un cuerpo electrizado (por ejemplo, una carga positiva), la carga de este último actuara sobre las moléculas del aislante, haciéndolas que se orienten y se alineen en la forma indicada en la *figura 1.6(b)*. Cuando esto sucede, decimos que el dieléctrico está polarizado. Observemos en la *figura 1.6(b)* que el efecto final de esta polarización consiste en hacer aparecer en el extremo A , carga negativa, y en el extremo B , carga positiva. La *figura 1.6(c)* representa este efecto final de polarización (por influencia). Debemos notar que aun cuando la carga total en el dieléctrico sea nula, la polarización hace que aparezcan cargas eléctricas de signos contrarios en los extremos A y B , de manera similar a lo que sucede en la inducción electrostática de un conductor.

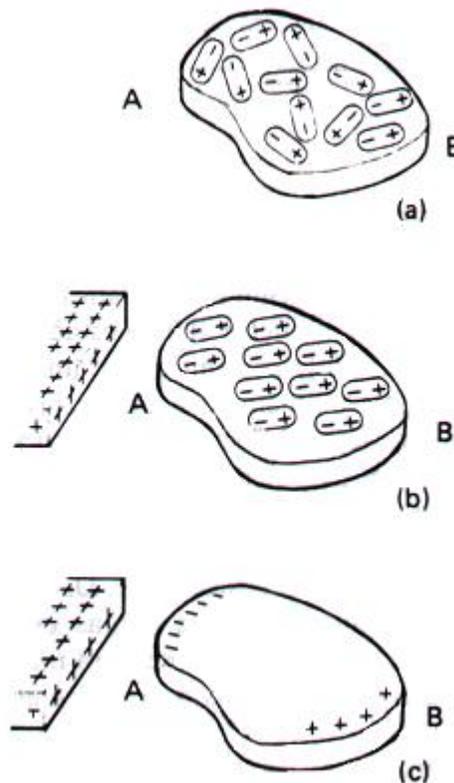


FIGURA 1.6. La polarización en un dieléctrico produce la aparición de cargas de signos contrarios en sus extremos.

Si el dieléctrico AB estuviera constituido por moléculas apolares, se observaría el mismo efecto final, ya que con la aproximación del cuerpo electrizado, las moléculas se volverían polares y por siguiente se alinearían como se muestra en la *figura 1.6(b)*.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

1.5 Ley de Coulomb.

Ya sabemos que cuando un cuerpo está electrizado posee un exceso de protones (carga positiva), o bien, un exceso de electrones (carga negativa). Por ese motivo, el valor de la carga de un cuerpo, que vamos a representar por Q o q , se puede medir por el número de electrones que el cuerpo pierde o gana. Pero esta forma de expresar el valor de la carga no resulta práctica, pues se sabe que en un proceso común de electrización (por frotamiento, por ejemplo), el cuerpo pierde o gana un número muy elevado de electrones. De este modo, los valores de Q o q estarían expresados por números sumamente grandes.

En la práctica se procura entonces emplear una unidad de carga más adecuada. En el Sistema Internacional (SI) la unidad de carga eléctrica se denomina coulomb (símbolo C), en honor al físico francés Charles A. de Coulomb. Este científico, al analizar las fuerzas de interacción entre cargas eléctricas, llegó a una ley muy importante.

Cuando decimos que un cuerpo posee una carga de 1 C, ello significa que perdió o ganó 6.25×10^{18} electrones es decir: 1 C corresponde a 6.25×10^{18} electrones en exceso (si la carga del cuerpo fue negativa), o en defecto (si la carga del cuerpo fue positiva).

Consideremos dos cuerpos electrizados con cargas Q_1 y Q_2 , separados una distancia r , como muestra la *figura 1.7*. Supongamos que el tamaño de estos cuerpos electrizados es muy pequeño en relación con la distancia r entre ellos. En estas condiciones, consideramos despreciables las dimensiones de dichos cuerpos, y nos referiremos a ellos como “cargas puntuales”. Por lo tanto, una carga puntual o puntiforme es la que esta distribuida en un cuerpo cuyas dimensiones son despreciables en comparación con las demás dimensiones que intervienen en el problema.

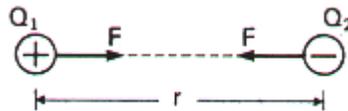


FIGURA 1.7. Fuerza de atracción entre 2 cargas puntuales de signo contrario separadas a una distancia r .

En el siglo XVIII, Coulomb realizó una serie de mediciones muy cuidadosas de las fuerzas existentes entre dos cargas puntuales. Mediante esas medidas, Coulomb llegó a algunas conclusiones, válidas tanto para las fuerzas de atracción como para las de repulsión.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En la *figura 1.7* designamos por F la magnitud de la fuerza entre las cargas Q_1 y Q_2 . Coulomb halló que si la carga Q_1 se duplicara (o bien triplicara, o cuadruplicara, etc.), el valor de la fuerza entre las cargas también se duplicaría (o triplicaría o cuadruplicaría, etc.). Concluyó entonces que el valor de la fuerza es proporcional a la carga Q_1 ; es decir, $F \propto Q_1$.

Como era de esperar, si el valor de Q_1 no se alterara y el valor de Q_2 se duplicara (o triplicara, etc.), la magnitud de la fuerza también se duplicaría (o triplicaría, etc.). Entonces podemos escribir también que $F \propto Q_2$.

Luego como $F \propto Q_1$ y $F \propto Q_2$, vemos que $F \propto Q_1 Q_2$ es decir, la fuerza de interacción entre dos cargas eléctricas puntuales es proporcional al producto de dichas cargas.

Desde hace muchos siglos se conoce el hecho de que la fuerza ejercida entre dos cuerpos electrizados disminuye al aumentar la distancia entre ellos; pero el establecimiento de la relación cuantitativa entre la fuerza F (que una carga puntual ejerce sobre otra) y r (distancia entre las cargas), sólo pudo ser logrado por Coulomb en sus experimentos con la balanza de torsión. Este científico comprobó que al duplicar r , la fuerza F se vuelve 4 veces menor; al triplicar r , la fuerza F se vuelve 9 veces menor; al cuadruplicar r , la fuerza F se vuelve 16 veces menor, etc.

Así, Coulomb observó que la fuerza F de atracción o repulsión entre dos cargas puntuales, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r entre ellas; es decir $F \propto \frac{1}{r^2}$.

Como ya vimos que entre la fuerza F y las cargas Q_1 y Q_2 existe una relación $F \propto Q_1 Q_2$ y que entre esta misma fuerza y la distancia r se tiene $F \propto \frac{1}{r^2}$ podemos asociar estas relaciones y obtener $F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$.

Como sabemos, esta relación se podrá transformar en una igualdad si introducimos en ella una constante de proporcionalidad adecuada. Consideremos, inicialmente, las cargas Q_1 y Q_2 situadas en el vacío. En este caso designaremos por k_0 la constante de proporcionalidad a

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

introducir en la relación anterior. Entonces, para dos cargas en el espacio libre tendremos

$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Así pues, hemos llegado ya a la expresión matemática de la ley de Coulomb para dos cargas en el vacío. El valor de la constante k_0 se puede obtener en forma experimental. En SI, donde F se expresa en newtons, Q_1 y Q_2 en coulombs, y r en metros, el valor de k_0 es

$$k_0 = 9.0 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}.$$

Supongamos ahora que las cargas Q_1 y Q_2 se colocan en el interior de un medio material cualquiera (por ejemplo, Q_1 y Q_2 podrían estar sumergidas en agua, en aceite, etc.). En tal caso encontramos que la fuerza de interacción entre ellas sufre una reducción, mayor o menor, dependiendo del medio. Este factor de reducción se denomina constante dieléctrica del medio, y se representa por K . Por consiguiente, para un medio material dado se tiene una constante electrostática igual a k_0/K .

La *tabla 1.1* representa los valores de la constante dieléctrica K para algunos materiales. Observando la tabla podemos concluir que el valor de la fuerza entre dos cargas prácticamente no se altera cuando pasan del vacío hacia el aire. Por otra parte, si se sumergieran en aceite, por ejemplo, tal fuerza se volvería 4.6 veces menor además debemos destacar el alto valor de la constante dieléctrica del agua: si sumergimos Q_1 y Q_2 en este líquido, la fuerza de interacción entre ellas se reduce notablemente, volviéndose 81 veces menor que en vacío.

Medio material	Constancia Dieléctrica (K)
Vacío	1.0000
Aire	1.0005
Gasolina	2.3
Ambar	2.7
Vidrio	4.5
Aceite	4.6
Mica	5.4
Glicerina	43
Agua	81

TABLA 1.1. Valores de la constante dieléctrica K

1.6 Campo eléctrico.

Consideremos una carga Q fija en determinada posición. Ya sabemos que si otra carga q fuese colocada en un punto P_1 , a cierta distancia de Q , se tendrá una fuerza eléctrica \vec{F} actuando sobre q .

Supongamos ahora que la carga q fuese desplazada, en torno de Q , a cualesquiera otros puntos, como P_2 , P_3 , etc. Obviamente, en cada uno de ellos también actuaría sobre q una fuerza eléctrica ejercida por Q . Para describir este hecho, decimos que en cualquier punto del espacio alrededor de Q existe un campo eléctrico (o campo de fuerza eléctrica) producido por esta carga.

Es importante señalar que la existencia del campo eléctrico en un punto no depende de la presencia de la carga de prueba en dicho punto. De manera que existe un campo eléctrico en cada uno de los puntos, aun cuando no haya una carga de prueba en ninguno de ellos. Cuando se coloca una carga de prueba en un punto, solo queremos verificar si la fuerza eléctrica actúa o no sobre ella, lo cual nos permite concluir si existe o no un campo eléctrico en dicho punto.

Se acostumbra decir que la fuerza eléctrica \vec{F} es ejercida por Q sobre q . Consideramos que la fuerza eléctrica que actúa sobre q se debe a la acción del campo eléctrico, y no a la acción directa de Q sobre q .

El campo de fuerza eléctrica se puede representar, en cada punto del espacio, por un vector que generalmente se simboliza por \vec{E} y que se denomina vector campo eléctrico. A continuación, se presentarán las características de este vector, es decir, su magnitud, su dirección y su sentido.

El valor del vector \vec{E} en un punto dado, suele denominarse intensidad del campo eléctrico en ese punto. Para definir esta magnitud, consideremos la carga Q mostrada en la *figura 1.8*, la cual crea un campo eléctrico en el espacio que la rodea. Al colocar una carga de prueba q en un punto cualquiera, como el P_1 por ejemplo, una fuerza eléctrica \vec{F} actuará sobre dicha carga de prueba. La intensidad del campo eléctrico en P_1 estará, por definición, dada por la expresión: $E = \frac{F}{q}$

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

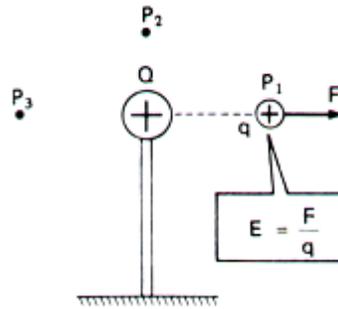


FIGURA 1.8. En cada punto del espacio alrededor de una carga, el campo de fuerza eléctrica está representado por un vector de campo eléctrico.

Es fácil observar que la unidad para la medida de \vec{E} será, en el SI, el newton por coulomb (N/C).

Observemos que de $E = F/q$ resulta $F = qE$ es decir, si conocemos la intensidad, E , del campo eléctrico en un punto, con la expresión anterior podremos calcular el valor de la fuerza que actúa sobre una carga cualquiera q , colocada en dicho punto.

La dirección y el sentido del vector campo eléctrico en un punto están, por definición, dados por la dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre la carga de prueba (positiva) colocada en el punto.

Movimiento de cargas en un campo eléctrico. Suponga que una carga positiva q se coloca en el punto P_1 , donde hay un campo eléctrico E_1 creado por la carga Q con una fuerza dirigida hacia la derecha, y por consiguiente, tenderá a desplazarse en el sentido de esta fuerza. Como el vector \vec{E}_1 tiene el mismo sentido de dicha fuerza, concluimos que la carga positiva q tiende a desplazarse en el sentido del campo eléctrico. De manera general, podemos comprobar que, en cualquier punto en que se sitúe la carga positiva q , tenderá a desplazarse en el sentido del vector campo eléctrico que existe en dicho punto (esta conclusión es consecuencia natural del hecho de que el sentido de \vec{E} , se ha definido como igual al sentido de la fuerza que actúa sobre la carga de prueba positiva).

1.7 Comportamiento de un conductor electrizado.

Suponga que un cuerpo conductor, por ejemplo, un bloque de metal, es frotado en determinada región de su superficie, adquiriendo así cargas negativas. Obviamente, la electrización aparecerá en la región friccionada.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Pero dichas cargas, constituidas por un exceso de electrones, se repelen mutuamente y actúan sobre los electrones libres del conductor, haciendo que se desplacen hasta llegar a una distribución final, denominada “situación de equilibrio electrostático”, en la cual las cargas del conductor se muestran en reposo. Al llegar a esta situación final de equilibrio electrostático (lo cual sucede en un lapso sumamente pequeño), se observa experimentalmente que la carga negativa adquirida por el conductor está distribuida en toda su superficie (*figura 1.9*).



FIGURA 1.9. Los electrones libres adquiridos por el conductor se distribuyen en toda su superficie.

Si el conductor fuese electrizado positivamente, observaríamos el mismo resultado final.

Debe observarse que este comportamiento es característico de los conductores. En realidad, si frotásemos un aislante en una determinada región de su superficie, la carga adquirida no quedaría distribuida, sino que permanecería en equilibrio en la región donde se generó. Esto se debe a que el aislante no posee electrones libres, y por consiguiente, las cargas eléctricas no podrán desplazarse en este material.

Por lo tanto, si un conductor electrizado está en equilibrio electrostático, las cargas eléctricas se hallarán distribuidas en su superficie.

Como vimos, cuando se alcanza el equilibrio electrostático las cargas eléctricas de un conductor están distribuidas en su superficie, y se encuentran en reposo.

En tales condiciones, la distribución de estas cargas debe ser tal que anule el campo eléctrico en cualquier punto interno del conductor. En efecto, si el campo eléctrico en el interior de dicho conductor fuera diferente de cero, los electrones libres ahí existentes entrarían en movimiento debido a la acción de dicho campo. Como las cargas en el conductor están en equilibrio, este movimiento no puede tener lugar, y por lo tanto, el campo eléctrico debe ser nulo en el interior del conductor.

Vamos a analizar, ahora, lo que sucede en puntos de la superficie del conductor en equilibrio estático. En estos puntos es posible que exista un campo eléctrico, sin que ello altere la condición

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

de equilibrio electrostático, pues el vector E es perpendicular a la superficie del conductor, tal como se muestra en los puntos B, C y D de la *figura 1.10*. De hecho, si el campo eléctrico no fuera perpendicular a la superficie, como se indica en el punto A de la *figura 1.10*, tendría una componente E_t tangente a la superficie del conductor. Si existiera tal componente, los electrones libres que ahí se encuentran estarían en movimiento debido a la acción de E_t . De modo que esta componente no puede existir, pues el conductor se halla en equilibrio electrostático. Al no existir componente tangencial, el vector E tendrá que ser perpendicular a la superficie del conductor. Obviamente, al actuar en esta dirección el campo no podrá provocar movimiento de cargas, pues el conductor está rodeado por aire, el que, como ya sabemos, es aislante.

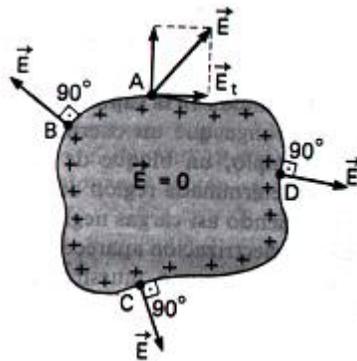


FIGURA 1.10. El vector campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado y en equilibrio electrostático, es perpendicular a la superficie de dicho conductor.

Blindaje electrostático. Los hechos estudiados anteriormente en esta sección son válidos aun cuando el conductor sea hueco; es decir, si presenta una cavidad interna, como el bloque metálico de la *figura 1.11*. Cuando un cuerpo como este es electrizado, las cargas eléctricas tienden rápidamente a ubicarse en su superficie externa, distribuyéndose a manera de nulificar el campo eléctrico en todos los puntos del interior del conductor (ya sea en la parte maciza del bloque, o en su cavidad, *figura 1.11*).

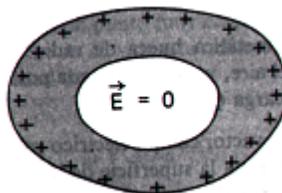


FIGURA 1.11. El campo eléctrico en el interior de un conductor cargado o electrizado, en equilibrio electrostático, es nulo.

De esta manera, una cavidad en el interior de un conductor es una región que no será alcanzada por los efectos eléctricos producidos exteriormente, pues el campo eléctrico en el agujero siempre es nulo, y no hay carga eléctrica distribuida en su pared (la carga se localiza en la

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

superficie externa del conductor). Por este motivo, un conductor hueco se puede emplear para producir un “blindaje electrostático”: cuando queremos proteger un aparato cualquiera contra las influencias eléctricas, lo encerramos dentro de una cubierta metálica, es decir, lo colocamos en una cavidad en el interior de un cuerpo conductor. En estas condiciones decimos que el objeto está blindado electrostáticamente, puesto que ningún fenómeno electrostático externo podrá alterar su funcionamiento. Si se observara el interior de un aparato de televisión, por ejemplo, podría notar que algunas válvulas u otros dispositivos, están envueltos por cubiertas metálicas, por lo cual se encuentran blindados electrostáticamente por dichos conductores.

El poder de blindaje de una cubierta metálica ya era conocido por Faraday, quien para comprobarlo experimentalmente, realizó una prueba que se hizo famosa. Sosteniendo en sus manos un electroscopio, Faraday se colocó en el interior de una jaula metálica, que su ayudante procedió a electrizar poderosamente. A pesar de que la superficie de la jaula no es continua, constituyó un blindaje electrostático muy eficaz, de manera que Faraday no sufrió ni observó deflexión alguna en las hojas del electroscopio.

En la actualidad se puede realizar el experimento en un laboratorio moderno, que también compruebe la efectividad de un blindaje electrostático, por ejemplo, una máquina electrostática dirija una potente descarga sobre la carrocería metálica de un automóvil, y un científico colocado en el interior del auto, se encontrará totalmente protegido contra los efectos de este rayo artificial.

1.8 Rigidez dieléctrica.

Como sabemos, los dieléctricos (o aislantes) son sustancias en las cuales los electrones se encuentran fuertemente ligados a los núcleos de los átomos, es decir, en la estructura interna de estos materiales no existen cargas libres.

Pero supóngase que aplicamos un campo eléctrico a un cuerpo aislante colocándolo, por ejemplo, entre dos placas electrizadas, como muestra la *figura 1.12*. En estas condiciones, una fuerza eléctrica actuará sobre todos los electrones del aislante, tendiendo a desprenderlos de sus átomos. Si la intensidad del campo eléctrico no es muy grande, los electrones continuarán ligados a los núcleos de sus átomos, y la fuerza eléctrica provocará únicamente una polarización del dieléctrico, como vimos anteriormente.

Al aumentar la intensidad del campo aplicado al aislante, el valor de la fuerza que actúa sobre los electrones también aumenta. Es fácil prever que para cierto valor del campo eléctrico, esta fuerza será suficiente para remover uno o más electrones de cada átomo; es decir, que se

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

convertirán en electrones libres. Entonces, como el material posee ahora un número muy grande de electrones libres en su estructura, se habrá transformado en un conductor de electricidad. Este proceso puede ocurrir con cualquier aislante, dependiendo solamente del valor del campo eléctrico aplicado como veremos a continuación.

El mayor valor del campo eléctrico que puede aplicarse a un aislante sin que se vuelva conductor, se denomina rigidez dieléctrica del material. La rigidez dieléctrica varía de un material a otros pues, como era de esperar, algunos materiales soportan campos muy intensos y se conservan como aislantes, mientras que otros se vuelven conductores aun cuando se encuentren bajo la acción de campos eléctricos de intensidades relativamente bajas.

Así pues, experimentalmente podemos comprobar que la rigidez dieléctrica del vidrio pyrex es $14 \times 10^6 \text{ N/C}$, mientras que la de la mica puede alcanzar $100 \times 10^6 \text{ N/C}$. Por su parte, la rigidez dieléctrica del aire es mucho menor, y vale cerca de $3 \times 10^6 \text{ N/C}$; luego entonces, mientras la intensidad del campo eléctrico aplicado a una masa de aire sea inferior a $3 \times 10^6 \text{ N/C}$, este aire será aislante. Cuando el campo aplicado sobrepasa este valor, el aire se vuelve conductor.

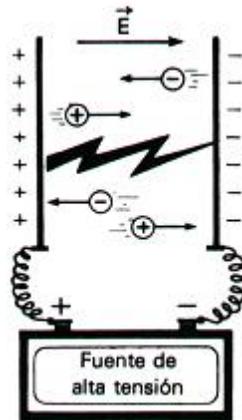


FIGURA 1.12. Cuando el campo eléctrico entre las placas excede el valor de la rigidez dieléctrica del aire, este se vuelve conductor.

Estas ideas nos permiten entender un fenómeno que observamos con cierta frecuencia en nuestra vida diaria: una chispa eléctrica que salta de un cuerpo electrizado hacia otro, colocado cerca de él. Consideremos, por ejemplo, dos placas electrizadas con cargas de signos contrarios, separadas por una capa de aire, según se observa en la *figura 1.12*. Si el campo eléctrico originado por dichas placas es inferior a $3 \times 10^6 \text{ N/C}$, el aire existente entre ellas permanecerá aislante e impedirá el paso de cargas de una placa hacia otra. Pero si el campo eléctrico se vuelve mayor que este valor, es decir, si la intensidad del campo sobrepasa el valor de la rigidez dieléctrica del aire, éste se vuelve conductor. En estas condiciones el aire poseerá un gran número de

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

electrones libres, presentando iones positivos e iones negativos. Estos iones son atraídos por las placas y se mueven a través del aire haciendo que haya una descarga eléctrica de una placa a otra (*figura 1.12*). Esta descarga viene acompañada de una chispa (omisión de luz) así como de un pequeño ruido (chasquido) causado por la expansión súbita del aire al ser calentado por la descarga eléctrica.

Por tanto, siempre que observamos una chispa eléctrica saltar de un cuerpo hacia otro (del peine al cabello, de una ropa de “nylon” hacia el cuerpo, o bien, entre dos terminales de un interruptor eléctrico, etc.) podemos concluir que la rigidez dieléctrica del aire situado entre tales cuerpos fue sobrepasada convirtiéndose así (ionización) en un conductor.

La situación que acabamos de analizar se asemeja a lo que sucede cuando cae un rayo durante una tormenta, lo cual, como se sabe, está acompañado de un relámpago y de un trueno.

1.9 Naturaleza y formación del rayo.

La realización de instalaciones de protección contra los rayos exige un conocimiento adecuado del fenómeno contra el que nos proponemos protegernos, y de esta forma diseñar e implementar la instalación adecuada para este propósito.

1.9.1 Ionización.

Cuando fluye una corriente eléctrica por un conductor metálico, el flujo sólo tiene lugar en un sentido, ya que la corriente es transportada en su totalidad por los electrones. En cambio en los líquidos y gases, se hace posible un flujo en dos sentidos debido a la ionización.

La ionización es el proceso químico o físico mediante el cual se producen iones, átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra. Hay varias maneras por las que se pueden formar iones de átomos o moléculas.

En ciertas reacciones químicas la ionización ocurre por transferencia de electrones; por ejemplo, el cloro reacciona con el sodio para formar cloruro de sodio, que consiste en iones de sodio (Na^+) y iones de cloruro (Cl^-). La condición para que se formen iones en reacciones químicas suele ser una fuerte diferencia de electronegatividad entre los elementos que reaccionan o por efectos de mesomería que estabilizan la carga. Además la ionización es favorecida por medios polares que consiguen estabilizar los iones.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En los procesos físicos se suelen separar los electrones de una molécula neutra. Para lograrlo hay que aportar la energía necesaria. Esto es posible en forma de energía térmica (se suele formar un plasma), con irradiación ionizante (por ejemplo luz ultravioleta, rayos-X o irradiación radioactiva tipo alfa, beta o gama), aplicando campos eléctricos fuertes o bombardeando una muestra con partículas. Se genera de esta forma una partícula con carga positiva (catión) además del electrón liberado.

En la mayoría de los fenómenos atmosféricos se puede considerar al aire como un aislante casi perfecto, sin embargo siempre es posible detectar y medir una corriente eléctrica débil en la atmósfera (con o sin nubes).

En ausencia de nubes, es decir, en condiciones de buen tiempo, se puede detectar la existencia de un campo eléctrico muy tenue normal a la superficie terrestre, orientada de arriba a abajo y que decrece con la altura siendo del orden de 200 V/m.

Los iones que se encuentran en la atmósfera son producidos principalmente por:

Rayos cósmicos: en general son protones muy energéticos que penetran en la atmósfera chocando con las moléculas neutras del aire de forma que se puede liberar algún electrón.

Radiación ultravioleta solar: produce el mismo efecto que la anterior aunque en este caso la ionización es producida por un fotón. Ambos fenómenos ocurren principalmente en la alta atmósfera, por encima de 70 Km. y, aunque su efecto puede llegar a la superficie terrestre, su efecto queda muy atenuado.

Radiación terrestre natural: principalmente sobre los continentes y de un efecto muy pequeño comparado con los dos anteriores.

Como consecuencia de los procesos anteriores aparece una capa atmosférica, llamada ionosfera, caracterizada por un brusco aumento de la conductividad eléctrica. Este hecho es particularmente intenso a partir de los 80 km. En ella los gases están ionizados al haber perdido los electrones más periféricos que quedan libres circulando entre iones positivos, negativos y moléculas neutras. Cuando una partícula de movimiento rápido, como un electrón, una partícula alfa o un fotón, colisiona con un átomo de gas, éste expulsa un electrón, dejando un ion cargado. Los iones convierten en conductor al gas.

1.9.2 Nubes.

Una nube es una forma condensada de humedad atmosférica compuesta de pequeñas gotas de agua o de diminutos cristales de hielo. Las nubes son el principal fenómeno atmosférico visible. Como tales, representan un paso transitorio, aunque vital, en el ciclo del agua. Este ciclo incluye la evaporación de la humedad desde la superficie de la Tierra, su transporte hasta niveles superiores de la atmósfera, la condensación del vapor de agua en masas nubosas y el retorno final del agua a la tierra en forma de precipitaciones de lluvia y nieve.

Las diferencias entre formaciones nubosas derivan, en parte, de las diferentes temperaturas de condensación. El movimiento de aire asociado al desarrollo de las nubes también afecta a su formación. Las nubes que se crean en aire en reposo tienden a aparecer en capas o estratos; las que se forman entre vientos o aire con fuertes corrientes verticales presentan un gran desarrollo vertical.

Las nubes desempeñan una función muy importante, ya que modifican la distribución del calor solar sobre la superficie terrestre y en la atmósfera. En general, ya que la reflexión de la parte superior de las nubes es mayor que la de la superficie de la Tierra, la cantidad de energía solar reflejada al espacio es mayor en días nublados. Aunque la mayor parte de la radiación solar es reflejada por las capas superiores de las nubes, algo de radiación penetra hasta la superficie terrestre, que la absorbe y la emite de nuevo. La parte inferior de las nubes es opaca para esta radiación terrestre de onda larga y la refleja de vuelta a la Tierra.

El resultado es que la atmósfera inferior absorbe, en general, más energía calorífica en días nublados por la presencia de esta radiación atrapada. Por el contrario, en un día claro la superficie de la Tierra absorbe inicialmente más radiación solar, pero esta energía se disipa muy rápido por la ausencia de nubes. Sin considerar otros efectos meteorológicos relacionados, la atmósfera absorbe menos radiación en días claros que en días nublados.

Las nubes suelen dividirse en cuatro familias principales según su altura: nubes altas, nubes medias, nubes bajas y nubes de desarrollo vertical. A continuación se describen sólo las familias principales y los géneros más importantes, como se muestra en la siguiente *figura 1.13*.

Nubes altas. Son nubes compuestas por partículas de hielo, situadas a altitudes medias de 8 km sobre la tierra. Esta familia contiene tres géneros principales. Los cirros están aislados, tienen aspecto plumoso y en hebras, a menudo con ganchos o penachos, y se disponen en bandas. Los

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

cirroestratos aparecen como un velo delgado y blanquecino; en ocasiones muestran una estructura fibrosa. Los cirrocúmulos forman globos y mechones pequeños y blancos parecidos al algodón; se colocan en grupos o filas.

Nubes medias. Son nubes compuestas por pequeñas gotas de agua, tienen una altitud variable, entre 3 y 6 km sobre la tierra. Esta familia incluye dos géneros principales. Los altoestratos parecen velos gruesos grises o azules. Los altocúmulos tienen el aspecto de globos densos, algodonosos y esponjosos un poco mayores que los cirrocúmulos.

Nubes bajas. Estas nubes, también compuestas por gotas pequeñas de agua, suelen tener una altitud menor de 1,6 km. Este grupo comprende tres tipos principales. Los estratocúmulos son grandes rollos de nubes, de aspecto ligero y de color gris. Con frecuencia cubren todo el cielo. Debido a que la masa nubosa no suele ser gruesa, a menudo aparecen retazos de cielo azul entre el techo nuboso. Los nimboestratos son gruesos, oscuros y sin forma. Son nubes de precipitación, desde las que casi siempre llueve o nieva. Los estratos son capas altas de niebla. Aparecen, como un manto plano y blanco, a alturas por lo general inferiores a los 600 m. Cuando se fracturan por la acción del aire caliente en ascensión, se ve un cielo azul y claro.



FIGURA 1.13. El prefijo “alto” corresponde a las nubes de nivel medio. El prefijo y sufijo “nimbo” (lluvia en latín) se utiliza para las nubes que producen precipitaciones. El prefijo “cirro” se utiliza para denominar nubes de gran altitud.

Nubes de desarrollo vertical. Las nubes de esta familia alcanzan altitudes que varían desde menos de 1.6 km hasta más de 13 km sobre la tierra. En este grupo se incluyen dos tipos principales. Los cúmulos tienen forma de cúpula o de madejas de lana. Se suelen ver durante el medio y el final del día, cuando el calor solar produce las corrientes verticales de aire necesarias

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

para su formación. La parte inferior es, en general, plana y la superior redondeada, parecida a una coliflor. Los cumulonimbos son oscuros y de aspecto pesado. Se alzan a gran altura, como montañas, y muestran a veces un velo de nubes de hielo, falsos cirros, con forma de yunque en su cumbre. Estas nubes tormentosas suelen estar acompañadas por aguaceros violentos e intermitentes.

1.9.3 Acumulación de electricidad en las nubes.

Todavía no se sabe con seguridad como las nubes de tormenta se cargan eléctricamente. La estructura eléctrica de una nube de este tipo es muy compleja: resulta de la ocurrencia simultánea, en su interior, de procesos macrofísicos (que actúan en escalas de kilómetros) y microfísicos (que actúan en escalas de centímetros o metros). En función de esos procesos, son generadas cargas intensas dentro de las nubes.

Diversos procesos microfísicos buscan explicar cómo las colisiones de las partículas de agua y hielo generan las cargas positivas y negativas dentro de una nube. Los cristales de hielo dentro de las nubes cumulonimbos se frotan entre sí debido a las corrientes aéreas ascendentes y descendentes (convección) en estas nubes, acumulando así una carga estática fuerte. Los cristales positivamente cargados tienden a ascender lo que hace que la capa superior de la nube acumule una carga estática positiva. Los cristales negativamente cargados y los granizos caen a las capas del centro y del fondo de la nube que acumula una carga estática negativa. Las nubes cumulonimbos que no producen suficientes cristales de hielo, en general, no pueden producir bastante electricidad estática para causar el rayo.

Los procesos macrofísicos como es el gravitatorio, sostiene que la gravedad es el factor más importante: las cargas asociadas a las partículas mayores (de hasta algunos centímetros) tienden a desplazarse hacia la parte inferior, y las asociadas a las partículas menores (de fracciones de milímetro) tienden a quedar arriba. El proceso de convección, hoy menos aceptado, asume que las cargas internas resultan simplemente de la distribución de las cargas eléctricas existentes en la atmósfera, sin la necesidad de considerar un proceso dentro de la nube.

La aparición de relámpagos depende de factores tales como el grado de ionización atmosférico, además del tipo y la concentración de la precipitación.

La distribución de las cargas eléctricas y los movimientos del aire que afectan a una nube tormentosa pueden dar origen a rayos como se ilustra en la *figura 1.14*.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Las cargas se distribuyen normalmente como se ha indicado antes, de acuerdo con las investigaciones estadísticas efectuadas, pero no faltan casos con distinta disposición e incluso con una distribución de cargas totalmente contraria, es decir, con las cargas positivas distribuidas por la parte inferior de la nube y las negativas concentradas en la inferior. Las verificaciones realizadas han permitido comprobar que el número de éstas representan el 10% del total, por lo que sus consecuencias prácticas pueden considerarse despreciables.

En virtud de lo que antecede podemos suponer que una nube viene a ser como un enorme generador de cargas electrostáticas, o bien (de acuerdo con alguna teoría) como un conjunto de numerosos generadores llamados “células”.

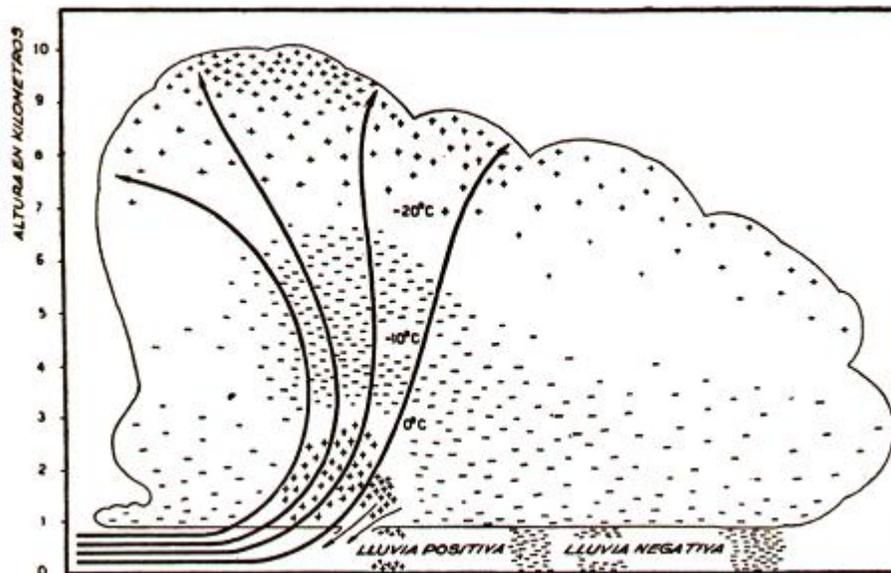


FIGURA 1.14. Esquema general simplificado de la posición de las cargas eléctricas en una nube tormentosa. En líneas generales el fenómeno aparece como una acumulación de cargas eléctricas negativas en la parte inferior de la nube y cargas eléctricas positivas en la parte superior.

Queda establecido que cada célula destinada a la formación de cargas electrostáticas tiene una vida perfectamente definida y limitada. Las mediciones realizadas nos llevan a afirmar que la vida media de una célula generatriz es de una hora aproximadamente, mientras que el máximo de cargas electrostáticas se alcanza en unos 15 ó 20 minutos, en cuyo tiempo se realiza, si la carga es suficiente, la descarga en el interior de la nube o entre la nube y la tierra.

1.9.4 Formación de la descarga.

La superficie inferior de la nube y la del terreno inmediato actúan, pues, como las armaduras de un inmenso condensador cuyo dieléctrico es la capa de aire existente entre la nube y el terreno.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Sobre éste aparecen por la inducción electrostática las cargas positivas. En la capa de aire entre la nube y la tierra se crea así un campo eléctrico con una diferencia de potencial que es la causa principal de la formación de la descarga.

El mecanismo de formación de la descarga presenta gran analogía con la perfección del dieléctrico de un condensador sometido a una diferencia de potencial creciente entre sus armaduras.

La forma más probable en que se manifiesta una descarga directa entre nubes y tierra es la ilustrada en las *figuras 1.15*.

De la parte inferior de la nube, donde la concentración de las cargas negativas es mayor, parten las cargas a lo largo de recorridos tortuosos y ramificados, a menudo acompañadas de otras salidas simultáneas procedentes de otros puntos de la nube. La propagación de arriba abajo se realiza en forma de impulsos, con suspensiones en el avance de 10 a 12 microsegundos entre cada impulso. La velocidad de propagación durante estos impulsos es generalmente de orden de los 10,000 km/s, mientras que la velocidad efectiva de propagación de la descarga comprendiendo también los tiempos de suspensión, se mantiene en general en el orden de los 100 km/s y raramente supera los 300 km/s.

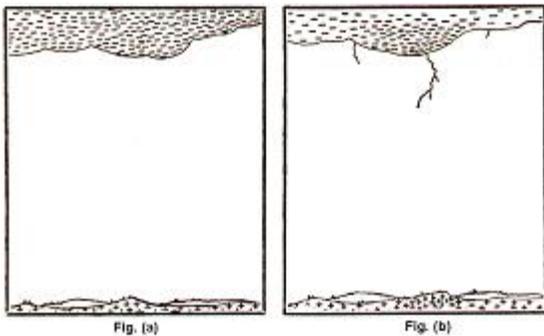


FIGURA 1.15.(a) La superficie inferior de la nube y la del terreno subyacente forman las armaduras de un enorme condensador entre las cuales se interpone el aire como dieléctrico. Al igual que en un condensador, cuando la diferencia de potencial entre las armaduras es lo bastante elevada (rigidez dieléctrica) el dieléctrico se perfora y sobreviene una descarga a través del mismo.

FIGURA 1.15.(b) Las cargas eléctricas negativas dejan la parte inferior de la nube en los puntos en que el gradiente de potencial es particularmente elevado y penetran en el dieléctrico siguiendo un recorrido tortuoso y ramificado. Las cargas avanzan a impulsos sucesivos separados por pausas breves.

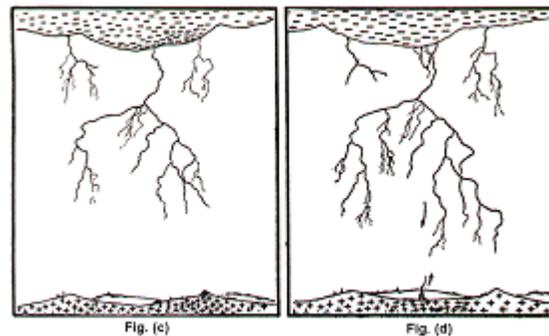


FIGURA 1.15.(c) La propagación de las cargas negativas adquiere importancia con un gran número de ramificaciones, todas las cuales avanzan a idéntica velocidad y con impulsos a pequeños intervalos. El recorrido de las cargas negativas se caracteriza por una débil luminosidad.

FIGURA 1.15.(d) Del terreno subyacente, en el que se produce una concentración enorme de cargas positivas, parten cargas de este signo hacia arriba y se encuentran con las cargas negativas descendentes en un punto generalmente próximo a la superficie del terreno, a una altura que varía entre los 15 y 50 metros.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

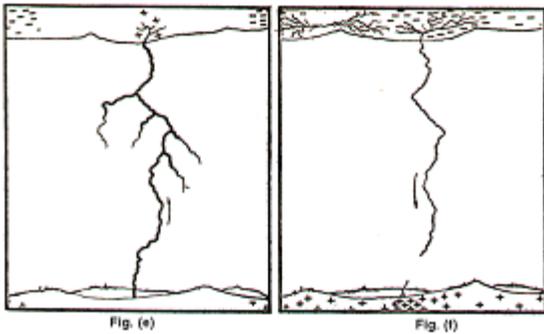


FIGURA 1.15.(e) Del terreno brota la descarga de retorno, muy luminosa y de gran intensidad. Esta descarga transporta las cargas positivas que suben de tierra a la nube y neutralizan las cargas negativas contenidas en aquélla. Esta descarga es la que produce el trueno.

FIGURA 1.15.(f) El desequilibrio de la disposición de las cargas que se ha venido formando en la nube produce descargas internas en la propia nube. Poco a poco se forma una concentración de cargas negativas en la superficie inferior de la nube y cargas positivas en la superficie del terreno. Otra serie de cargas negativas abandona la nube y se dirige a tierra siguiendo el mismo recorrido de la primera descarga.

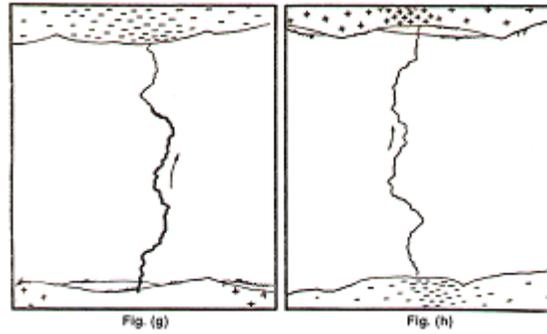


FIGURA 1.15.(g) El terreno parte otra nueva serie de carga positiva formando una segunda descarga de retorno. También esta segunda descarga es muy luminosa y de gran intensidad (aunque inferior a la primera).

FIGURA 1.15.(h) Una nueva serie de cargas negativas abandona la nube y llega a tierra. Este fenómeno, con intensidad decreciente, puede reproducirse numerosas veces en una serie de descargas sucesivas.

El descenso de las cargas negativas prosigue su recorrido que se hace cada vez más tortuoso y ramificado, frecuentemente con varias decenas de ramas. Esta propagación de las cargas negativas de la nube hacia la tierra es silenciosa y débilmente luminosa.

Cuando los extremos de la chispa se acercan al terreno, sobre el cual se han formado entretanto grandes concentraciones de cargas positivas, desde un punto de éste, con una concentración de cargas eléctricas muy alta, parte una oleada análoga de cargas positivas hacia arriba.

El encuentro de las cargas procedentes de la nube con las positivas que se alzan desde el suelo se efectúa generalmente a una altura de 15 a 50 metros. En este punto se produce entonces la descarga propiamente dicha (descarga de retorno), con un flujo intenso de cargas positivas que, desde el suelo llegan a la nube siguiendo a la inversa del mismo recorrido de las cargas negativas desprendidas de la nube.

La velocidad media de la descarga de retorno viene a ser de unos 20,000 km/s, mientras que los valores de la corriente se encuentran comprendidos entre los 10 y los 200 kA y ocasionalmente 500 kA.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

La descarga de retorno, que adquiere una luminosidad intensa y da lugar al trueno, es la que nos interesa de modo especial. Esta descarga es en la que la corriente alcanza los valores más altos para los cuales han de calcularse las protecciones destinadas a salvaguardar los edificios.

Resulta particularmente interesante saber, incluso a efectos prácticos, que aunque las cargas negativas vienen a tierra con diversas ramificaciones, solo una de éstas choca con las cargas positivas que suben desde el terreno dando lugar a la descarga de retorno.

Cuando la descarga de retorno alcanza la nube se neutraliza una vasta zona de aquélla, lo que origina un desequilibrio de las cargas en el interior de la misma, con las consiguientes descargas internas.

El reequilibrio de las cargas en la nube, con concentración de cargas negativas en su parte inferior, puede dar lugar a otra migración de cargas negativas de la nube hacia la tierra, la cual no se realiza esta vez a lo largo de recorridos ramificados, sino que sigue la columna de gases fuertemente ionizados que dejó la descarga de retorno. Las cargas negativas llegan, pues a tierra siguiendo un curso tortuoso pero sin pausa, y dan lugar a una nueva descarga de retorno.

Estos fenómenos, llamados descargas sucesivas, pueden repetirse numerosas veces después de la descarga principal.

Las estadísticas de las mediciones efectuadas muestran que más del 50% de los rayos tienen por lo menos dos descargas, habiendo algunos en los que se han registrado hasta cuarenta descargas sucesivas. La velocidad y las características de propagación de las cargas negativas, en las descargas sucesivas, dependen del intervalo de tiempo que media entre la descarga de retorno y la salida de una carga sucesiva. Si el intervalo de tiempo es breve la propagación de las cargas negativas que constituyen las descargas sucesivas se realiza con una velocidad uniforme de 2,000 km/s aproximadamente; pero si entre la descarga de retorno y la primera de las descargas sucesivas transcurre un tiempo mayor, la propagación de las cargas negativas puede producirse otra vez directamente, o bien a impulsos, como en la primera descarga.

1.9.5 Otros tipos de descarga.

El mecanismo del rayo, tal como se ha descrito, no es el único posible, sino simplemente el más probable de acuerdo con los datos estadísticos, siendo también por eso el más importante a los efectos prácticos que nos interesan.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Otros tipos de rayos son los que se inician con la migración de cargas eléctricas positivas que parten de tierra hacia la nube, con una propagación a impulsos exactamente igual a la descrita en el párrafo anterior, y seguida de una descarga muy luminosa y violenta cuando la cabeza de la descarga alcanza la nube.

También este tipo de rayo puede dar lugar a descargas sucesivas con un mecanismo análogo al citado.

Se puede decir que el tipo de descarga descrito en el párrafo anterior es más frecuente en los casos donde la descarga sucede entre una nube y un terreno abierto.

El rayo con cargas positivas ascendentes es, por el contrario, más probable cuando la descarga se produce entre la nube y una estructura metálica de grandes dimensiones y muy elevada (torre de hierro, rascacielos con armazón metálico, etc.). Fenómeno rarísimo y de ninguna importancia práctica es el rayo globular constituido por una bola de fuego que se mueve lentamente a lo largo de recorridos irregulares y se descarga una y otra vez en tierra provocando un fuerte trueno en cada ocasión.

A efectos de la protección de edificios tiene escasa importancia el estudio de las descargas que se produce en el interior de una nube sin afectar al terreno subyacente. Este tipo de descargas, sin embargo, tiene gran interés para el estudio del comportamiento de las líneas eléctricas, por cuanto dan lugar a trenes de ondas de tensión a lo largo de las líneas, y a fenómenos transitorios contra los que hay proteger las instalaciones y a la maquinaria. En la *fig. 1.16* se muestra una descarga en el interior de una nube que no afecta al terreno circundante, así como a la distribución de los potenciales.



FIGURA 1.16. Descarga en el interior de una nube que no interesa el terreno subyacente y distribución de los potenciales en la atmósfera circundante.

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS Y CONSECUENCIAS DE LOS RAYOS EN ESTRUCTURAS E INSTALACIONES

CAPITULO II

2. CARACTERÍSTICAS Y CONSECUENCIAS DE LOS RAYOS EN ESTRUCTURAS E INSTALACIONES

El estudio de las consecuencias de las descargas directas, realizado mediante el examen de un gran número de casos, y la paciente elaboración de las correspondientes estadísticas, nos permiten una idea bastante clara sobre las consecuencias del rayo, y nos proporcionan, por otra parte, elementos precisos y fundamentales para elaborar una técnica de protección.

Los experimentos de laboratorio constituyen un medio de investigación muy útil cuya importancia no debemos subestimar, pero el sistema para valorar las consecuencias del rayo continúa siendo la observación sistemática de los fenómenos naturales y el análisis estadístico de las observaciones realizadas. Este trabajo ha sido efectuado y prosigue desarrollándose por gran número de experimentadores que nos han suministrado una colección de estudios muy importantes, hasta el punto de que los datos en que se basa la técnica de protección de edificios contra los rayos y de la de las instalaciones eléctricas contra sobretensiones de origen atmosférico, son bastante seguros de un modo fundamental.

El estudio de las consecuencias de la descarga directa sobre las estructuras, nos permite diseñar los medios de defensa adecuados, y anular o reducir a límites inofensivos las consecuencias del rayo sobre las estructuras que queramos proteger.

2.1 Magnitudes y características de los rayos.

El conocimiento de las magnitudes características de los rayos es de importancia fundamental para la realización de medios prácticos de protección.

Este conocimiento es el objetivo principal al que se han dirigido las investigaciones experimentales a que hemos aludido en el capítulo anterior.

Téngase en cuenta que los medios de protección se disponen para protegernos de rayos que *han de caer* y que nosotros no conocemos más que a través de las mediciones realizadas con relación a un número muy grande de rayos que ya han caído.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Este es un concepto muy importante sobre el cual está basada toda la técnica de instalación de pararrayos.

Las instalaciones de pararrayos están dimensionadas y adecuadas a valores de tensión, corriente, duración y número de descargas que aparecen como más probables, a base de las observaciones realizadas, pero nada excluye la posibilidad de que una instalación de pararrayos que acabamos de construir, soporte en un futuro, una descarga con características muy distintas, aunque las probabilidades sean muy escasas.

Consideraciones de carácter económico así como práctico, dificultan por otra parte la realización de pararrayos con seguridad demasiado elevada a fin de proteger contra cualquier descarga posible.

Hemos aclarado, un concepto de importancia práctica fundamental, las características de una instalación de pararrayos son el resultado de una investigación de carácter probabilístico, y sujetas por consiguiente a cierto grado de seguridad. Este grado de seguridad deberá considerarse tanto más elevado cuanto mayores sean las probabilidades de que se produzcan tormentas (nivel isoceráunico, véase apéndice A), puesto que también serán mayores las probabilidades de que se manifiesten descargas directas, tanto mayores y más graves serán las consecuencias y peligros provenientes de la caída de un rayo (por ejemplo, riesgo de incendio de un depósito de carburantes, o de explosiones).

Estas son las consideraciones principales en que se basa toda la técnica de realización de instalaciones de protección contra los rayos.

2.1.1 Probabilidad de que se produzcan tormentas.

Ya se han definido los niveles isoceráunicos, y se han proporcionado informes que permiten pasar del nivel isoceráunico en una región dada al número de rayos por año y por km^2 . Dichos resultados surgen de un proyecto en conjunto entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad, en el periodo comprendido entre 1983 y 1993, que proporcionan la densidad promedio anual de rayos en la republica mexicana y por estado (ver el apéndice A).

La distribución de los rayos, sin embargo no es uniforme en todo el año y la determinación de la probabilidad de la caída de un rayo en una zona determinada supone el conocimiento de la distribución de las descargas durante el año.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En la *figura 2.1* se ha representado en forma de diagrama la distribución de las cargas durante un año. El diagrama que muestra la figura, es válido para casi todas las regiones del hemisferio boreal, nos permite comprobar que la mayor parte de los rayos caen en el período comprendido entre junio y septiembre, siendo bastante baja la probabilidad de caída de rayos en los meses de invierno.

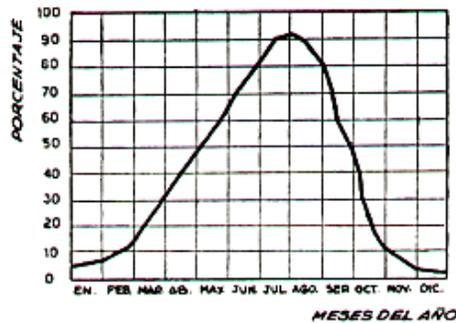


FIGURA 2.1. Porcentaje de caída de rayos, válido para todas las regiones del hemisferio boreal en los distintos meses del año.

Como se indica en el diagrama de la *figura 2.2*, la mayor parte de las formaciones de tormentas y, por consiguiente, de rayos caídos se produce en las primeras horas de la tarde entre las 14 y las 18 hrs.

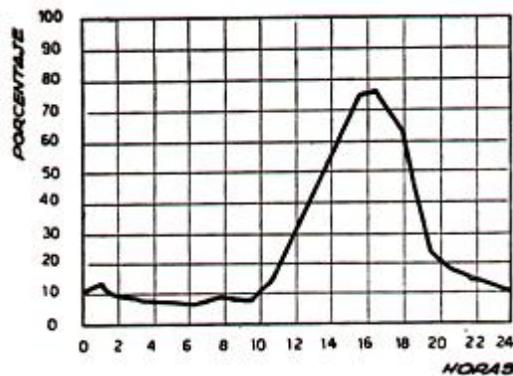


FIGURA 2.2. Porcentaje de distribución de la caída de rayos en las diversas horas del día.

2.1.2 Intensidad de corriente.

Un dato de importancia fundamental para el cálculo de una instalación de protección contra los rayos, es la intensidad de la corriente que puede circular en una sola descarga. Para esta intensidad habrá de dimensionarse el conductor de conexión a tierra.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Como ya hemos podido observar en los capítulos anteriores un rayo puede estar formado por numerosas descargas sucesivas de intensidad variable, generalmente decrecientes.

En la *figura 2.3* se ilustra, a título de ejemplo, un diagrama de la intensidad de un rayo constituido por numerosas descargas sucesivas.

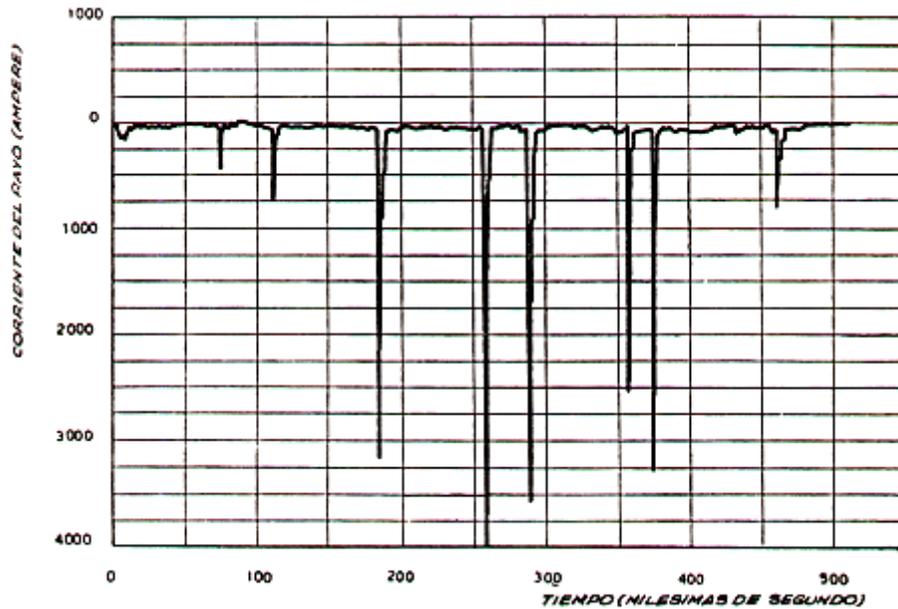


FIGURA 2.3. Diagrama de las corrientes de un rayo en función del tiempo. Todas las descargas de este tipo tienen corriente negativa, o sea correspondientes a las descargas de retorno de la tierra hacia la nube. Se observa, que a un movimiento de cargas positivas corresponde una intensidad de corriente negativa según la convención de signo normalmente ligada al signo de la corriente eléctrica.

En la *figura 2.4* también se muestra un oscilograma en el cual se hacen resaltar, mediante diversas escalas de tiempos y corrientes, las variaciones y los valores de las corrientes de un rayo con numerosas descargas sucesivas.

Finalmente en la *figura 2.5* se indica el porcentaje de rayos en función de la máxima corriente de una descarga. Por el diagrama se aprecia que los valores más probables de la intensidad de corriente de una sola descarga están comprendidos entre los 10 y los 200 kA y ocasionalmente 500 kA.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

2.1.3 Diferencia de potencial.

La diferencia de potencial que provoca la descarga de los rayos es extremadamente variable y depende de numerosos factores, tales como la altitud de las nubes con relación a la tierra, las características del objeto y las del edificio sobre el cual se descarga el rayo, entre otros.

0

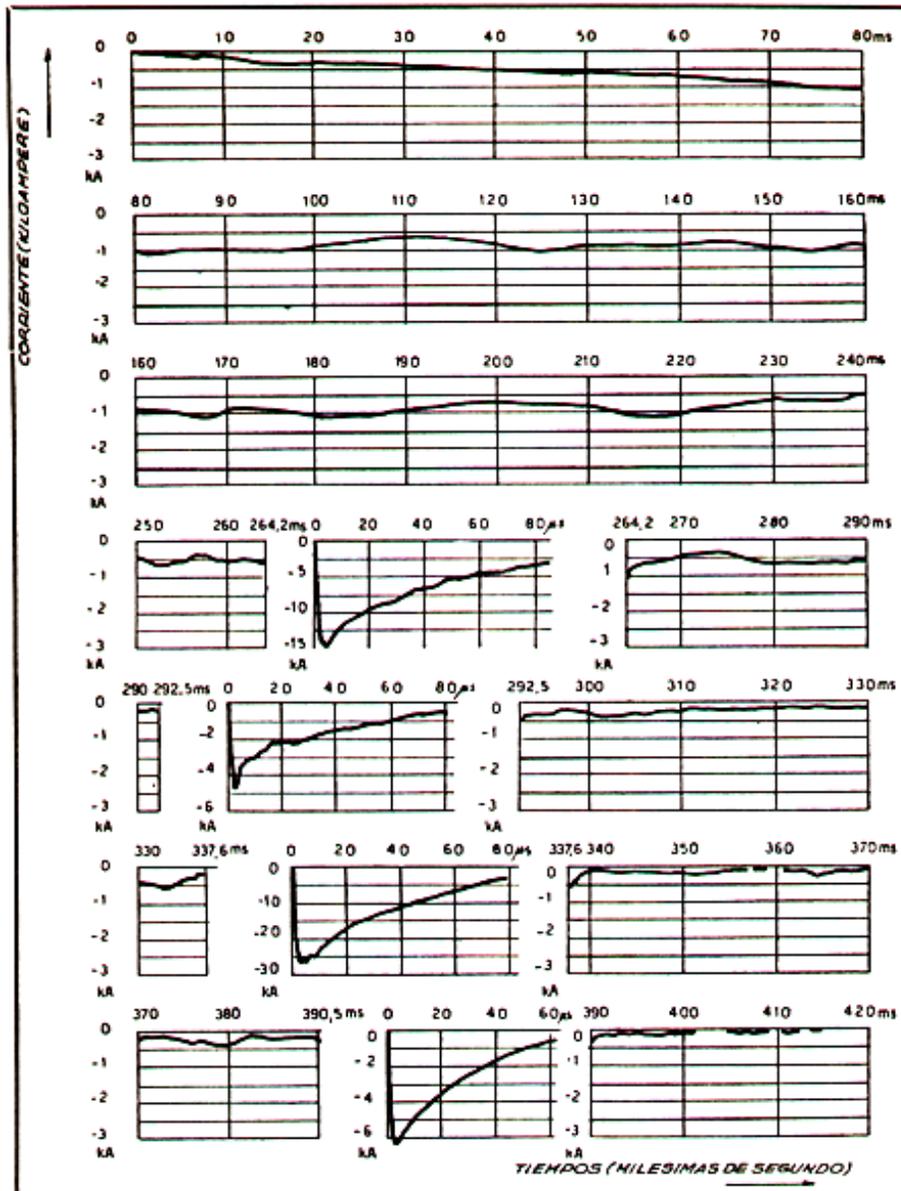


FIGURA 2.4. Oscilograma completo de un rayo obtenido con varios oscilógrafos dotados de diversas escalas de tiempo y distinta sensibilidad. El oscilógrafo lento y más sensible ha permitido poner de relieve las débiles descargas continuas. El oscilógrafo menos sensible y más rápido ha permitido representar en escala legible las intensas descargas de retorno con frente de onda extremadamente inclinado y que se extinguen en un tiempo muy corto valuable en milésimas de segundo.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

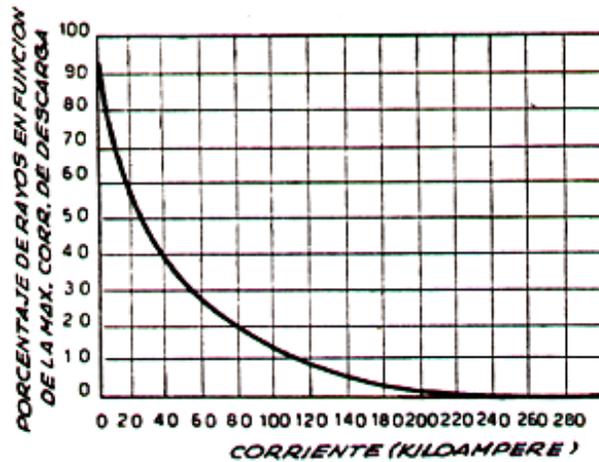


FIGURA 2.5. Porcentaje de rayos en función de la máxima corriente de descarga. El diagrama nos muestra el porcentaje de rayos en los que una descarga es igual o inferior al valor indicado en el diagrama.

En la *figura 2.6* se representa, en la forma acostumbrada, el porcentaje de rayos en función de la tensión de descarga. Por el diagrama se ve que los valores más probables de la diferencia de potencial que provoca el rayo están comprendidos entre los 100 y los 600 kV.

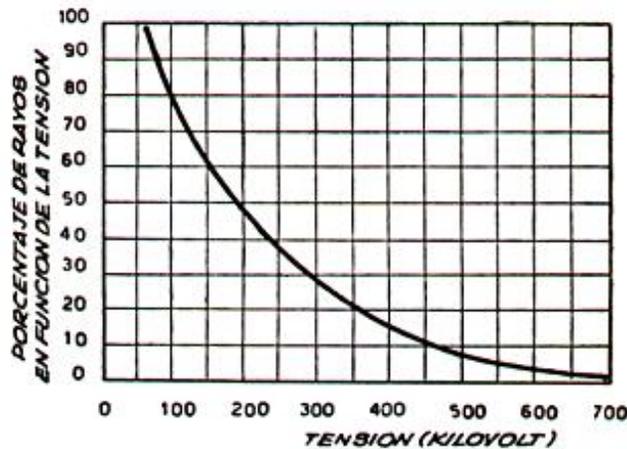


FIGURA 2.6. Porcentaje de rayos en función de la tensión de descarga.

Para el funcionamiento propiamente dicho de la instalación de pararrayos y de la relativa a la puesta a tierra, es de mayor interés la diferencia de potencial que aparece entre tierra y el punto más alto del edificio, valor éste que depende de la resistencia del conductor de tierra, o mejor dicho, tratándose de impulsos de gran pendiente, de la impedancia ofrecida a la onda. Es evidente que sobre estas magnitudes no es posible suministrar datos preventivos.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

2.1.4 Duración y número de descargas.

Como ya hemos podido observar es raro que un rayo esté formado por una sola descarga. Puede calcularse que los rayos con una sola descarga vienen a representar un 50% del total. Resulta, por otra parte, excepcional un rayo con más de 10 descargas.

El porcentaje de rayos en función del número de descargas está representado en la *figura 2.7*.

En la *figura 2.8*, por el contrario, se ilustra el porcentaje de rayos en función de su duración. La duración de un rayo entero, desde que empieza a manifestarse la migración de las cargas negativas que abandonan la nube hasta la total extinción del fenómeno (corriente reducida a cero), está en función del número de descargas sucesivas que componen el rayo completo, y relacionada al número de descargas por una correlación bastante estrecha. Son pocos los rayos de duración superior a un segundo.

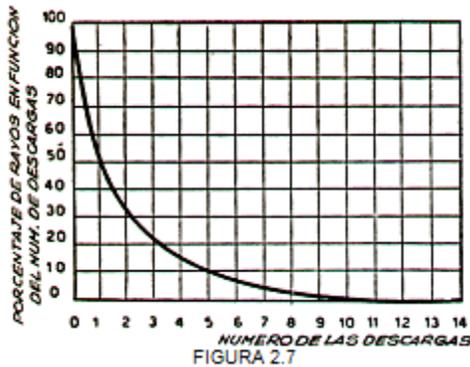


FIGURA 2.7. Porcentaje de rayos con un número de descargas iguales o menores que los valores indicados.

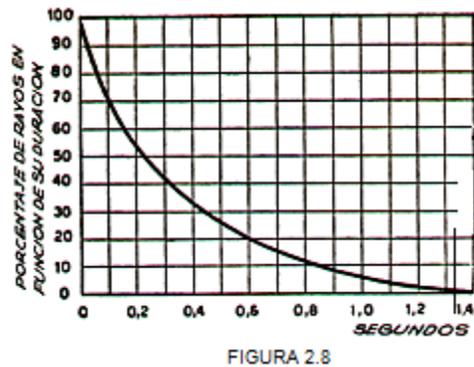


FIGURA 2.8. Porcentaje de rayos con una duración igual o menor que los valores indicados en el diagrama.

2.1.5 Otras magnitudes energéticas.

Cada descarga que constituye un rayo libera una carga de varios coulomb mientras que un rayo completo libera una carga que raramente supera a los 100 coulomb (*figura 2.9 y 2.10*).

La energía correspondiente puede llegar a estimarse en el orden de 1.25×10^9 J, es decir unos 350 kWh. Dado el tiempo extremadamente breve en que esta energía se libera, la potencia del rayo viene a ser muy grande del orden de millares de kW.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

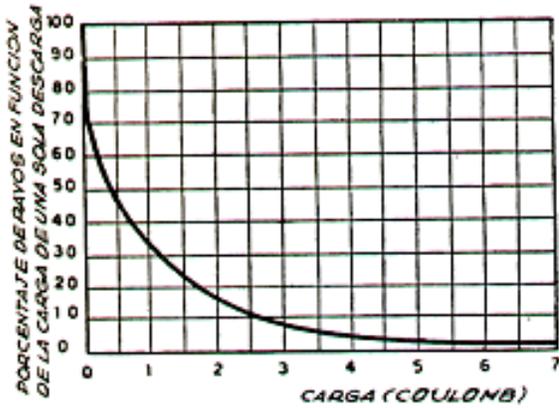


FIGURA 2.9

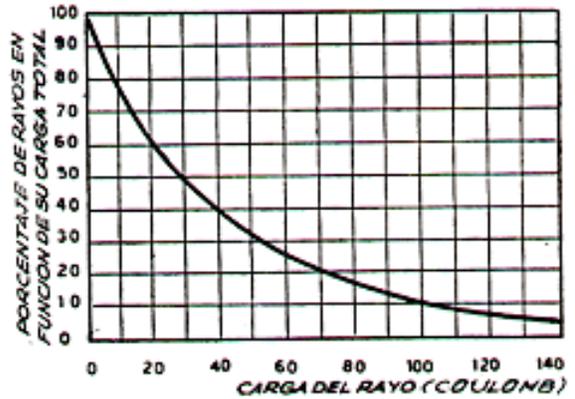


FIGURA 2.10

FIGURA 2.9. Porcentaje de rayos en función de la carga de una sola descarga.
 FIGURA 2.10. Porcentaje de rayos en función de la carga total puesta en juego.

2.1.6 Otras magnitudes características del rayo.

La longitud de un rayo, magnitud dependiente de la distancia al terreno a la superficie inferior de la nube desde la cual parte el rayo, posee escaso interés práctico para la determinación de los medios de protección. En la figura 2.11 se representa, en el aspecto estadístico usual, el porcentaje de rayos en función de su longitud.

Mayor interés ofrece, por el contrario, la pendiente del frente de onda de las descargas que forman el rayo, a efectos de la determinación de la impedancia de los conductores de puesta a tierra. En la figura 2.12 se muestra el porcentaje de rayos en función del gradiente del frente de onda.

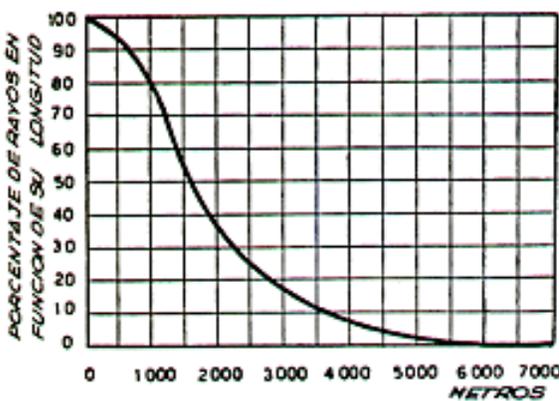


FIGURA 2.11

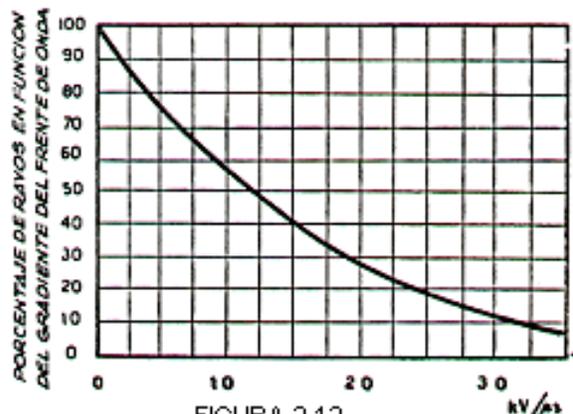


FIGURA 2.12

FIGURA 2.11. Porcentaje de rayos en función de su longitud.
 FIGURA 2.12. Porcentaje de rayos en función del gradiente del frente de onda.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

También ofrece cierto interés el conocimiento del gradiente de potencial que viene a determinarse en la atmósfera como consecuencia del paso de una nube cargada y de la descarga de un rayo.

En la *figura 2.13* se representa, en diagrama, la variación de la intensidad de campo medida en la tierra durante la descarga de un rayo.

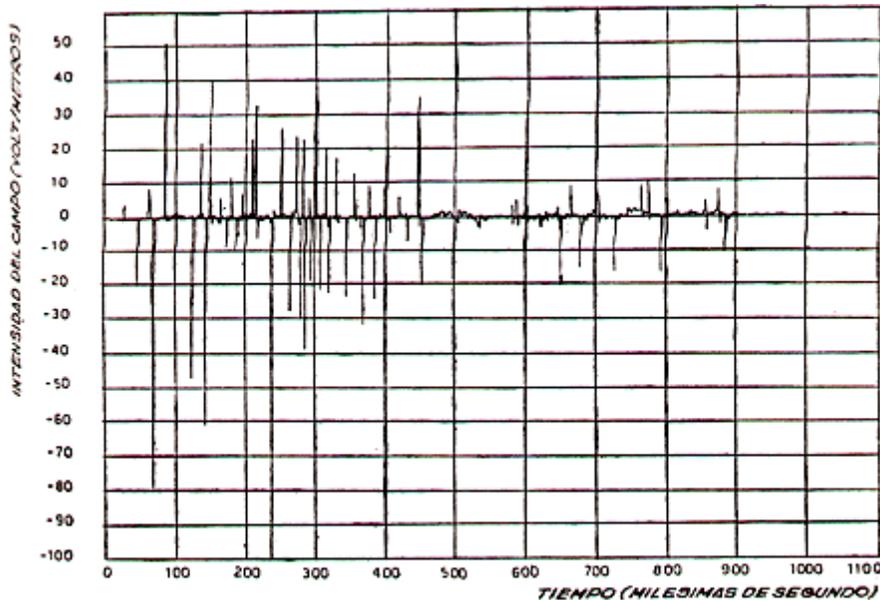


FIGURA 2.13. Variación de la intensidad de campo medida en tierra durante la descarga de un rayo.

2.1.7 Onda convencional.

Como hemos visto, un rayo está formado por una serie de descargas de impulso unidireccionales, considerablemente amortiguadas.

En la *figura 2.14* se ilustra una onda convencional que representa bastante bien el fenómeno de las descargas atmosféricas. La caracterizan y definen los siguientes parámetros:

- Tensión de cresta (V), representa el valor máximo alcanzado por la tensión; en la práctica hasta unos cuantos millones de volt.
- Duración del frente de onda, representada por el tiempo necesario para alcanzar el valor máximo de cresta. Convencionalmente se da como valor para la duración del frente de onda el tiempo $T=1.25T_{[3]}$, donde $T_{[3]}$ es el tiempo que transcurre entre el instante en que la tensión ha alcanzado el 10% y el instante en que la tensión llega al 90% del valor de cresta. Esto significa,

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

en la práctica, reemplazar el frente de onda efectivo por un frente de onda rectilíneo que pasa por los puntos A y B. Esta recta corta al eje de abscisas en un punto que dista $T_{[1]}$ del origen efectivo de los tiempos. Este punto se toma como origen convencional de los tiempos y por él se mide la duración de la onda.

- Duración de la onda (indicada en la figura con $T_{[2]}$), que se mide a partir del comienzo convencional de los tiempos y se considera convencionalmente igual al tiempo necesario para que la onda descienda a la mitad del valor de cresta.

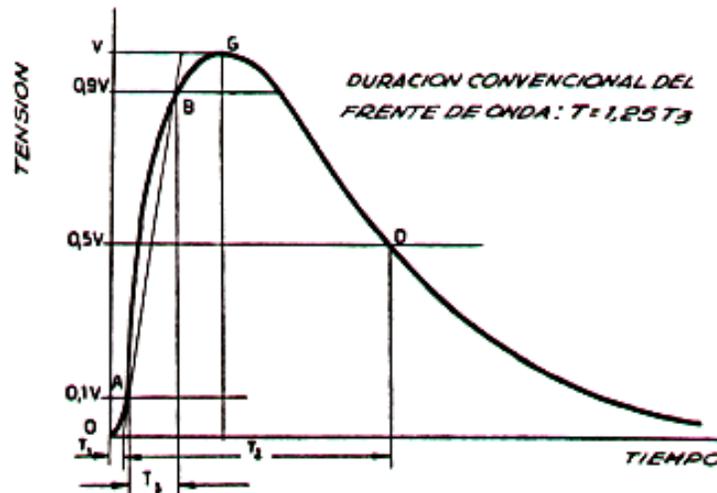


FIGURA 2.14. Onda convencional de tensión.

Con estas premisas la onda queda perfectamente definida para la cualquier necesidad resultante de las investigaciones experimentales, y de las consideraciones teóricas, cualquiera que sea el valor de cresta que se tenga.

Un caso particular de onda convencional muy útil para el estudio de los pararrayos, es la onda de corriente representada gráficamente en la *figura 2.15* y analíticamente por la expresión:

$$I = \text{Im}(e^{-at} - e^{-bt}), \text{ donde}$$

I es el valor instantáneo de la intensidad de corriente de la descarga principal de retorno.

Im es el valor inicial de las componentes exponenciales, al que se le atribuye convencionalmente un valor de 150 kA.

a igual a 0.013×10^6

b igual a 0.5×10^6

Como consecuencia de estos supuestos resulta una onda con valor de cresta de 1000 kA alcanzado en 8 microsegundos, mientras que la duración total de la onda (tiempo empleado por ella para disminuir hasta el valor de 500 kA) resulta de 65 microsegundos.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

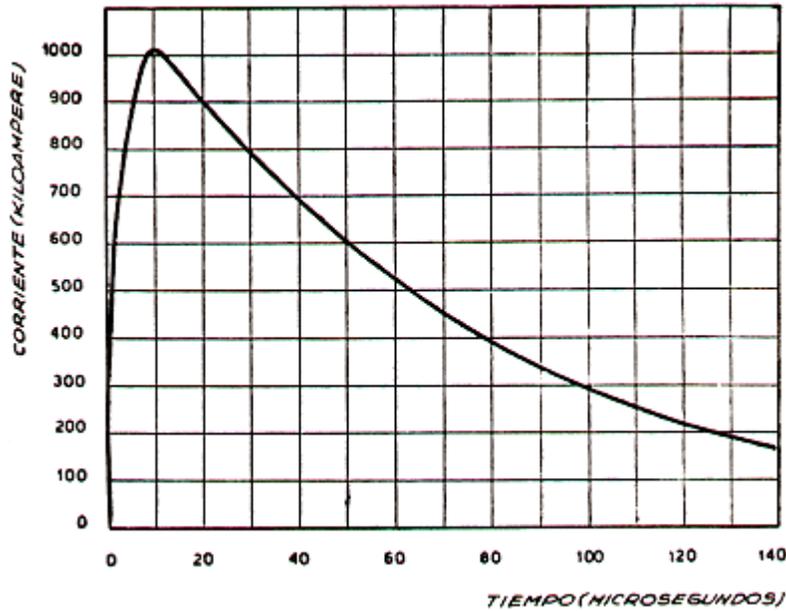


FIGURA 2.15. Onda convencional de corriente.

El empleo de esta onda convencional consecuencia de un rayo, nos permite calcular la diferencia de potencial que vendrá a determinar la instalación de pararrayos; diferencia de potencial que nos da la relación:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

en la que L es la inductancia del conductor de tierra; veamos un caso típico de caída de tensión:

Para 1 metro de conductor de bajada tenemos:

$$r = 0.005 \text{ ohm}$$

$$L = 1.5 \text{ } \mu\text{H}$$

$$V = L \frac{dI}{dt} + rI$$



Diagrama del conductor de bajada

Se tiene una corriente $I = 30 \text{ kA}$ en un tiempo $t = 1 \text{ } \mu\text{s}$, substituyendo en la ecuación.

$$V = (1.5 \times 10^{-6}) \left(\frac{30 \times 10^3}{1 \times 10^{-6}} \right) + (30 \times 10^3)(5 \times 10^{-3}) = 45000 + 150 = 45150 \text{ V por metro de conductor.}$$

2.2 Generalidades sobre efectos de los rayos.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Un rayo que cae sobre un edificio o un objeto produce efectos de naturaleza variable. Personas que han quedado totalmente desnudas sin sufrir daños alguno, rebaños diezmados, muros derrumbados, edificios incendiados, etc.

El estudio de los detalles más meticulosos de estos fenómenos, no nos llevaría a consideraciones útiles en el campo de la protección. Sin embargo, sí resulta de gran utilidad fijar la atención en los fenómenos de carácter general, que son principalmente:

a).- *Efectos térmicos*: El rayo es esencialmente una descarga eléctrica, la cual desarrolla energía que se transforma en calor total o parcialmente, y de modos diversos. Los fenómenos térmicos se hallan entre los más importantes y sensibles en una descarga directa, y suelen ser los que producen mayores daños.

b).- *Efectos dinámicos*: Debemos hacer una distinción entre los efectos dinámicos indirectos, sobre todo los debidos al campo magnético creado por la descarga, y los efectos dinámicos indirectos provocados por la onda de presión.

c).- *Efectos acústicos*: Que se identifican con el trueno, fenómeno espectacular pero carente de peligro.

d).- *Efectos químicos*: Producción de ozono y liberación de nitrógeno en la atmósfera, fenómenos que no tienen interés práctico alguno en lo que atañe al tema de protección.

2.2.1 Consecuencias térmicas del rayo.

La energía térmica que se desarrolla en la descarga de un rayo depende, de acuerdo con la ley de Joule, del cuadrado de la corriente y de la resistencia del medio encontrado por aquélla, además naturalmente del tiempo que dura la descarga.

En una descarga atmosférica, con corriente variable en el tiempo, la expresión de la cantidad de calor producida adopta la forma:

$$W = R \int i^2 dt$$

donde:

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

W = Energía transformada en calor (expresada en joule si la corriente se mide en ampere y el tiempo en segundos; la energía puede expresarse también en calorías mediante la conversión adecuada; 1 cal = 4.1868 J);

i = Valor instantáneo de la corriente circulante (en ampere).

Parece, pues, de importancia fundamentalmente la resistencia del medio que encuentra el rayo en su camino para descargarse en la tierra y, fijado el valor de la corriente dependiente de la diferencia potencial entre nube y tierra, la energía térmica desarrollada será tanto más grande cuanto mayor sea la resistencia del medio encontrado.

Resulta así evidente que la descarga de un rayo a través de un material buen conductor de energía eléctrica y de sección suficiente no desarrolla generalmente cantidades apreciables de calor, mientras que en zonas limitadas donde la descarga atraviesa materiales malos conductores o hilos de material buen conductor de energía eléctrica pero de sección reducida, se genera grandes cantidades de calor que pueden llevar a la producción de temperaturas elevadas. Como consecuencia del cruce de zonas de elevada resistencia, podemos esperar dos órdenes de fenómenos:

a.1).- *Recorrido de conductores de sección reducida.* El calor generado puede dar lugar a temperaturas tales que provoquen su fusión. Fenómenos similares se producen también en conductores de sección grande pero en condiciones particulares de resistencia (como fallo de contactos, y otros casos que veremos más detalladamente a continuación).

a.2).- En el caso de *materiales malos conductores* tiene gran interés el examen de aquellos en que la descarga atraviesa materiales con elevado contenido de agua. En efecto, el enorme calor generado provoca la evaporación instantánea del agua contenida, la cual desarrolla una presión tan grande que provoca verdaderos fenómenos de explosión (como se ha observado prácticamente en árboles, postes de madera y muros húmedos alcanzados por el rayo).

En general debemos esperar fenómenos importantes de producción de calor en los puntos donde el rayo alcanza una estructura o un edificio (puntas afiladas, etc.), mientras que la generación térmica será totalmente imperceptible en los lugares donde la descarga se introduzca en un conductor de gran diámetro. En estos puntos la producción de calor depende únicamente de la caída de tensión que se provoca en el paso entre los dos medios.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Análogo a lo que se dijo anteriormente con respecto de la cantidad de calor desarrollada por el paso de un rayo por un conductor de resistencia dada, podemos expresar la cantidad de calor producida en el punto de paso entre un tipo de conductor y otro entre los cuales exista una caída de tensión de naturaleza voltaica.

Los dos materiales que se hallan en contacto constituyen en este caso una pila voltaica en la que las funciones de ánodo y cátodo estarán invertidas, según se trate de una descarga descendente o ascendente.

La cantidad de calor la da en es caso una de las expresiones siguientes:

$$W = u \int i dt \quad \text{es decir :} \quad W = uq$$

donde:

- W** Energía transformada en calor (joule)
- u** Caída de tensión voltaica entre dos conductores (dependiente de la naturaleza de los materiales que constituyen los dos conductores);
- i** Valor instantáneo de la corriente del rayo (ampere);
- q** Carga eléctrica de la descarga que constituye el rayo (coulomb).

Dados los valores modestos que se manifiestan en la práctica para las caídas de tensión de naturaleza voltaica entre conductores de materiales diversos (estas caídas raras veces exceden de unos cuantos volt), los efectos térmicos ligados con este fenómeno raramente pueden asumir valores importantes y provocar fusiones localizadas de los materiales, a menos que coincidan las condiciones de caída de tensión elevada, intensidad de la descarga muy alta y sección del conductor particularmente pequeña. En la práctica estas condiciones se presentan simultáneamente sólo en las puntas de los pararrayos de barra.

Por los experimentos realizados se ha deducido que en estos casos el desarrollo de calor raramente supera las 100 calorías.

Como consecuencia, un rayo que alcance una estructura metálica apropiada para proteger un edificio, y halle en su camino un buen conductor de gran sección no provoca fenómenos térmicos apreciables; definimos estos rayos como “descarga fría”.

Fenómenos térmicos importantes han de esperarse en la práctica, muy raras veces por cierto, en los casos de un gran número de descargas que ocurren en un intervalo de tiempo extremadamente breve y van a caer todas en un mismo punto.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Por el contrario, en relación con el desarrollo de calor que provoca el rayo al atravesar materiales malos conductores, se ha observado que esto provoca riesgo de ignición y de incendio. A tales efectos, debemos observar que una descarga de gran intensidad pero de breve duración provoca más bien una fundición de materiales, sin llegar a producir una ignición propiamente dicha, mientras que descargas de corriente modesta pero de mayor duración provocan más fácilmente la ignición de los materiales.

En general la peligrosidad del rayo que cae sobre materiales inflamables es siempre muy alta porque, como ya hemos hecho resaltar en los párrafos anteriores, a la descarga principal suceden numerosas descargas secundarias.

2.2.2 Consecuencias dinámicas del rayo.

Como hemos tenido ocasión de comprobar, la energía liberada por un rayo no es muy elevada, por lo que sus consecuencias dinámicas directas no pueden ser de intensidad extraordinaria. Sin embargo, al ser liberada esta energía en un tiempo extremadamente breve, la potencia puesta en juego alcanza valores elevados (varios millares de kW, como ya hemos visto).

Por tal motivo, aunque en un ámbito muy restringido, las consecuencias dinámicas de un rayo pueden ser también muy importantes.

La descarga principal de retorno (de elevada intensidad) de un rayo produce, en torno a la columna de gases fuertemente ionizados que constituye el recorrido de la descarga, una onda de presión de dimensiones limitadas pero en la que también se generan presiones muy elevadas, lo que puede provocar la destrucción de cuanto rodea al conductor principal.

La elevada corriente de la descarga principal produce a su alrededor un intenso campo magnético, a consecuencia del cual pueden manifestarse, de modo especial en las estructuras de acero inmediatamente circunstantes, corrientes inducidas muy altas, e intensas acciones electrodinámicas.

Las corrientes y tensiones inducidas, cuando alcanzan valores elevados, pueden dar lugar a fenómenos eléctricos secundarios con descargas que tienen también cierta importancia entre partes de las estructuras no directamente alcanzadas por el rayo. Hay que tener en cuenta este orden de fenómenos cuando se proyectan instalaciones de pararrayos, y volveremos sobre el tema en capítulos posteriores.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

2.2.3 Efectos acústicos

La onda de presión que se manifiesta en torno al conductor principal, como ya hemos dicho en el párrafo anterior, provoca una onda sonora que se hace patente en el conocido fenómeno del trueno.

También este fenómeno ha sido objeto de interesantes estudios. Nos abstenemos de reproducir las informaciones concernientes a su compleja fenomenología y las teorías formuladas a tal respecto, por cuanto al no tener el trueno consecuencia práctica alguna ni estar implicado de ningún modo con las instalaciones de protección, este tema no entra en el terreno de los que interesan en el presente trabajo.

2.2.4 Efectos químicos

Los efectos químicos producidos por el rayo quedan limitados a dos órdenes diversos:

a) Efectos químicos del rayo en la atmósfera: Consecuencia directa de la intensa ionización de la atmósfera inmediatamente circundante a la zona donde se ha producido la descarga directa, con generación de gran cantidad de ozono y liberación de nitrógeno en estado puro. Estos fenómenos que están siendo estudiados por interés científico, geográfico y meteorológico, tienen evidentemente escasa importancia a efectos del tema que estamos tratando, por lo que no nos extenderemos sobre este en particular.

b) Efectos galvánicos del rayo sobre los objetos alcanzados directamente: consecuencia de la intensa corriente unidireccional que constituye la descarga principal. Los objetos atravesados por esta elevada corriente, transformados en una pila voltaica sometida a una tensión elevada y a una corriente muy intensa, pueden sufrir profundas alteraciones químicas de naturaleza galvánica y diversos daños según los casos. Por otra parte, a efectos de la adopción de medios adecuados de protección no tiene excesiva importancia estudiar con precisión el mecanismo mediante el cual se producen esos daños; lo que realmente interesa es evitar que se produzcan. En general, en la práctica de los medios de protección contra los rayos, tienen importancia predominante los efectos térmicos que son realmente los únicos que vamos a considerar. Se procura que una descarga eventual encuentre una vía de resistencia débil hacia la tierra, a fin de que no se generen cantidades apreciables de calor. Esto excluye generalmente la posibilidad de que se produzcan daños de otra naturaleza.

CAPITULO 3

ELEMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

CAPITULO III

3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

La protección de estructuras o edificios contra la acción de los rayos se realiza por métodos diversos. Todos poseen sin embargo en común, el establecimiento de un camino que presente débil resistencia al paso de la corriente, y que permita, del modo más fácil que sea posible, la descarga a tierra del rayo.

Difícilmente puede lograrse una “protección activa”, es decir, el hallazgo de un medio que evite su formación. La eficacia de las más modernos concebidos hasta la fecha está todavía por demostrarse, como veremos a continuación.

De importancia práctica mucho más amplia es la “protección pasiva”, es decir, la adopción de medios que reduzca a límites no peligrosos las consecuencias de una descarga.

3.1 Protección externa. Constitución de una instalación de pararrayos.

Cualquiera que sea el tipo de pararrayos adoptado para la protección de un edificio, estará formado por los siguientes elementos fundamentales. (Figura 3.1)

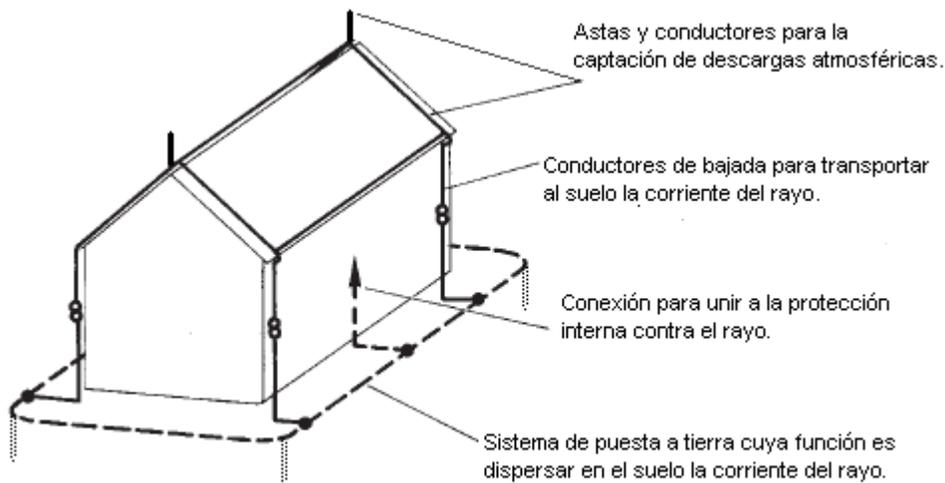


FIGURA 3.1. Elementos fundamentales de una instalación externa de protección contra rayos.

- a) Elemento receptor dispuesto en la parte más alta del edificio. Puede estar constituido por puntas metálicas o conductores dispuestos de varios modos según las dimensiones y la estructura del edificio.

Es necesario preparar al rayo un camino más cómodo y directo para que se descargue en tierra, a fin de evitar que sea el propio rayo el que elija un camino que pase por el interior del edificio, con desastrosas consecuencias.

b) Conductor de tierra. Puede estar formado por conductores, y tiene la misión de transportar a tierra la corriente del rayo, proporcionando un recorrido perfectamente determinado y de débil resistencia eléctrica, quedando así fuera de peligro.

La realización práctica de estas conexiones a tierra ha de hacerse teniendo presente que no sólo se requiere una resistencia óhmica débil, sino que por ser mediante impulsos la corriente del rayo, como ya hemos visto, y con un frente extraordinariamente abrupto, adquiere una importancia notable la reactancia de la conexión, parámetro cuya influencia puede llegar a superar la de la misma resistencia, provocando consiguientemente extraordinarias caídas de tensión.

c) Sistema de puesta a tierra. Tienen por misión crear un contacto íntimo entre el conductor de puesta a tierra y el terreno, facilitar la dispersión de la corriente en el terreno propiamente dicho, y evitar la formación de fuertes gradientes de potencial que serían extremadamente peligrosos.

La realización práctica del sistema de puesta a tierra y su instalación son totalmente análogas a las empleadas en las instalaciones eléctricas. En el capítulo 4 ilustraremos algunas de las particularidades más importantes concernientes a la ejecución de puesta a tierra.

3.2 Tipos de pararrayos.

Como hemos tenido ocasión de observar, la protección de los edificios contra los rayos puede lograrse por diversos métodos de los que haremos una reseña rápida antes de examinar detalladamente cada uno de ellos.

Algunos de estos métodos sólo tienen hoy importancia histórica, al haber sido superados en la actualidad por realizaciones más modernas (como, por ejemplo el pararrayos de Franklin); otros son de ejecución más reciente y todavía no han sufrido la prueba definitiva, ya que por ser el rayo un suceso puramente aleatorio, requiere necesariamente, en cada caso, una serie de años de observación (por ejemplo, los pararrayos ionizantes).

No obstante, estimamos útil dar una reseña breve de cada uno de los métodos en cuestión.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Pararrayos de Franklin.- De interés histórico en la actualidad, está formado por una barra terminada en punta, conectada a tierra a través de un cable metálico.

Pararrayos de Jaula.- Basado en el conocido principio de la jaula de Faraday que queda privada de cargas eléctricas en su interior cualquiera que sea la carga que se aplique a su exterior.

Telepararrayos.- Se conocen usualmente bajo esta denominación las instalaciones de protección contra los rayos realizadas con cables suspendidos por encima de la zona que se desea proteger, y que utilizan la propiedad, demostrada experimentalmente, de que un rayo jamás descarga sobre la zona que se encuentra inmediatamente debajo de un cable dentro de un ángulo determinado que se llama por tal motivo ángulo de seguridad.

En esta categoría deben incluirse también los cables de guarda que se emplean para la protección de las líneas de transmisión de energía eléctrica.

Pararrayos ionizantes o con dispositivo de cebado.- Basan su principio de funcionamiento en la ionización pasiva o activa del aire para excitar la carga, y crear un camino abierto para capturar la descarga del rayo y canalizar su energía potencial por un cable a la toma de tierra eléctrica.

Pararrayos radiactivos.- Están formados por una barra metálica, en la parte superior de la cual lleva un excitador atmosférico de material radiactivo (o combinaciones de varios de ellos) que tienen como objetivo principal provocar la ionización de la atmósfera sobre la zona en la que se halla instalado el pararrayos. Las cargas positivas liberadas por el pararrayos deberán neutralizar las cargas negativas de la superficie inferior de la nube, y aún cuando esta neutralización no se realizara de un modo suficiente, sobre el pararrayos se produciría una descarga eléctrica que llegaría a tierra, como en cualquiera de los descritos anteriormente.

3.3 Pararrayos de Franklin, terminales áreas.

Benjamín Franklin fue el inventor del primer pararrayos en Filadelfia, en el año de 1760. Su pararrayos está formado por una barra metálica cilíndrica de tres metros de longitud y un diámetro de trece milímetros. La barra, colocada verticalmente, terminaba en su parte superior en una punta muy aguda y estaba conectada al suelo mediante un conductor de hierro.

El edificio donde Franklin instaló su primer pararrayos fue alcanzado por un rayo que se descargó en tierra sin causar el más ligero daño al edificio. Después de éste y otros experimentos

con idénticos resultados, este tipo de pararrayos logró una difusión enorme tanto en América como en Europa.

Según el propio Franklin, la punta de la barra de su pararrayos debería favorecer la dispersión en la atmósfera de las cargas que se acumulan en el terreno, provocando así la neutralización de las cargas contenidas en la nube. Como quiera que esto no hubiera sido suficiente para evitar la producción de una descarga directa, el pararrayos había de preparar un camino de resistencia débil a la dispersión de la descarga en el terreno, eliminando la eventualidad de que el edificio protegido sufriera daños. De estas dos suposiciones es muy cierta la segunda, fundamental aún hoy para todos los modelos de pararrayos, pero se ha superado totalmente la primera. Efectivamente, las cargas acumuladas en la nube son negativas, mientras que las condensadas en la tierra son positivas.

Además, la cantidad de electricidad que la punta del pararrayos puede dispersar es realmente minúscula, comparada con las cargas que una nube es capaz de englobar, por lo que la eficacia preventiva del pararrayos de Franklin ha resultado totalmente ficticia.

Otro defecto del pararrayos de Franklin estriba en el hecho de que cada vez que es alcanzado directamente por un rayo, la punta de la barra se funde a causa de la intensa corriente que transporta.

3.3.1 Cono de protección.

De la teoría del pararrayo de Franklin permanece y se acepta todavía en nuestros días la validez de la eficacia del cono de protección para los pararrayos de barra.

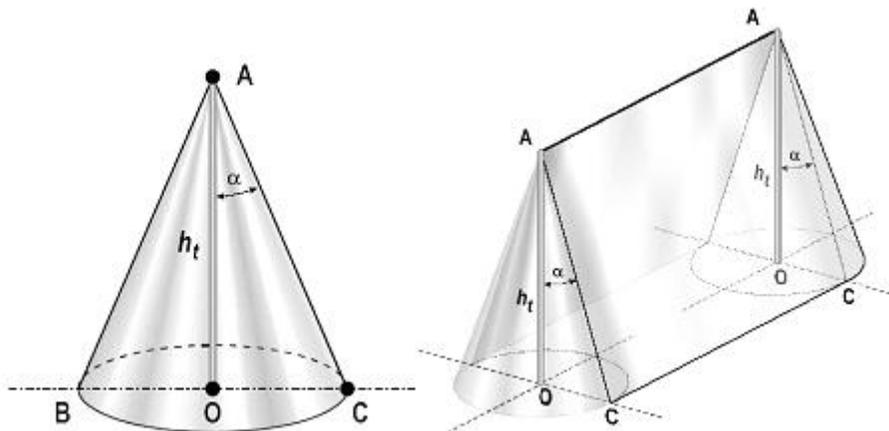


FIGURA 3.2. Volumen de protección proporcionado por el concepto del ángulo de protección para una terminal aérea vertical y para una terminal aérea horizontal.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Según esta teoría una zona en forma de cono que circunda la barra del pararrayos resulta protegida contra las descargas directas y, por tanto, no puede ser alcanzada directamente por el rayo. (Figura 3.2)

La existencia de la zona de influencia se ha demostrado también experimentalmente, corroborándose con una larga serie de observaciones.

Las terminales aéreas deben ubicarse de tal manera que todas las partes de la estructura a proteger se encuentren dentro de la zona de protección generada por la proyección ya sea de rotación o traslación a un ángulo α respecto a la vertical en todas direcciones. El ángulo α debe satisfacer los requisitos indicados en la *tabla 3.1* y la *figura 3.3*, en donde h es la altura de la terminal aérea sobre la superficie del objeto a protegerse.

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante r_s (m) y su correspondiente valor de corriente de rayo I (kA)		Ángulo de protección (°)			
	r_s (m)	I (kA)	$h=20m$	$h=30m$	$h=45m$	$h=60m$
I	20	3	25	*	*	*
II	30	6	35	25	*	*
III	45	10	45	35	25	*
IV	60	16	60	45	35	25

h corresponde a la máxima altura de la terminal aérea.
 (*) No se puede aplicar el concepto del ángulo de protección, debido a que la altura de la terminal aérea es mayor que el radio de la esfera rodante (*método que se vera en el capítulo 4*).
NOTA- La corriente I (kA) es estimada mediante la ecuación (C-2) del apéndice C para el radio r_s (m) correspondiente.

TABLA 3.1. Ángulo de protección ofrecido por las terminales aéreas para los casos en que las terminales aéreas tienen una altura máxima igual al radio de la esfera rodante del nivel de protección correspondiente.

Debido a que el ángulo de protección depende del radio de la esfera rodante (*método que se vera en el capítulo 4*) y la altura de la terminal aérea, su magnitud es diferente para diferentes alturas de las terminales aéreas ubicadas sobre el objeto a protegerse, imponiendo limitaciones en su aplicación cuando la altura de la terminal aérea es mayor que el radio de la esfera rodante, tal y como se indica en la *tabla 3.1* por medio del símbolo (*). Debido a que la zona de protección ofrecida por el ángulo de protección tiene áreas de menor cobertura que el del método de la esfera rodante, su aplicación debe limitarse a espacios con el mínimo de objetos a proteger en la zona de cobertura. Estas limitaciones presentadas por el método del ángulo de protección son resueltas aplicando el método de la esfera rodante.

AREAS EQUIVALENTES

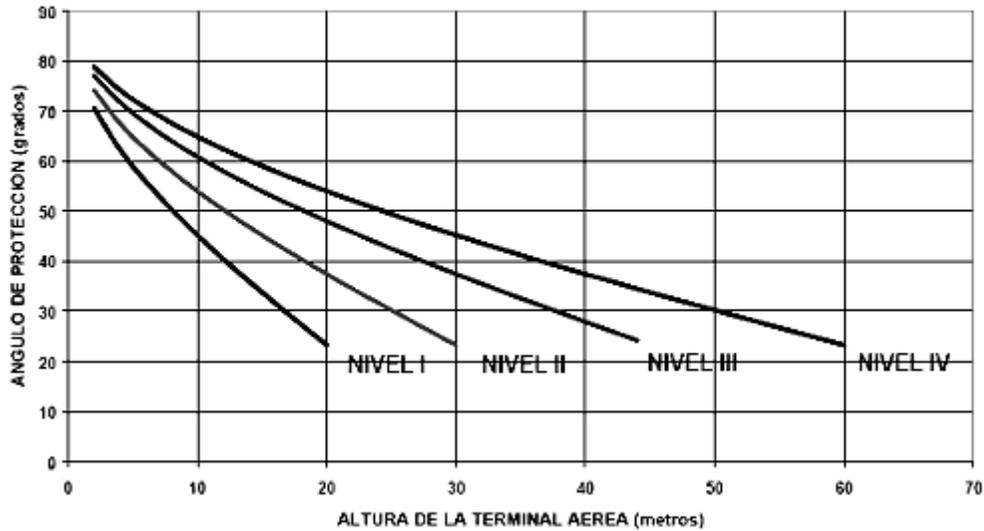


FIGURA 3.3. Ángulo de protección de acuerdo al concepto de áreas equivalentes para diferentes alturas de las terminales aéreas y diferentes niveles de protección.

Para determinar el ángulo de protección se utilizan diferentes conceptos, como el ángulo optimista, el ángulo de áreas equivalentes y el ángulo conservador. El ángulo optimista ha demostrado presentar grandes fallas de blindaje. El concepto generalmente aplicado es el del ángulo de áreas equivalentes, indicado por el ángulo α_2 en la *figura 3.4*, se determinan por las ecuaciones siguientes:

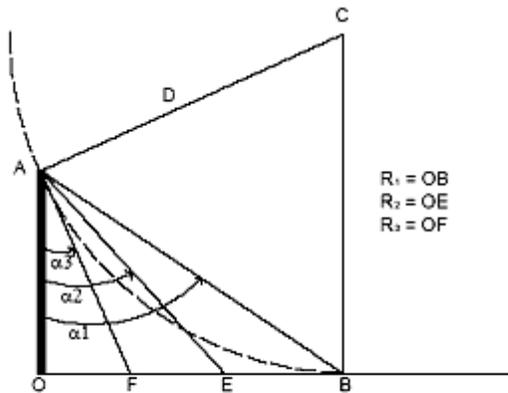
$$R = (h + r_s) \frac{R_1}{h} - \frac{r_s^2}{h} \text{Arc cos}(1 - hr_s) \quad (3-1)$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{R}{h} \quad (3-2)$$

$$R_1 = (2r_s h - h^2)^{0.5} \quad (3-3)$$

En donde:

- h es la altura de la terminal área en m;
- r_s es el radio de la esfera rodante en m;
- α es el ángulo de protección, de acuerdo al concepto de áreas equivalentes.
- R es la distancia de protección de acuerdo al ángulo α .



ángulo optimista (α_1),
 ángulo de áreas equivalentes (α_2)
 ángulo conservador (α_3)

FIGURA 3.4. Conceptos para determinar el ángulo de protección.

De la numerosa serie de mediciones efectuadas sobre barras pararrayos han resultado comprobados los siguientes hechos:

Carece de importancia digna de mención que la barra pararrayos sea puntiaguda o roma; tampoco tiene influencia el material de que dicha barra ésta construida. La eficacia de las dispersiones de las cargas en la atmósfera a través de la punta del pararrayos parece ser efectivamente poco menos que nula.

Por el contrario, se ha demostrado experimentalmente que la existencia de una barra pararrayos es capaz de capturar la extremidad de una descarga salida de una nube y dirigida hacia tierra cuando dicha extremidad se halla en las proximidades de la punta de la barra, lo que impide, por consiguiente, que un rayo alcance la zona del terreno que circunda de un modo inmediato la barra de pararrayos, como habíamos observado ya anteriormente.

3.4 Pararrayos de Jaula.

La conocida “Jaula de Faraday”, es un experimento físico que consiste de una envoltura metálica cerrada y conectada a tierra, disponiendo en el interior instrumentos de gran sensibilidad (electrómetros y electroscopios), observando que éstos, no se dejan influir en absoluto por ningún fenómeno eléctrico por intenso que sea, que se produzca en el exterior o en la propia superficie de la envoltura metálica, nos da la idea del pararrayos perfecto y eficaz que se pueda imaginar.

Un edificio con revestimiento exterior completamente metálico, conectado por medio de conductores de amplia sección al terreno, queda protegido de la manera absoluta contra cualquier descarga atmosférica y no hay rayo que pueda penetrar en su interior.

Es evidente que un diseño así sólo puede llevarse a escala reducida y se ha realizado únicamente en laboratorios especiales de medición, donde se utilizan instrumentos de sensibilidad que se ha hecho necesario para medir con este medio la influencia de cualquier campo eléctrico o magnético externo. Son raras las instalaciones de este tipo para protección contra rayos.

Por razones que saltan a la vista el enrejado o malla de la jaula no puede ser muy espeso, tanto por motivos económicos (elevado el número de conductores y complejidad de la instalación) como estéticos (un edificio de valor arquitectónico no puede afearse con un conjunto de conductores que lo cubrieran por completo).

En el montaje de instalaciones de pararrayos de jaula se busca mantener un enrejado suficientemente espeso en el techo y la parte superior del edificio, reduciéndose al mínimo indispensable las bajadas de conductores a lo largo de las paredes.

La existencia de una franja no protegida en el interior del edificio difícilmente puede asumir una importancia práctica notable, y el único caso en que habrán de tomarse serias precauciones es cuando haya grandes masas metálicas en el interior del edificio en zonas adyacentes a los muros. En este caso es posible, que un rayo atravesase las mallas y, al encontrar una resistencia débil en las grandes masas metálicas, se descargue sobre ellas.

El método más práctico que se viene utilizando para obviar este inconveniente es, en primer lugar, el de proporcionar una buena puesta a tierra de las partes metálicas, y luego espesar la malla de conductores en las inmediaciones de dichas masas metálicas, así como reducir a valores bajos la resistencia hacia tierra de la jaula externa. De este modo se crea una vía de acceso fácil sin que haya de pasar por las masas metálicas que se intenta proteger.

3.5 Telepararrayos.

Como ya hemos dicho antes, una barra vertical o un cable horizontal determinan las zonas protectoras que se han valorado de un modo cuantitativo.

Si colocamos barras o hilos metálicos suspendidos a cierta altura, de modo que el edificio o los objetos a proteger queden completamente encerrados en la zona de protección, habremos efectuado una instalación que se conoce comúnmente con el nombre de telepararrayos.

La eficacia de este sistema de protección no es inferior a la conseguida con el pararrayos de jaula, sobre todo si se procura que los edificios o las cosas que se desean proteger se hallen confinados en una zona limitada por un ángulo muy reducido (por ejemplo, no mayor de 30°).

En la práctica, se recurre a esta clase de pararrayos para la protección de líneas aéreas de energía eléctrica (los cables de guarda o de puesta a tierra son prácticamente el único método adoptado), en las subestaciones eléctricas de distribución y transformación (como prolongación de los cables de guarda y de las líneas de entrada y salida), y en todos los casos en los que los telepararrayos resulten de ejecución fácil y económica con relación a otros modelos. Por ejemplo, en el caso de estructuras muy irregulares, distribuidas sobre una zona amplia de terreno y altura limitada a unos cuantos metros, no sería factible la ejecución de un pararrayos de jaula, mientras que la existencia de antenas metálicas elevadas o de otras estructuras que dominen la zona a proteger suministran un medio cómodo para la ejecución de los telepararrayos.

3.6 Pararrayos radiactivos.

La idea de conceder al pararrayos una acción preventiva para que impidiera la formación de descargas atmosféricas, después que se demostró prácticamente la ineficacia a este respecto del pararrayo de punta de Franklin, siempre ha sido objeto de estudio y experimentos.

Como ya se hizo constar anteriormente, la cantidad de partículas cargadas de electricidad positiva que una punta es capaz de dispersar en el aire, o sea la cantidad de iones que puede producir como consecuencia de la diferencia de potencial que hay entre la punta del pararrayo y la nube que se cierne sobre él, es muy pequeña en relación con la cantidad de electricidad que la nube es capaz de producir en el mismo tiempo, por lo que en general no será posible evitar la creación de una descarga directa.

El profesor húngaro Szillard fue el primero que pensó en la aplicación de materiales radiactivos para provocar una excitación artificial de la atmósfera y una producción de iones con fines de protección contra los rayos.

Para ello fabricó un pararrayos formado por una barra de 4 metros de altura, encima de la cual colocó un plato con dos miligramos de bromuro de radio.

Las observaciones experimentales realizadas en este tipo de pararrayos llevaron a la comprobación de que la cantidad de iones emitidos por este tipo de pararrayos era muy superior (en el orden de un centenar de volt) a la de una punta normal.

Durante algún tiempo se construyeron puntas con núcleo radioactivo como fuente iónica pero por el riesgo que entraña su mantenimiento y potencial efecto contaminador actualmente están prohibidos.

3.7 Pararrayos ionizante o con dispositivo de cebado.

Recientemente se desarrollaron elementos con partes piezoeléctricas que por la sola agitación de corrientes de aire crean presiones internas que bastan para generar potenciales eléctricos. Aunado a este resultado generador se aprovechó el efecto de Venturi, el cual consiste, en que la corriente de un fluido dentro de un conducto cerrado, disminuye la presión del fluido al aumentar la velocidad cuando pasa por una zona de sección menor, esto crea corrientes ascendentes de aire, con lo cual se ha logrado un efectivo “bombardeo iónico” a la atmósfera. Dentro de esta clasificación se encuentran prácticamente todas las puntas de protección europeas.

Están formados por electrodos de acero o de materiales similares acabados en una punta, incorporan un sistema electrónico que genera un avance en el cebado del trazador (líder). No incorporan ninguna fuente radioactiva, tienen un dispositivo electrónico sensible compuesto de diodos, bobinas, resistencias y condensadores, inundados en una resina aislante, todo ello blindado; otros incorporan un sistema piezoeléctrico. Los dos sistemas se caracterizan por anticiparse en el tiempo en la captura del rayo una vez que se produce la carga del dispositivo de excitación. Las medidas de los cabezales varían en función del modelo de cada fabricante.

3.7.1 Principio de funcionamiento del pararrayo ionizante.

Se basa esencialmente en canalizar por la toma de tierra la diferencia de potencial entre la nube y el cabezal del pararrayos. La instalación conduce primero hacia arriba por el cable desnudo de tierra, la tensión eléctrica generada por la tormenta, al punto más alto de la instalación para compensar la diferencia de potencial. El sistema electrónico aprovecha la influencia eléctrica del aumento de potencial entre la nube y la tierra, para auto alimentar el circuito electrónico y excitar la avalancha de electrones, la excitación del rayo se efectúa ionizando el aire por impulsos repetitivos, según aumente gradualmente la diferencia de potencial aportada por la saturación de cargas eléctrico-atmosféricas aparece la ionización natural o efecto corona, son mini descargas

periódicas que ionizan el aire, este fenómeno es el principio de excitación para trazar un camino conductor intermitente que facilitara la descarga del fenómeno rayo (líder).

Durante el proceso de la tormenta se generan campos de alta tensión que se concentran en las puntas más predominantes, a partir de una magnitud del campo eléctrico alrededor de la punta o electrodo, aparece la ionización por impulsos, son pequeños flujos eléctricos, se puede apreciar en forma de diminutas chispas de luz, ruido, radiofrecuencia, vibraciones del conductor, ozono y otros compuestos. Este fenómeno arranca una serie de avalancha electrónica por el efecto campo, un electrón ioniza un átomo produciendo un segundo electrón, éste a su vez junto con el electrón original puede ionizar otros átomos produciendo así una avalancha que aumenta exponencialmente. Las colisiones no resultantes en un nuevo electrón provocan una excitación que deriva en el fenómeno luminoso. A partir de ese momento el aire cambia de características gaseosas al límite de su ruptura dieléctrica, el rayo es el resultado de la saturación de cargas entre nube y tierra; el proceso puede repetirse varias veces.

El dispositivo electrónico del pararrayo con cebado está conectado en serie entre el soporte del cabezal y el cabezal aéreo.

3.7.2 Dispositivo de cebado en los pararrayos ionizantes.

El sistema de cebado necesita un tiempo de carga para activar el dispositivo electrónico que generara un impulso, a continuación volverá a efectuar el mismo proceso mientras exista el aporte de energía natural, este tiempo de carga del dispositivo electrónico no se contabiliza en los ensayos de laboratorio de alta tensión de un pararrayo con cebado.

En el campo de aplicación, el dispositivo electrónico instalado en la punta del pararrayo, necesita un tiempo de trabajo para la carga del sistema de cebado; durante ese proceso, el efecto de ionización se retrasa en la punta del pararrayo referente a los sistemas convencionales de pararrayos Franklin.

El dispositivo de cebado está construido con componentes electrónicos sensibles a los campos electromagnéticos, está instalado en el cabezal aéreo dentro de la influencia de los efectos térmicos, electrodinámicos y electromagnéticos del rayo. En función de la intensidad de descarga del rayo la destrucción del dispositivo electrónico es radical, a partir de ese momento la eficacia del pararrayo no esta garantizada y la instalación de protección queda fuera de servicio.

Algunos fabricantes aconsejan la revisión del circuito electrónico del pararrayos cada vez que recibe un impacto.

3.8 Protección interna.

La protección interna contra descargas atmosféricas es el conjunto de medidas adoptadas contra las repercusiones de las descargas, de sus campos eléctricos y magnéticos sobre las personas, instalaciones y equipos eléctricos, dentro de un edificio. Reconoceremos su importancia y la necesidad de combinar su uso con el sistema externo para alcanzar una mejor protección.

Las instalaciones de pararrayos tienen como objeto derivar las descargas directas de rayos a tierra, protegiendo externamente a edificios y personas. Sin embargo, los rayos producen efectos indirectos que pueden generar desperfectos en los equipos, debidos a sobretensiones transitorias y picos de tensión que pueden propagarse a través de las líneas eléctricas, telefónicas y de datos, alcanzando magnitudes muy superiores a las que pueden soportar las instalaciones y los equipos electrónicos.

Se conocen tres tipos de acoplamiento mediante los cuales las sobretensiones provenientes de las descargas atmosféricas pueden afectar los cables de energía, datos o telecomunicaciones y de esta forma causar serios problemas en la instalación y la estructura:

Acoplamiento resistivo: cuando una descarga atmosférica impacta zonas cercanas a la instalación, ésta causa una elevación del potencial en las vecindades de esta instalación. El aumento del potencial en la tierra afecta los sistemas de puesta a tierra y se conduce hacia el interior de la instalación donde viaja a través del sistema eléctrico.

Acoplamiento inductivo: el impacto de una descarga atmosférica sobre un conductor que forma parte del sistema de protección, genera un gran impulso de energía electromagnética que puede ser absorbido por los cables internos de la edificación en forma de sobretensiones.

Acoplamiento capacitivo: Los cables de las líneas de alta tensión generalmente están expuestos a los impactos de las descargas atmosféricas. Cuando una descarga atmosférica hace impacto sobre una de estas líneas, los dispositivos descargadores de sobretensiones disipan gran parte de la energía; sin embargo, una porción considerable viaja por las líneas de distribución y debido a las altas frecuencias asociadas a este fenómeno, se produce el acoplamiento capacitivo a través del transformador hacia los sistemas de potencia de las edificaciones, destruyendo cualquier equipo electrónico conectado a este sistema.

Los tipos de propagación de las sobretensiones pueden ser entre un conductor activo y tierra (modo común) y perturbaciones entre conductores activos (modo diferencial).

La protección de las líneas de alimentación de baja tensión consiste básicamente en disponer una protección escalonada. La normativa internacional recoge y consagra este principio a la hora de diseñar un sistema correcto y eficaz de protección.

Como primera etapa de protección se precisa un elemento que sea capaz de soportar la mayor parte de la corriente de rayo y crear un entorno soportable para los descargadores conectados posteriormente. Este objetivo lo cumplen los descargadores de clase I que se instalan en los puntos de conexión con la red o acometida.

La segunda etapa de protección tiene que derivar la parte restante de la onda de corriente de choque, reduciendo las tensiones a valores tolerables para la instalación. El elemento de protección es un dispositivo de clase II que se instalará en la distribución.

En la tercera etapa de protección se limitan las sobretensiones que pueden ocasionarse como consecuencia de conmutación y de inducciones. Se instalará en esta zona un dispositivo de clase III lo más cerca posible del equipo a proteger.

3.8.1 Unión equipotencial.

La unión equipotencial es un procedimiento de control y seguridad, mediante el cual se logra la igualación de los equipotenciales de todos o parte de los elementos metálicos de una instalación. Esta igualación de los equipotenciales se efectúa mediante la conexión física a un punto común.

La función de la unión equipotencial es reducir las diferencias de potencial generadas por rayo cuando éste incide en los elementos de intercepción de un sistema exterior de protección, sobre o en las cercanías de la instalación o estructura. La diferencia de potencial puede producir la circulación de corrientes indeseables y la generación de arcos eléctricos con el riesgo de fuego y explosión en áreas peligrosas o bien algún daño físico tanto a los seres vivos como al equipo.

Una vez lograda la unión equipotencial a un punto común, debe realizarse una conexión entre dicho punto y la red del sistema puesta a tierra de la instalación.

Los principales elementos que deben utilizarse para lograr la unión equipotencial son los siguientes:

a) Conductores de unión. Los conductores se utilizan para interconectar dos partes metálicas. La longitud de estos conductores de unión debe ser lo más corta posible y la sección transversal debe cumplir con los valores indicados de acuerdo al material especificado en el capítulo siguiente en la sección de materiales.

b) Barras de unión. Las barras se utilizan para interconectar, mediante los conductores de unión, elementos metálicos de diversos sistemas (energía eléctrica, telecomunicaciones, gas, agua, etc.), así como los elementos estructurales metálicos de la instalación a un solo punto de unión.

c) Supresores de sobretensiones transitorias. Estos supresores se utilizan para la protección de equipo eléctrico o electrónico sensible y donde no se permite el uso de conductores de unión, como por ejemplo en la unión de dos piezas metálicas aisladas entre sí en tuberías de gas.

La unión equipotencial se logra considerando medidas específicas para ello de acuerdo a las normas.

CAPITULO 4

PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

CAPITULO IV

4. PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Hemos examinado ya la estructura y las características de los rayos, habiéndonos ocupado asimismo de los medios de protección cuya estructura y principios de funcionamiento se han considerado también.

En las instalaciones de pararrayos es absolutamente imposible pensar en obtener las características y dimensiones de la instalación mediante un cálculo exacto y su técnica constructiva es ante todo empírica.

Esto no quiere decir que una instalación de pararrayos pueda realizarse de un modo tosco y sin tener en cuenta toda una serie de procedimientos y normas de instalación que, aunque se derivan de la experiencia y no de la teoría, no dejan de ser por ello de fundamental importancia.

La protección contra tormentas eléctricas es una necesidad universal, por lo cual, diferentes países se han preocupado por elaborar normas que sirvan de guía de diseño de este sistema.

Un sistema de protección contra tormentas eléctricas diseñado e instalado con los criterios indicados en alguna norma, no garantiza una protección absoluta a personas, estructuras u objetos; sin embargo, su aplicación reduce el riesgo de daño que puede provocar un rayo.

4.1 Valoración de riesgo.

La valoración de riesgo es una medida empírica, con objeto de estimar, en forma razonable, la probabilidad de incidencia de un rayo directo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo.

El diseño de un sistema de protección debe incluir la valoración de riesgo de la estructura contra la incidencia de un rayo directo, y esta valoración debe realizarse antes de definir las características y ubicación de los elementos del sistema externo. Los resultados de la valoración de riesgo determinan la necesidad de instalar el sistema externo de protección.

La frecuencia promedio anual de rayos directos a una estructura (N_0), puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6} \quad (4-1)$$

donde: N_0 es la frecuencia media anual de rayos directos a una estructura;
 N_g es la densidad promedio anual de rayos a tierra por km^2
 A_e es el área equivalente de captura de la estructura, en m^2 .

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

La frecuencia promedio anual permitida de rayos directos a una estructura, denotada como N_d , es el riesgo permitido de incidencia de un rayo directo a una estructura de acuerdo al tipo, uso y contenido, definidos en la *tabla 4.1*.

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Frecuencia (N_d)
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	0.04
Tanques de agua elevados: metálicos. Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	0.04
Granja	Riesgo principal de incendio y de potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para animales.	0.02
Edificios de servicios tales como: Aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren ligero o metropolitano.	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0.02
Hospital Asilo Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0.02
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0.02
Telecomunicaciones Véase nota	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio.	0.02
Industria tales como: Maquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidurías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	0.01

NOTAS: 1.- Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección. 2.- Para estructuras en zonas con densidad de rayos a tierra mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), se debe instalar un sistema externo de protección y éste debe ser aislado.

TABLA 4.1. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes.

4.1.1 Área equivalente de captura.

El área equivalente de la estructura se define como el área de superficie de tierra con la misma frecuencia anual de descargas atmosféricas directas que la estructura.

Las áreas equivalentes de captura se clasifican y se calculan de la forma siguiente:

- a) Para una estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo plano y de dos aguas, se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2, \quad \text{véase figura 4.1} \quad (4-2)$$

$$A_e = ab + 6hb + 9\pi h^2, \quad \text{véase figura 4.2} \quad (4-3)$$

En donde:

- A_e es el **área equivalente de captura**, en m^2 ;
- a es longitud de uno de los lados de la estructura, en m;
- b es la longitud del otro lado de la estructura en m; y
- h es la altura de la estructura en m.

NOTA - La altura h total de la estructura o edificio a proteger debe considerar la altura de todos los equipos instalados sobre techo.

- b) Para una estructura aislada ubicada en terreno irregular, se calcula el área con la ecuación siguiente, véase *figuras 4.3 y 4.4*:

$$A_e = ab + 6h_e(a + b) + 9\pi h_e^2, \quad (4-4)$$

En donde:

- A_e es el **área equivalente de captura**, en m^2 ;
- a es longitud de uno de los lados de la estructura, en m;
- b es la longitud del otro lado de la estructura, en m; y
- h_e es la altura equivalente de la estructura en el terreno irregular, en m.

- c) Para una estructura con otras adyacentes. Los objetos vecinos influyen de manera significativa sobre el área equivalente cuando las distancias entre ellos y la estructura son menores que $3(h_s + h)$. En este caso, si las áreas equivalentes de la estructura y de los objetos vecinos se traslapan, las áreas se superponen y el área equivalente A_e se ve reducida a la distancia:

$$X_s = \frac{d + 3(h_s - h)}{2}, \quad \text{véase figuras 4.5 y 4.6} \quad (4-5)$$

En donde:

- X_s es la distancia equivalente, en m;
- h_s es la altura del objeto vecino, en m;
- h es la altura de la estructura bajo consideración, en m; y
- d es la distancia horizontal entre la estructura y el objeto vecino, en m.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

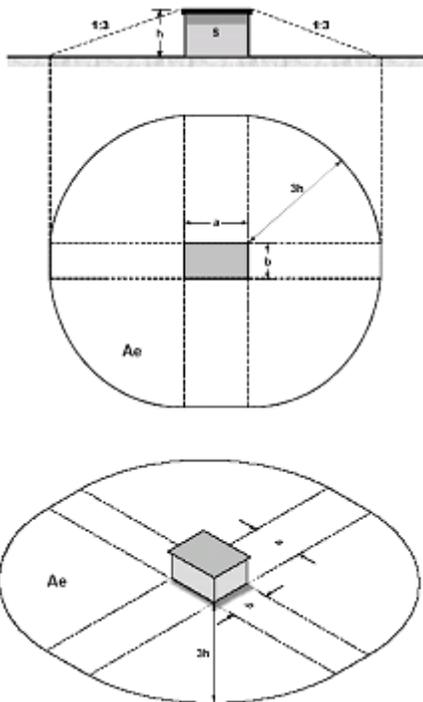


FIGURA 4.1. Área de captura equivalente para una estructura con techo plano y terreno plano.

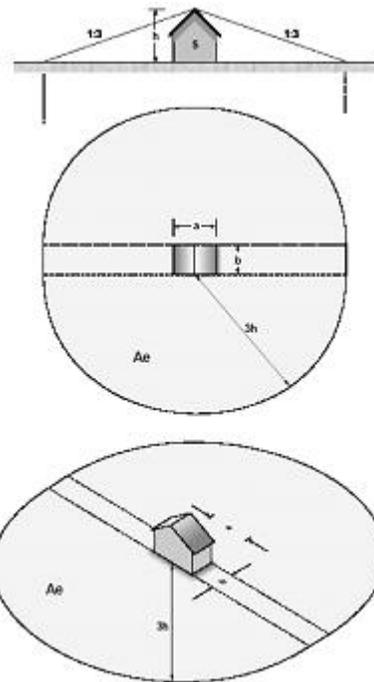


FIGURA 4.2. Área de captura equivalente para una estructura con techo de dos aguas y terreno plano.

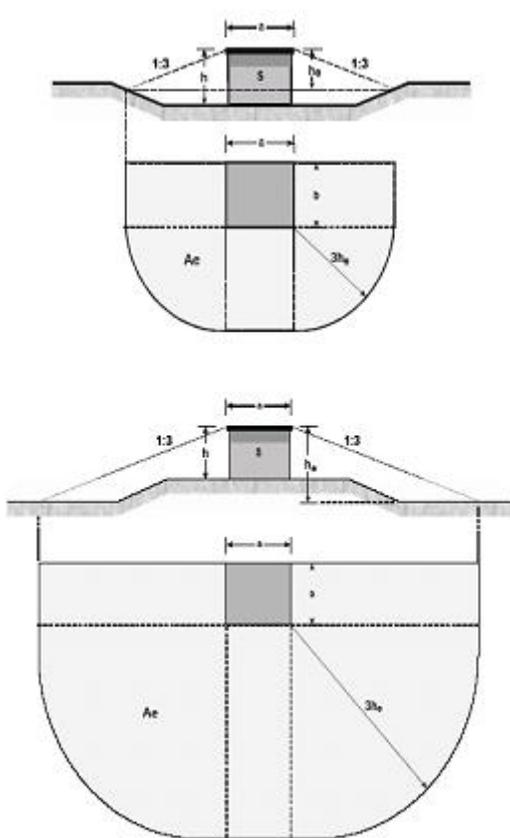
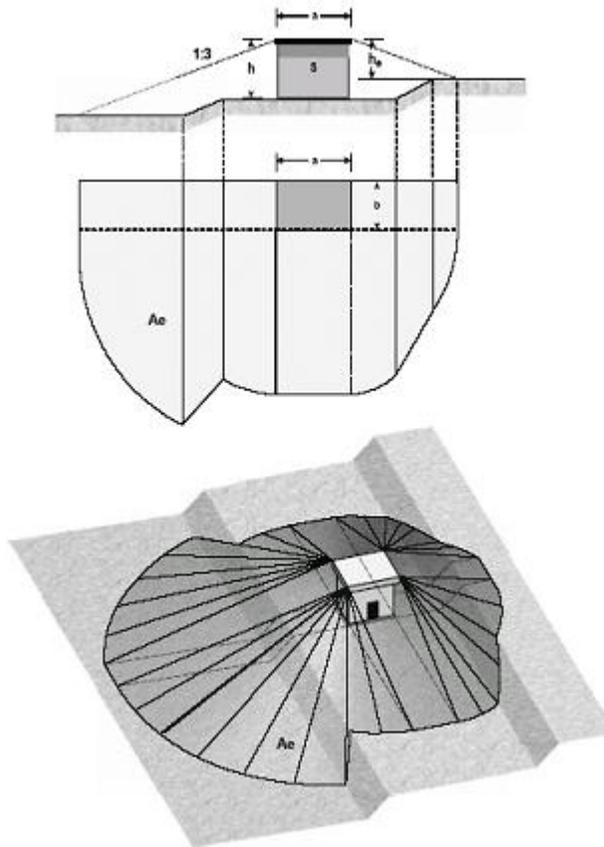


FIGURA 4.3. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular.



ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

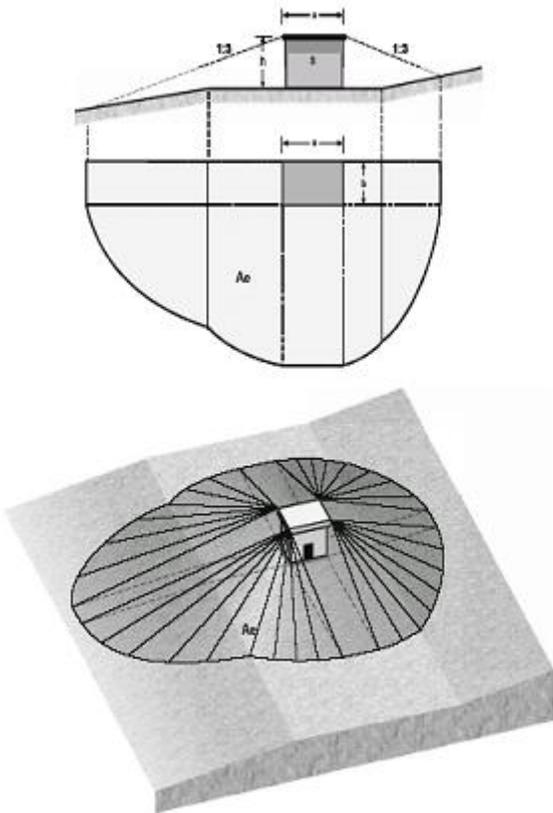


FIGURA 4.4. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular.

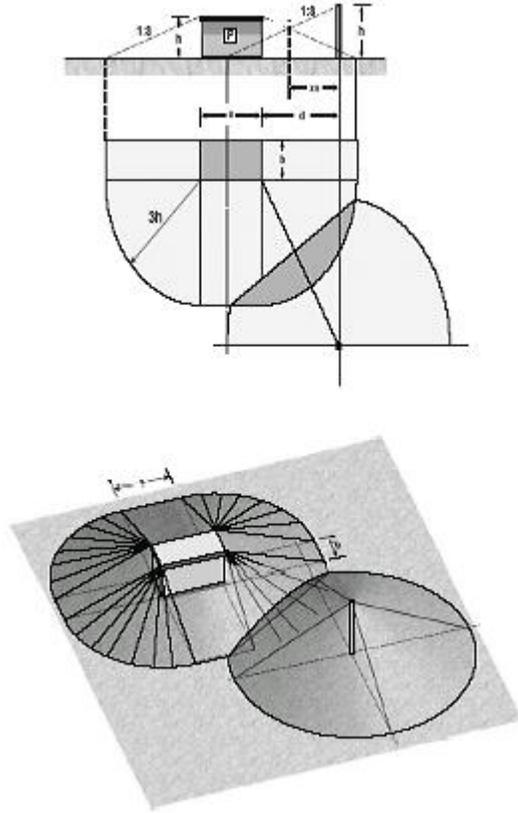


FIGURA 4.5. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos.

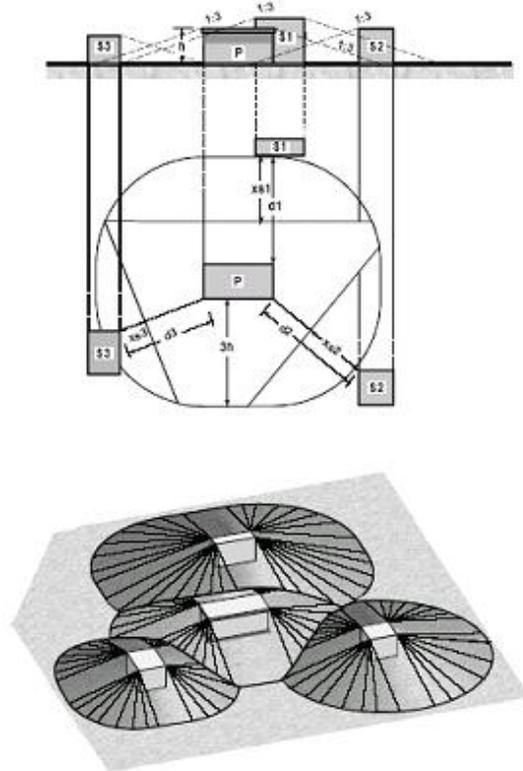


FIGURA 4.6. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos.

4.1.2 Evaluación de la necesidad de protección.

Una vez estimado el valor N_0 debe compararse con el valor de la frecuencia promedio anual permitida N_d (*tabla 4.1*) para evaluar la necesidad de protección.

a) Si N_0 (estimado) es $\leq N_d$ (*tabla 4.1*, valor permitido), el sistema de protección exterior es opcional. Esta condición significa que el sistema de protección exterior puede o no instalarse. Esta decisión corresponde al usuario. Sin embargo, debe considerarse que, aún cuando el riesgo estimado sea menor al riesgo permitido, existe la posibilidad de que un rayo incida sobre la estructura que no tiene un sistema de protección exterior.

b) Si N_0 (estimado) es $> N_d$ (*tabla 4.1*, valor permitido) debe instalarse un sistema de protección exterior.

La selección del nivel de protección a utilizarse en el diseño para la ubicación y altura de las terminales aéreas dependerá del tipo y uso de la estructura conforme a lo indicado en la *tabla 4.2*.

Cuando se instale o no un sistema externo de protección, la protección debe ser integral, por lo que en cualquier caso debe instalarse un sistema interno de protección, independientemente del tipo de estructura o edificio y de su contenido.

4.2 Diseño del sistema externo de protección.

Los elementos que conforman a un sistema externo de protección son los siguientes:

- a) Terminales aéreas.
- b) Conductores de bajada.
- c) Sistema de puesta a tierra.

El número y ubicación de las terminales aéreas y de los conductores de bajada en un sistema eléctrico de protección dependen del nivel de protección seleccionado y la aplicación de algún método (ángulo de protección o método de la esfera rodante).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Nivel de protección recomendado
Residencia	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	III o IV
Tanques de agua elevados: metálicos Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	III
Granja	Riesgo principal de incendio y de potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos a los animales.	II o III
Edificios de servicios tales como: aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren ligero o metropolitano.	Daño a las instalaciones eléctricas, y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	II
Hospital Asilos Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	II
Industria, tales como: máquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidorías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	I o II
Telecomunicaciones	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas económicas por falta de continuidad en el servicio.	I

NOTA - El nivel de protección I es el de mayor protección y el nivel de protección IV es el de menor protección.

TABLA 4.2. Nivel de protección.

4.2.1 Distancia de seguridad.

La distancia de seguridad es el espacio mínimo requerido entre dos partes conductoras dentro del espacio a protegerse, para evitar la generación de arcos eléctricos peligrosos. La distancia de seguridad s debe calcularse de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l \quad (4-6)$$

$$d \geq s$$

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En donde:

- s es la distancia de seguridad, en m;
- d es la distancia entre los elementos a evaluar, en m;
- k_i depende del nivel de protección seleccionado.
- k_c depende de la configuración dimensional.
- k_m depende del material de separación (aire o sólido).
- l es la longitud del conductor de bajada desde el punto de ubicación del elemento a evaluar a tierra, en m.

Nivel de protección	Coficiente K_i
I	0.1
II	0.075
III y IV	0.05

TABLA 4.3. Valores de k_i para el efecto de proximidad de las instalaciones y el sistema de protección.

Nivel de protección	Coficiente K_m
Aire	1
Sólido	0.5

TABLA 4.4. Valores de k_m para el efecto de proximidad de las instalaciones y el sistema de protección.

Número de conductores de bajada	Coficiente K_c
1 o 2 conductores	1
3 o 4 conductores	0.66
Mas de 4 conductores	0.44

TABLA 4.5. Valores de k_c para el efecto de proximidad de las instalaciones y el sistema de protección.

4.2.2 Materiales.

Los materiales utilizados en el sistema de protección deben tener una alta conductividad y durabilidad, deben ser resistentes a la corrosión provocada por las condiciones ambientales, la composición del suelo, agua y contaminantes además del contacto con metales o aleaciones que genere corrosión por efecto galvánico.

En las terminales aéreas los materiales más utilizados son el cobre, aluminio y el acero inoxidable, y deberán contar como mínimo con las dimensiones mostradas en la *tabla 4.6*.

Material	Terminal aérea, sección transversal mm ²	Conductores de bajada, dimensiones
Cobre	35	Pletina 30 x 2 mm Trenza plana 30 x 3'5 mm Cable trenzado 50 mm ² ≈ 1/0 AWG Alambre Redondo Ø 8 mm
Aluminio	70	Pletina 30 x 3 mm Alambre Redondo Ø 10 mm
Acero inoxidable	50	Pletina 30 x 2 mm Alambre Redondo Ø 8 mm
Nota: Para el acero inoxidable tipo aleación 304		

TABLA 4.6. Materiales y dimensiones mínimas.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Los conductores de bajada en cualquier configuración deben de ser desnudos (sin aislamiento), a excepción de que sean conductores con aislamiento diseñados para el confinamiento de campo eléctrico producido por la corriente de la descarga atmosférica. En cualquier caso debe respetarse la distancia de seguridad s.

Material	Espesor mm
Acero	4
Cobre	5
Aluminio	7

TABLA 4.7. Espesor mínimo de las hojas y tubos metálicos para terminales aéreas naturales.

Los electrodos de puesta a tierra tendrán como mínimo las dimensiones mostradas en la *tabla 4.8*.

Material	Configuración y dimensiones nominales mínimas	
Cobre	Cilindro sólido	53.5 mm ²
	Cintilla	Ancho x espesor 25 mm x 1.5 mm
	Tubo	Diámetro interior 13 mm Espesor de pared mínimo 1.8 mm
	Placa plana	500 mm x 500 mm Espesor mínimo 1.52mm
	Lamina (arreglos)	0.25 m ² Espesor mínimo 0.711mm
	Cable trenzado	53.5 mm ²
Acero	Tubo galvanizado	Diámetro interior de 19 mm Espesor de pared mínimo 2.71 mm Espesor mínimo de recubrimiento 0.086mm
	Placa plana Galvanizada	500 mm x 500 mm Espesor mínimo de recubrimiento 0.086 mm Espesor mínimo de la placa 6.4 mm
	Varilla de acero estirada en frío, con recubrimiento de cobre electrolítico	Diámetro de 14.3 mm mínimo y 15.5 mm máximo Espesor mínimo del recubrimiento 0.254 mm
	Varilla galvanizada	Diámetro de 13 mm mínimo y 25 mm máximo Espesor mínimo del recubrimiento 0.086 mm
Acero inoxidable	Cintilla o solera	Ancho x espesor 25 mm x 1.5 mm
	Varilla	Diámetro de 14.3 mm mínimo y 15.5 mm máximo
	Placa plana	500 mm x 500 mm Espesor mínimo de la placa 6.4 mm
	Lamina (arreglos)	0.25 m ² Espesor mínimo 1.245mm de la lámina

TABLA 4.8. Materiales y dimensiones nominales mínimas de los electrodos de puesta a tierra.

Los elementos de fijación deben ser compatibles con los elementos del sistema de protección, así como cumplir con los requisitos de resistencia a la corrosión indicados en la tabla del apéndice B. Estos elementos aseguran la rigidez mecánica y deben ser de acero, cobre, aluminio y sus aleaciones; también se podrán utilizar elementos sintéticos resistentes a los rayos ultravioleta (UV).

Material	Configuración, ancho y espesor	Características específicas
Acero	Placa 250mm x 250mm x 6.35mm	Acero al carbón
Cobre	Placa sólida Ancho x espesor 200mm x 6.35mm	Cobre electrolítico a 99.9%

TABLA 4.9. Dimensiones mínimas para la barra de unión.

Las conexiones y uniones deben ser eléctricamente continuas y firmes. Entre los elementos de unión, se encuentran los conectadores a compresión, atornillados y soldables. No deben utilizarse conectadores a compresión y atornillados cuando se apliquen en elementos enterrados.

Protección contra la corrosión. La corrosión es la desintegración gradual de los materiales metálicos debido a la interacción con el medio que los rodea.

La velocidad de corrosión de los metales varía según el tipo de material utilizado y de la naturaleza del ambiente. Factores como la concentración del electrolito, existencia de oxígeno y temperatura, afectan la velocidad de corrosión.

Cuando exista un ambiente corrosivo en la zona o exista evidencia de corrosión en las estructuras a proteger, y con el objeto de reducir los efectos de corrosión sobre los elementos metálicos deben tomarse en cuenta los lineamientos del apéndice B.

4.2.3 Método de la esfera rodante.

El método de la esfera rodante consiste en rodar una esfera imaginaria sobre tierra, alrededor y por encima de la instalación a proteger o cualquier otro objeto en contacto con la tierra, capaz de actuar como un punto de intercepción de la corriente de rayo. La esfera imaginaria debe rodarse (desde el nivel de tierra) hacia la estructura a proteger e instalar una terminal aérea en el primer punto de contacto con la estructura.

Esta primera terminal aérea se conoce como pivote, cuya altura debe ser suficiente para que la esfera no toque la estructura cuando ésta se apoye sobre tierra y sobre la punta de la terminal aérea pivote. Una vez especificado el primer punto de sacrificio para la corriente de rayo, debe rodarse la esfera por encima de la terminal aérea pivote y hacia el techo de la estructura e instalarse una terminal aérea de intercepción en todos aquellos puntos donde la esfera imaginaria toque la estructura o edificio a proteger, véase *figura 4.7*. Este proceso debe mantenerse hasta

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

cubrir la totalidad del edificio o estructura a proteger. El espacio comprendido bajo el rodamiento de la esfera representa el volumen protegido.

En caso de no poder utilizar un método gráfico para rodar la esfera rodante imaginaria, como el descrito en el párrafo anterior, pueden utilizarse las ecuaciones indicadas en el Apéndice C para definir la altura, posición de las terminales aéreas de intercepción de la corriente de rayo y el área protegida.

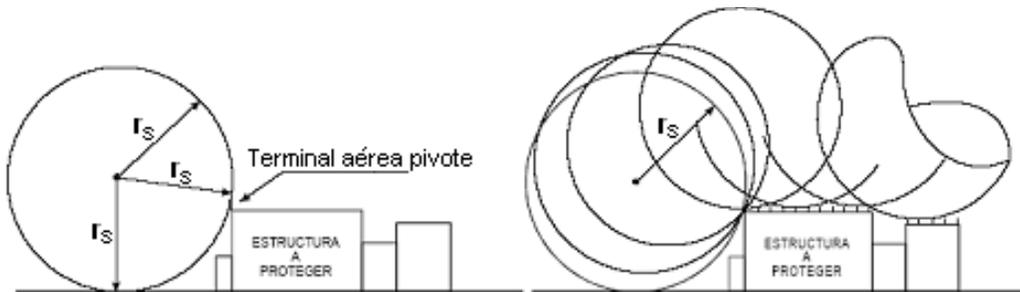


FIGURA 4.7. Método de la esfera rodante para definir la altura y posición de las terminales aéreas de intercepción de rayo.

Por su característica volumétrica, el método de la esfera rodante puede aplicarse sobre cualquier estructura. El radio de la esfera rodante r_s se indica en la tabla 4.10. Este radio se selecciona de acuerdo con el nivel de protección recomendado en la tabla 4.2.

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante r_s y su correspondiente valor de corriente de rayo i		Altura de la terminal aérea a partir del plano a proteger (h)
	r_s (m)	i (kA)	m
I	20	3	≤ 20
II	30	6	≤ 30
III	45	10	≤ 45
IV	60	16	≤ 60

NOTA - La corriente i (kA) se calcula de acuerdo al Apéndice A, para el radio r_s (m) correspondiente. Esta corriente representa el valor mínimo al cual el nivel de protección ofrece una protección eficiente.

TABLA 4.10. Altura de las terminales aéreas verticales de acuerdo con el nivel de protección para el método de la esfera rodante.

La tabla 4.11 muestra la probabilidad de incidencia de rayos medidos en un cierto tiempo (ocurrencia). Estos valores de incidencia para la corriente de rayo permiten estimar la eficiencia de un sistema de protección exterior, indicado en la tabla 4.12 como se vio en el capítulo II, figura 2.5.

1 %	de los rayos exceden los	200 kA
10 %	de los rayos exceden los	80 kA
50 %	de los rayos exceden los	28 kA
90 %	de los rayos exceden los	8 kA
98 %	de los rayos exceden los	3 kA

TABLA 4.11. Probabilidad de incidencia de las corrientes de rayo.

Nivel de protección	Eficiencia del sistema exterior de protección
I	98
II	95
III	90
IV	80

TABLA 4.12. Eficiencia del sistema exterior de protección de acuerdo al nivel de protección.

4.2.4 Terminales aéreas.

Las terminales aéreas pueden ser elementos metálicos verticales, cables aéreos tendidos horizontalmente o una combinación de ambos. Estas se pueden utilizar tanto en sistema de protección aislado (cuando las terminales aéreas y conductores de bajada no tienen contacto eléctrico con la estructura a proteger) como en sistemas no aislados (cuando las terminales aéreas y conductores de bajada tienen contacto eléctrico con la estructura a proteger). Un sistema exterior de protección debe cumplir con los requisitos de unión equipotencial.

Existen elementos de la estructura o edificio que por ser metálicos y estar por encima de los objetos a proteger pueden considerarse en el diseño como terminales aéreas naturales para interceptar la corriente de rayo, a pesar de no haber sido diseñados para tal fin. Estos elementos naturales pueden ser, hojas metálicas, ornamentaciones, barandillas, tubos metálicos, etc., generalmente ubicados en techos y fachadas, y deben cumplir con ser eléctricamente continuos, no tener revestimientos de material aislante, estar solidamente conectados al sistema de puesta a tierra además de cumplir con las características indicadas en la *tabla 4.7*.

El número y ubicación de las terminales aéreas deben calcularse de acuerdo a su posición y nivel de protección. En general, para cualquier edificio o estructura, existen dos niveles de referencia en donde debe aplicarse la esfera rodante: (a) el nivel del techo y (b) el nivel del piso alrededor del edificio o estructura, como se indica en forma genérica en la *figura 4.7*. El cálculo del número y ubicación de las terminales aéreas deben cumplir los siguientes puntos, de acuerdo con la altura del edificio o estructura:

a) Cuando la altura del edificio o estructura sea menor que 20 m, el número y ubicación de las terminales aéreas en el techo del edificio obtenidas al rodar la esfera rodante correspondiente al nivel de protección, es suficiente para asegurar la protección deseada.

b) Cuando la altura del edificio o estructura sea mayor que 20 m pero menor o igual que 60 m, deben instalarse, adicional a las terminales aéreas en el nivel del techo (obtenidas al rodar la

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

esfera rodante correspondiente al nivel de protección), conductores horizontales alrededor del edificio formando lazos cerrados a cada 20 m de altura.

c) Cuando la altura del edificio o estructura sea mayor que 60 m, las terminales aéreas en el nivel del techo deben calcularse con un nivel I de protección. Adicionalmente, deben instalarse conductores horizontales alrededor del edificio formando lazos cerrados por lo menos a cada 45 m de altura.

d) Cuando el edificio o estructura sea de acero estructural eléctricamente continuo, no es necesario instalar los conductores horizontales mencionados en los incisos anteriores; en este caso, es suficiente asegurar la conexión entre los cimientos de la estructura y el sistema de puesta a tierra.

NOTA - Para el caso de fachadas a base de elementos metálicos, éstos pueden utilizarse como terminales aéreas naturales, siempre y cuando cumplan con lo mencionado, por lo que no es necesario utilizar los conductores horizontales cerrados alrededor del edificio.

e) Para el caso de estructuras esbeltas (como las torres de telecomunicaciones) menores que 60 m, debe instalarse como mínimo una terminal aérea en la parte más alta de la misma, con una altura mínima de 2 m sobre los objetos o equipos (generalmente antenas) más altos adheridos a la torre y a una separación como mínimo de 0.8 m de dichos objetos o equipos. Cuando dichos objetos o equipos se encuentren fuera del cuerpo de la torre (principalmente en partes intermedias de la torre) y ésta tenga una altura mayor que 60 m, deben utilizarse terminales aéreas horizontales adicionales, como se muestra en la *figura 4.8*. La distancia mínima de separación entre la terminal aérea horizontal y los objetos o equipos a proteger debe ser de 0,8 m.

f) El criterio de ubicación de terminales aéreas horizontales indicadas en el inciso (e) debe aplicarse para la protección de equipo instalado sobre la parte exterior de paredes y muros de edificios (por ejemplo, video cámaras) cuando dicho equipo quede fuera del volumen de protección al rodar la esfera rodante desde el suelo hasta el edificio o estructura.

4.2.5 Conductores de bajada.

El conductor de bajada puede estar formado por solera, barra redonda, cable, o acero estructural o de refuerzo (componente natural) y debe de cumplir con las características mencionadas de materiales.

En el diseño del sistema exterior de protección, los conductores de bajada deben distribuirse uniformemente a lo largo del perímetro de la estructura o edificio mediante una configuración lo

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

más simétrica posible. Estos deben conectarse a los elementos del sistema de puesta a tierra a través de la trayectoria más corta, al igual que a las terminales aéreas y al sistema de puesta a tierra de manera firme y permanente. Deben ubicarse lo más alejado de circuitos eléctricos, electrónicos, equipos con riesgo de fuego o explosión, de puertas y ventanas. Las rutas ubicadas en zonas de tránsito de personas deben evitarse como se indica en las *figuras 4.9*, y debe cumplirse la distancia mínima de seguridad, para el caso en que la ruta indicada en la figura no pueda realizarse.

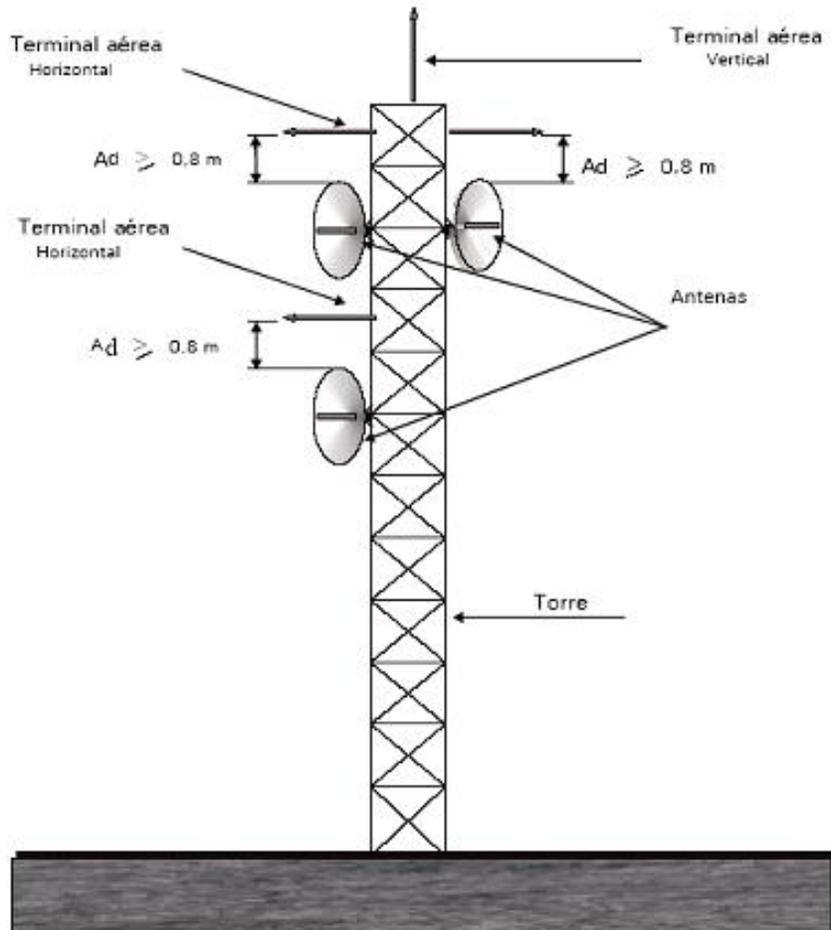


FIGURA 4.8. Arreglo típico de ubicación de terminales aéreas verticales y horizontales para torres con alturas mayores que 60 m.

Los elementos metálicos de una estructura (columnas, traveses y acero de refuerzo) son partes de una estructura que pueden considerarse como conductores de bajada, siempre y cuando cuente con uniones mecánicas o soldadas, excepto para elementos prefabricados.

El radio de curvatura del conductor de bajada en trayectorias verticales y horizontales debe ser mayor o igual a 200 mm. La *figura 4.10* muestra el tratamiento de los radios de curvatura del conductor de bajada.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

La figura 4.11 muestra la trayectoria que debe seguir el conductor de bajada en marquesinas y pretilos. La separación d_2 debe cumplir la distancia de seguridad s .

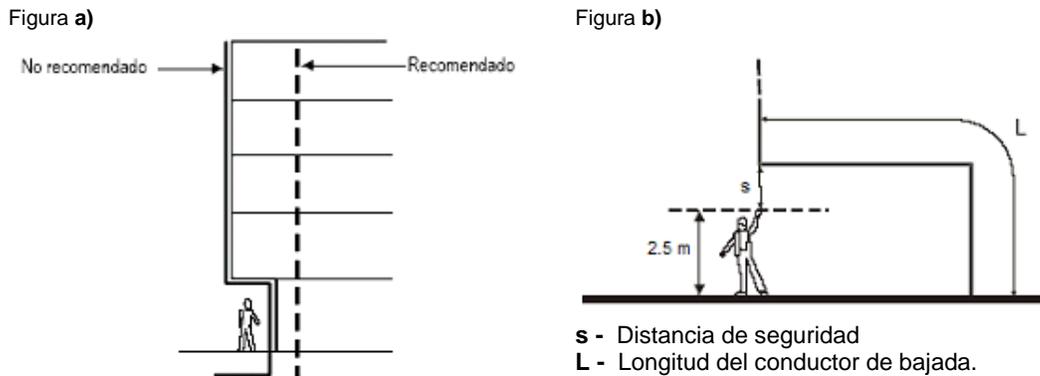


FIGURA 4.9. a) Ruta recomendada para conductores de bajada en edificios con geometrías complejas como lo indica con tránsitos de personas.
b) Distancia de seguridad para el caso de un conductor de bajada en edificios con geometrías complejas. (La altura de la persona con la mano alzada se considera de 2.5 m)

Cuando el conjunto de elementos, para interceptar (terminales aéreas), conducir (conductores de bajada) y disipar (red de puesta a tierra), arreglados de tal manera que los dos primeros elementos no tengan contacto eléctrico con la estructura a proteger se dice que el sistema de protección se encuentra aislado. Las terminales aéreas y conductores de bajada deben mantener la distancia de seguridad s a las partes metálicas de la instalación y deben cumplir con lo siguiente:

En el caso de tener terminales aéreas independientes y separadas o si estas forman una red de conductores horizontales y están montadas en forma aislada o en mástiles separadas de la estructura debe instalarse cuando menos un conductor de bajada por cada terminal aérea.

A nivel de suelo, los conductores de bajada deben interconectarse al sistema de puesta a tierra. Para el caso de un solo conductor de bajada el sistema de puesta a tierra debe estar formado por al menos un arreglo de 3 electrodos y como se indicara cuando se haga el arreglo de puesta a tierra.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

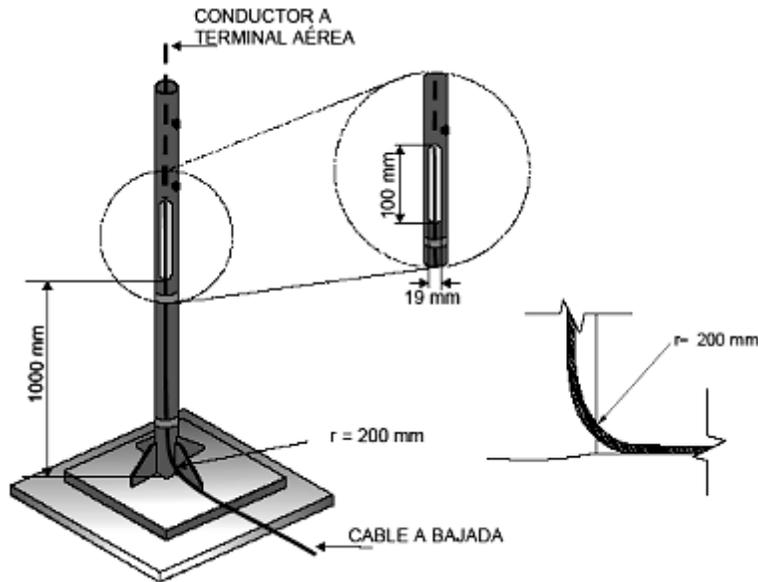


FIGURA 4.10. Arreglo típico y dimensiones mínimas para la trayectoria de un conductor de bajada cumpliendo el radio de curvatura para un mástil soporte de una terminal.

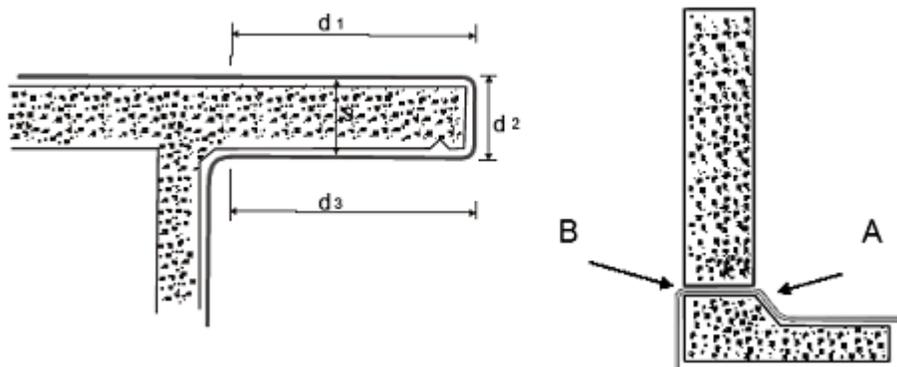
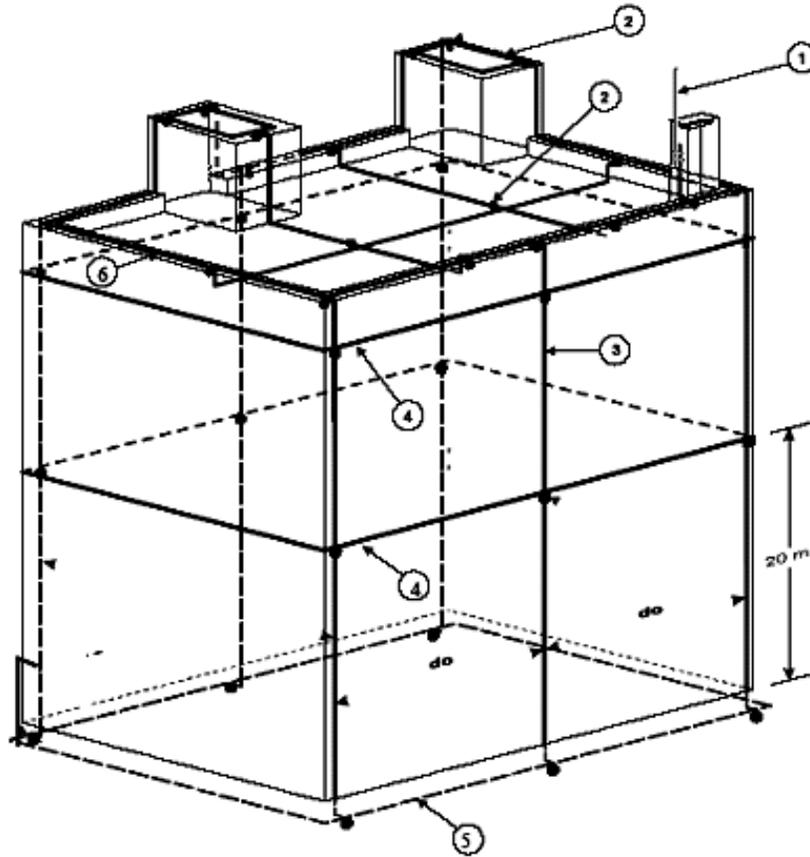


FIGURA 4.11. Trayectorias para los conductores de bajada del sistema exterior de protección en marquesinas y pretilas.

Cuando el conjunto de elementos, para interceptar, conducir y disipar, arreglados de tal manera que los dos primeros elementos tengan contacto eléctrico con la estructura a proteger se dice que el sistema de protección no se encuentra aislado. Para esta condición, las terminales aéreas y los conductores de bajada deben estar conectados a nivel de techo. A nivel de suelo, los conductores de bajada deben interconectarse al sistema de puesta a tierra. Cuando las condiciones físicas del edificio o estructura no permitan esta conexión a nivel de suelo debe utilizarse el acero de refuerzo o estructural de la cimentación para lograr esta conexión. Además deben cumplirse los siguientes puntos, según sea el caso:

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

a) Si el sistema externo de protección está formado por una sola terminal aérea o por conductores horizontales, deben utilizarse dos o más conductores de bajada.



- 1 Terminal aérea.
- 2 Terminal aérea horizontal.
- 3 Conductores de bajada.
- 4 Conductores de anillo equipotencial.
- 5 Sistema de puesta a tierra.
- 6 Conexión de terminales aéreas y conductores de bajada a nivel de techo.

NOTA - Se indica una sola terminal aérea vertical por motivos de claridad en el dibujo.

FIGURA 4.12. Arreglo físico representativo de la conexión entre terminales aéreas, conductores de bajada y un arreglo cerrado del sistema de puesta a tierra en un edificio con diferentes niveles en el techo y para un sistema no aislado de protección.

b) Cuando se utilicen dos conductores de bajada, éstos deben instalarse diametralmente opuestos. Cuando se utilicen más de dos conductores de bajada, éstos deben estar distribuidos alrededor del perímetro del espacio a proteger de tal manera que el valor promedio de la distancia entre los contiguos no sea mayor que los valores indicados en la *tabla 4.13*. Es recomendable un espaciamiento uniforme entre conductores de bajada. Los conductores de bajada deben estar ubicados cerca de cada una de las esquinas de la estructura, aplicando los criterios indicados.

c) Si la pared de la estructura está hecha de material inflamable, los conductores de bajada deben ubicarse a una distancia mayor a 0.1 m del elemento a proteger.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

d) Los conductores de bajada deben conectarse con los conductores horizontales alrededor de la estructura o edificio definidos ya anteriormente.

La distancia de separación d_0 entre conductores de bajada contiguo debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 4.13.

Nivel de protección	Distancia promedio m
I	10
II	15
III	20
IV	25

TABLA 4.13. Distancia promedio de separación entre los conductores de bajada contiguo de acuerdo al nivel de protección.

4.2.6 Sistema de puesta a tierra.

Desde el punto de vista de protección contra tormentas eléctricas debe utilizarse un sistema de puesta a tierra que minimice los potenciales de paso y contacto para reducir riesgos de una descarga eléctrica y la formación de arcos laterales entre partes metálicas que pongan en peligro al personal y al equipo en la trayectoria de los conductores de bajada.

El sistema de puesta a tierra debe integrarse por 3 electrodos por cada conductor de bajada cuando éstos no se interconecten entre sí por medio de un conductor enterrado. Cuando los electrodos de puesta a tierra de los conductores de bajada se interconecten entre sí mediante un conductor enterrado puede utilizarse un arreglo de uno o más electrodos de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra debe integrar, incluir e interconectar todos los sistemas dentro de la instalación (sistema exterior de protección, sistemas de energía eléctrica, sistemas de telecomunicaciones, entre otros).

Con el fin de mantener la elevación de potencial del sistema de puesta a tierra a niveles seguros, se recomienda que el valor de la resistencia de puesta a tierra se mantenga en niveles no mayores que 10 Ω . Este valor de resistencia debe cumplirse para cada arreglo de 3 electrodos por conductor de bajada, cuando éstos no se encuentren interconectados.

Los elementos que forman un sistema de puesta a tierra son: Electrodos de puesta a tierra, conductores desnudos para unir los electrodos, conexiones soldables y registros.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

En general, un electrodo de puesta a tierra puede ser de cualquier tipo y forma, siempre y cuando sea metálico, tenga una baja resistencia de puesta a tierra y cumpla con las características indicadas en cuanto a lo mencionado a materiales, sus componentes no deben tener elementos contaminantes al medio ambiente.

Los electrodos de puesta a tierra utilizados puede ser verticales (varillas, tubos, conductores planos), horizontales (tubos, cables o conductores planos colocados en forma radial o en anillo), los formados por los cimientos de las estructuras (naturales), de placas y mallas.

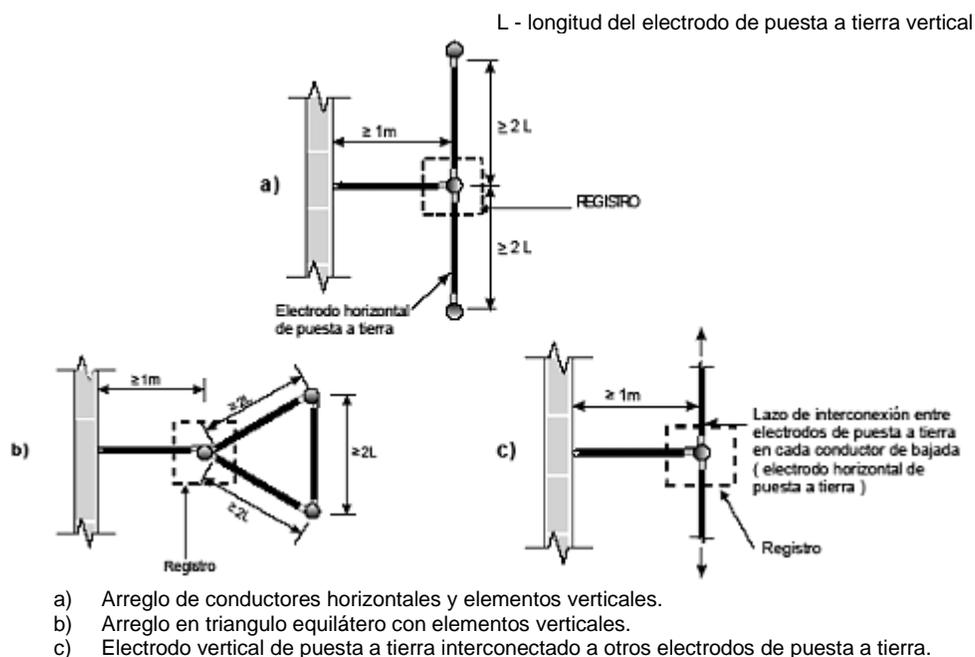


FIGURA 4.13. Vista de planta de los arreglos típicos para formar el electrodo de puesta a tierra que conecta a cada conductor de bajada del sistema exterior de protección.

Los factores a considerar para el diseño de un sistema de puesta a tierra, son: el estudio del terreno (resistividad, véase apéndice D), área disponible, los aspectos físicos, como obstrucciones, rocas y otros servicios o elementos enterrados; y la agresividad del suelo sobre los materiales del sistema de puesta a tierra (corrosión). La resistencia obtenida en el diseño siempre debe verificarse por medio de mediciones en campo, aplicando la metodología establecida en el Apéndice E.

Los arreglos prácticos para el sistema de puesta a tierra que pueden utilizarse dependen del espacio disponible y de las características eléctricas del suelo. Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran algunos arreglos típicos que pueden utilizarse como electrodos de puesta a tierra conectados a los conductores de bajada. La selección del arreglo del sistema de puesta a tierra

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

depende de la resistividad del suelo y de las limitaciones prácticas encontradas en el área de interés.

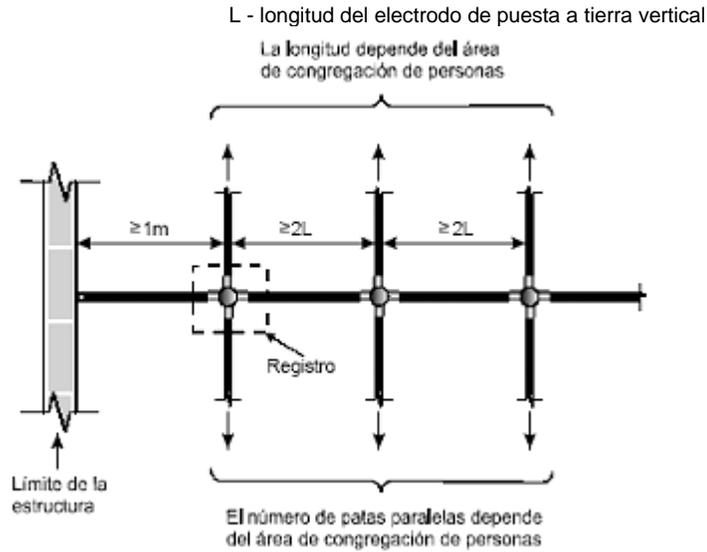


FIGURA 4.14. Vista de planta de los arreglo del sistema de puesta a tierra recomendado para áreas con tránsito de personas en caso de no poder instalar una capa superficial de alta resistividad.

Se deben de tomar ciertas consideraciones para la instalación de los electrodos cuya longitud debe de ser no menor que 2.40 m. y la separación entre ellos el doble de su longitud. Las conexiones que se realicen con los conductores de bajada y con el conductor enterrado sin aislamiento, deben de ser por medio de un proceso de soldadura exotérmica y conectores a compresión.

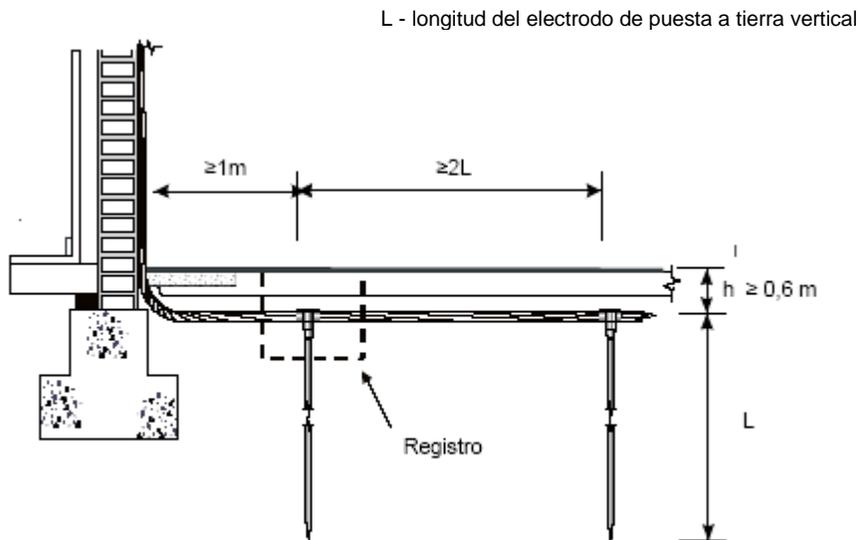


FIGURA 4.15. Vista lateral de enterramiento de los electrodos verticales y horizontales de puesta a tierra.

Para poder realizar mediciones y mantenimiento del sistema de puesta a tierra se instalaran registros con dimensiones mínimas de 32x32x32 cm o de un diámetro mínimo de 32 cm.

Para el conductor enterrado sin aislamiento o electrodos de puesta a tierra horizontales se deben de instalar a una distancia de 1.0 m o mayor de la estructura y a profundidades de 0.6 m o mayores, por debajo de cualquier conjunto de cables directamente enterrados, cables en canalizaciones o tuberías pertenecientes a servicios que entran o salen de la estructura y no deben conectarse en su trayectoria a conductores enterrados en el suelo pertenecientes a otros servicios.

Cuando se tengan diferentes estructuras en una misma área pertenecientes a diferentes propietarios, debe instalarse un sistema de puesta a tierra para cada estructura y evaluar su conexión, dependiendo de si las instalaciones comparten servicios o no.

La tubería principal del servicio de agua puede interconectarse con él o los elementos del sistema de puesta a tierra, siempre y cuando sea metálica, se encuentre enterrada en el suelo, se conecte al sistema de puesta a tierra principal, forme parte de la unión equipotencial y no tenga discontinuidades generadas por partes aislantes entre tramos de tuberías. Las tuberías de gas no deben, bajo ninguna circunstancia, ser utilizadas como un electrodo de puesta a tierra.

Los cimientos de edificios o estructuras pueden utilizarse como electrodos de puesta a tierra (conocidos como naturales), los cuales representan un medio auxiliar o complementario de disipación del sistema principal. La conexión entre ambos sistemas debe ser permanente. Los cimientos de edificios o estructuras pueden utilizarse como electrodos de puesta a tierra del sistema de puesta a tierra del sistema de protección contra descargas atmosféricas, siempre y cuando haya sido diseñado y construido para tal fin.

El uso de rellenos químicos representa una alternativa para reducir la resistencia a tierra de los electrodos de puesta a tierra en aquellos lugares con resistividades del suelo elevadas. Estos rellenos químicos deben ser inertes al medio ambiente y no dañar a los elementos del sistema de puesta a tierra por efecto de corrosión.

Para el caso en el que se tengan sistemas de puesta a tierra para diferentes servicios existentes dentro de una misma instalación (sistema de energía eléctrica, sistema de telecomunicaciones, etc.) la resistencia del sistema de puesta a tierra antes de la conexión con los sistemas existentes debe ser menor o igual a 10 Ω .

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

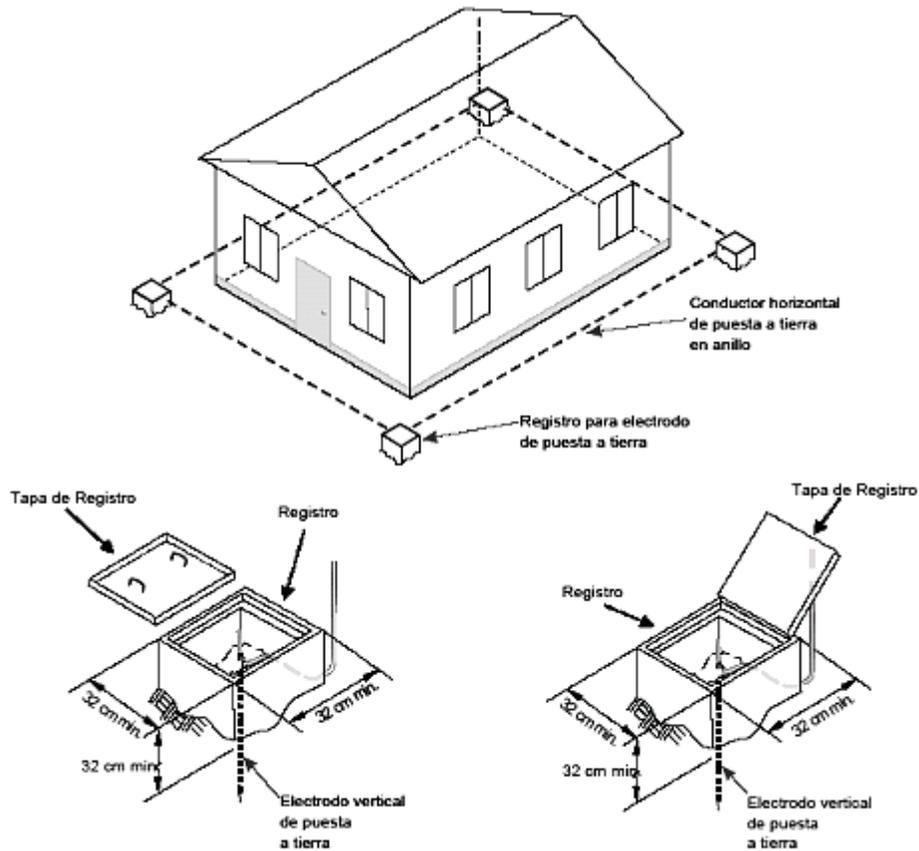


FIGURA 4.16. Diagrama de conexión de los electrodos de puesta a tierra mediante una trayectoria cerrada alrededor de la estructura o instalación con registros en las esquinas.

Cuando el suelo es rocoso, resulta muy difícil y costoso obtener valores bajos de resistencia mediante un sistema de puesta a tierra como el indicado anteriormente debido a los problemas en la obtención de la profundidad de enterramiento, por lo que en este caso no aplica el valor máximo de 10Ω . Se debe tener especial cuidado de obtener una superficie equipotencial para reducir las diferencias de potencial que pongan en riesgo a las personas y al equipo.

Otra de las medidas que pueden adoptarse para este tipo de suelo es el arreglo de electrodos de puesta a tierra horizontales y verticales formando un lazo cerrado alrededor de la estructura a la profundidad que el suelo lo permita e interconectarlo con el acero de refuerzo o estructural de la instalación. Deben evitarse en lo posible arreglos con trayectorias abiertas. En caso de que no sea posible enterrar dicho arreglo, éste debe ubicarse en contacto directo sobre la superficie del suelo rocoso, con una cubierta de concreto con el objeto de evitar que las personas tengan un contacto directo con el conductor y ofrecer una protección contra daño mecánico y condiciones ambientales.

Debe considerarse la utilización de electrodos profundos para los casos en que sea imperativo obtener un valor de resistencia de puesta a tierra menor que 10Ω .

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Se puede instalar un sistema de puesta a tierra auxiliar en zonas con suelos no rocosos o con resistividades más bajas cercanas a la instalación y conectarlo al sistema de puesta a tierra del sistema de protección contra descargas atmosféricas mediante conductores enterrados de conexión.

La circulación de la corriente en los conductores de bajada y en los elementos del sistema de puesta a tierra puede producir condiciones y/o gradientes peligrosos que pueden poner en riesgo la vida de los seres vivos por choque eléctrico. Se deberá proveer una canalización no metálica a una altura mínima de 2 m a partir del nivel de piso terminado, donde el conductor de bajada represente el 53% de la sección transversal interna de la canalización, con resistencia a la intemperie sobre la superficie del conductor de bajada con el objeto de reducir la posibilidad de contacto accidental o incidental de los seres vivos; de igual manera se instalara un arreglo del sistema de puesta a tierra como el indicado en la *figura 4.14*, o proveer una superficie de alta resistividad en la zona de tránsito de personas a través de una capa de concreto de 0.10 m como mínimo o una capa de grava triturada intermedia de 0.10 m como mínimo entre el terreno natural y los elementos enterrados del sistema de puesta a tierra.

4.3 Protección contra descargas atmosféricas de estructuras con peligro de fuego y/o explosión.

Este tipo de instalaciones son aquellas en las que se manejan, distribuyen, fabrican o almacenan productos inflamables, ya sean sólidos, líquidos, gases, vapores o polvos. El diseño e instalación de un sistema de protección debe llevarse a cabo principalmente para ofrecer uno o varios puntos preferentes de impacto para el rayo en la protección de estructuras o elementos donde exista el peligro de fuego y explosión ante la incidencia de rayo directo, reducir la posibilidad de presentarse arcos eléctricos, por rayo directo o por efecto de inducción, que generen ignición en áreas peligrosas y reducir la posibilidad de derretimiento de material debido al paso de la corriente de rayo, excepto al punto de impacto.

Para la protección de este tipo de instalaciones, la unión equipotencial representa un factor importante que debe satisfacerse completamente, ya que una sola conexión mal realizada u omitida puede producir arcos eléctricos, produciendo a su vez zonas de alta temperatura que pueden generar condiciones para la ignición. El único arco que no puede evitarse es el canal principal del rayo.

Cuando se indique la instalación de un sistema exterior de protección aislado, éste debe ser diseñado con un Nivel I de protección, y sus elementos de intercepción y de conducción de la corriente de rayo deben estar a una distancia mínima de 2 m de cualquier elemento de la

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

estructura a proteger o mayor si la distancia de seguridad así lo determina. Este criterio aplica tanto para un sistema exterior de protección formado por elementos metálicos verticales, cables aéreos tendidos horizontalmente o por una combinación de ambos. Si se utilizan hojas metálicas como elemento aéreo de protección del sistema de protección aislado, debe verificarse que el espesor de la lámina cumpla con lo indicado anteriormente y que exista continuidad eléctrica entre sus partes.

Los conductores de bajada utilizados en el sistema exterior de protección aislado, deben ser de un solo tramo o estar unidos por medio de soldadura exotérmica, conectores mecánicos y de compresión.

Para el sistema de puesta a tierra, debe utilizarse un arreglo en trayectoria cerrada alrededor de la estructura a proteger, y aplicar los criterios mencionados en el tema 4.2.6 sistema de puesta a tierra. Asimismo, la resistencia del sistema de puesta a tierra no debe ser mayor a 10Ω .

La unión equipotencial del sistema exterior de protección y las partes metálicas de la estructura a proteger debe realizarse a nivel de suelo, en donde la separación entre las partes metálicas sea menor que la distancia de seguridad estimada con un factor $k_c=1$.

Cuando la cantidad del material sólido explosivo en la instalación sea pequeña (como el utilizado en un laboratorio), o el material explosivo esté almacenado en un contenedor cerrado, completamente metálico con un espesor mínimo de 5 mm, eléctricamente continuo y conectado al sistema de puesta a tierra, el nivel de riesgo puede considerarse aceptable, por lo que puede omitirse la instalación de un sistema exterior de protección aislado, satisfaciendo en todo momento las medidas de protección del sistema interior de protección.

Los contenedores para material líquido o gaseoso pueden ser de almacenamiento de material inflamable o de procesos con sustancias inflamables o peligrosas. En general, puede omitirse la instalación de un sistema exterior de protección aislado (ser autoprotegido) si se cumplen todas las siguientes condiciones:

- a) El cuerpo metálico debe tener un espesor mínimo de 5 mm en cualquier sección.
- b) El techo del cuerpo metálico debe estar libre de compuertas abiertas.
- c) Exista continuidad entre las partes del cuerpo metálico y se garantice la unión entre sus partes por medios atornillados o de soldadura.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

d) En caso de tener válvulas de alivio, éstas deben operar correctamente y deben tener un dispositivo de protección contra penetración de flama al interior del contenedor.

e) No debe tener emanaciones excesivas de vapores inflamables que puedan generar ignición ante un evento de rayo cercano o directo.

f) No deben existir elementos susceptibles en el cuerpo del contenedor que puedan ser dañados por la circulación de la corriente de rayo o alcanzados por impacto de rayo, ya que esta condición pone en riesgo la integridad física del contenedor o confinamiento de la sustancia almacenada o en proceso.

g) El cuerpo metálico del contenedor debe unirse al sistema de puesta a tierra.

En caso de que alguna de las condiciones anteriores no se cumpla y el cuerpo del contenedor no sea metálico, debe instalarse un sistema exterior de protección aislado para la protección contra rayo.

Las condiciones anteriores deben aplicarse a cualquier clase de contenedor, especialmente aquellos que llevan muchos años en servicio, ya que la corrosión en el cuerpo del contenedor puede no garantizar la condición de espesor mínimo. Por otro lado, las compuertas dejadas abiertas durante una tormenta eléctrica han demostrado ser una de las mayores causas de siniestros ante la incidencia de rayo.

El sistema de puesta a tierra debe encerrar el perímetro del contenedor con el objeto de asegurar una rápida disipación de la corriente de rayo a tierra. Aplicando la recomendación de 1,0 m de separación mínima entre los elementos enterrados del sistema de puesta a tierra con la estructura del contenedor; además, todos los sistemas de puesta a tierra ubicados en el mismo predio de la instalación del contenedor deben estar interconectados.

Cuando el contenedor posee un techo no metálico, no debe considerarse autoprotegido ante la incidencia de un rayo directo, por lo que la protección debe realizarse mediante un elemento metálico que cubra el techo del contenedor con un espesor mínimo de 5 mm y unido firmemente al cuerpo del contenedor satisfaciendo las condiciones indicadas anteriormente o implementar un sistema exterior de protección aislado.

Cuando el contenedor metálico posee un techo metálico flotante, puede omitirse la instalación de un sistema exterior de protección aislado, pero debe asegurarse que los sellos ubicados en el espacio entre el techo y el cuerpo del contenedor operen correctamente, para evitar emanación de

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

vapores peligrosos. La ignición puede originarse por la incidencia de un rayo directo o por la descarga de una carga inducida en el techo flotante por rayo cercano al contenedor. El medio más efectivo para la autoprotección de estos contenedores lo constituye la correcta operación de los sellos y la instalación de cintas metálicas de unión equipotencial, ubicadas entre el techo flotante y el cuerpo del contenedor a intervalos no mayores que 3,0 m o la utilización de conductores de unión entre la parte más alta del contenedor y la superficie externa del techo flotante.

Con el objeto de reducir riesgos de ignición en estos contenedores relacionados con la incidencia de rayos, se recomienda que no se lleve a cabo ninguna operación de llenado o vaciado al más bajo nivel durante condiciones de tormentas eléctricas, ya que la condición de techo bajo y mínimo nivel de líquido produce un espacio considerable para generar vapores inflamables dentro del contenedor.

Cuando el contenedor con techo metálico posee un techo flotante interno, se considera que el contenedor se encuentra protegido contra el riesgo de ignición por efecto inducido debido a rayo cercano. Aún cuando el techo flotante interno no requiere unirse equipotencialmente al cuerpo del contenedor para satisfacer la protección contra rayo, se recomienda realizar dicha unión equipotencial debido a los efectos de cargas electrostáticas acumuladas.

En general, la tubería utilizada en áreas de procesos o de almacenamiento satisface la condición de espesor, por lo que no es necesario instalar un sistema exterior de protección aislado para proteger exclusivamente la tubería.

Como se indicó anteriormente, la tubería y los servicios asociados a un contenedor deben conectarse al sistema de puesta a tierra, a menos que se encuentren firmemente conectados al cuerpo del contenedor por medio de soldadura.

Cuando la tubería se encuentra unida al cuerpo del contenedor por medio de tornillos, debe instalarse un conductor de unión de cobre con sección transversal de 50 mm^2 como mínimo, entre la sección del tubo ubicada antes y después del empalme. Cuando se utilicen piezas aislantes en los empalmes y esto sea un requerimiento para otros sistemas, la unión entre partes debe realizarse por medio de supresor de sobretensiones transitorias especiales, del tipo conocido como descargadores.

Cuando la tubería metálica sea aérea (no esté en contacto directo con la tierra) debe conectarse al sistema de puesta a tierra en el punto de llegada y de salida del contenedor o instalación y a 150 m antes de llegar y a 150 m a partir de la salida del contenedor o instalación.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

La tubería metálica nunca debe utilizarse como medio para conectar el cuerpo del contenedor al sistema de puesta a tierra, pretendiendo sustituir el conductor de puesta a tierra.

Los criterios indicados en esta sección deben aplicarse a cualquier otro elemento metálico (rieles, soportes tipo charolas para cables, guías metálicas) que entre o salga de un contenedor o instalación que desarrolle procesos físico-químicos.

En instalaciones con procesos industriales, existe una diversidad de estructuras que deben protegerse de acuerdo con el tipo de estructura, contenido, proceso manejado y peligrosidad, como contenedores (de almacenamiento o de procesos), instalaciones de procesos, tubería asociada, edificios administrativos, áreas de trabajo, almacenes, etc., considerando medidas específicas para ello de acuerdo a normas.

4.4 Comprobación, actividades preventivas y correctivas.

Los elementos que integran un sistema de protección, están expuestos a corrosión, daño mecánico, daño por condiciones ambientales y daño ante la circulación de corrientes excesivas. Estas condiciones adversas generan que el sistema de protección pierda su efectividad con el paso de los años.

Por lo tanto, una vez que se ha instalado un sistema de protección, debe seguirse y aplicarse un programa de verificación y como resultado llevar a cabo las actividades preventivas y correctivas correspondientes, las cuales deben estar coordinadas.

La verificación debe seguir un programa con el cual se obtenga una compilación de datos que permita establecer el estado que guardan los elementos del sistema de protección. Antes de realizar la verificación correspondiente, debe consultarse la información o informes de inspecciones previas, con el fin de identificar puntos críticos del sistema y tener elementos de comparación confiables.

Las actividades preventivas y correctivas deben llevarse a cabo y deben satisfacer las necesidades indicadas en la verificación. Adicionalmente, las actividades preventivas y correctivas deben satisfacer, pero no deben limitarse a consideraciones específicas de acuerdo a normas.

El grado de deterioro del sistema de protección puede estimarse mediante los resultados directamente obtenidos en la verificación correspondiente o mediante la comparación de los resultados obtenidos con los indicados en el historial de verificación de la instalación.

CAPITULO 5

APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

CAPITULO V

5. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE.

Examinados en el capítulo anterior los criterios generales de protección contra descargas atmosféricas, veamos ahora una aplicación práctica que constituye una guía para su aplicación.

5.1 Procedimiento de elección de un sistema externo de protección.

Es recomendable que el diseño del sistema de protección contra tormentas eléctricas sea parte integral del proyecto de instalación eléctrica de una estructura, ya que éste permite reducir costos, utilizar racionalmente los recursos y mantener un arreglo entre los elementos del sistema de protección contra tormentas eléctricas.

5.1.1 Generalidades

El cálculo que aquí se indica corresponde al diseño de terminales aéreas aplicando el método de la esfera rodante en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México ubicada en Circuito Interior de Ciudad Universitaria, cuyas coordenadas geográficas son Latitud: 19° 43' N, Longitud: 99° 14' O; conformada principalmente de dos edificios con alturas de 27 metros y dos menores de 8 metros. Para realizar el cálculo se utilizará el método de la esfera rodante descrito en la sección 4.2.3 del capítulo 4 y tablas según reglamentación vigente (NMX-J-549-ANCE-2006).

5.1.2 Clasificación de la estructura

La estructura se clasifica como "Edificio de servicio / Escuela". En este caso, los efectos de los rayos para el edificio comprenden: Daños a personas, estructura, materiales e instalaciones eléctricas, incendio; falla de dispositivos de control, como por ejemplo alarmas; pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información, como se vio en la tabla 4.1.

Se efectuó un levantamiento de las dimensiones de la estructura (*figura 5.1*) con sus adyacentes; esto también nos permite conocer las condiciones actuales del sistema de protección contra descargas atmosféricas del edificio.

Actualmente el sistema de protección contra descargas atmosféricas de la Facultad de Ingeniería tiene instaladas terminales aéreas del tipo Franklin de aluminio con dimensiones de 30

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

cm de longitud y 13 mm de diámetro, separadas a una distancia de entre 5 a 6 m y unidas por un conductor desnudo trenzado de cobre y aluminio, ubicadas sobre el perímetro de la azotea de los edificios 1 y 2.

En algunos puntos de la instalación se presenta ausencia de terminales aéreas y en la mayoría de los equipos metálicos localizados en la azotea, no están referenciados al conductor instalado en la orilla de la estructura; los que se encuentran referenciados están unidos a 90°, oxidados y pintados. Los conductores que forman el sistema de protección contra descargas atmosféricas están unidos mediante conectores a compresión, lo que hace que la unión no sea fija y segura.

Existen edificios que no cuentan con una protección contra descargas atmosféricas y que tienen equipos metálicos y antenas en la azotea corriendo el riesgo de una incidencia de rayo.

De lo anterior se puede concluir que la instalación de protección contra descargas atmosféricas de la Facultad de Ingeniería se encuentra en malas condiciones y no cumple con las especificaciones descritas en los capítulos anteriores, por lo que se debe proponer la corrección de la instalación.

5.1.3 Determinación de la necesidad del sistema de protección

Debemos obtener los valores correspondientes a N_0 y N_d , para determinar si la protección es necesaria. Se establecerá el nivel de protección adecuado y las dimensiones del sistema externo de protección.

El valor de N_d se obtiene de la *tabla 4.1* cuyo valor es 0.02 [rayos / año]. Para la determinación de N_0 se evalúa aplicando la fórmula $N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6}$ (4-1) [rayos / año].

El área equivalente A_e fue determinada mediante un programa de cómputo (*figura 5.2, 5.3 y 5.4*) y el valor de N_g se obtuvo del mapa de isodensidad de rayos para el Distrito Federal en el “apéndice A”, cuyo valor de densidad de rayos a tierra (DRT) es 6 [rayos/(km^2 *año)]. Al sustituir los valores mencionados el valor es de $N_0=0.288$ [rayos / año]. En consecuencia, N_0 (estimado) es mayor que N_d (valor permitido) por lo que se debe instalar un sistema de protección exterior.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

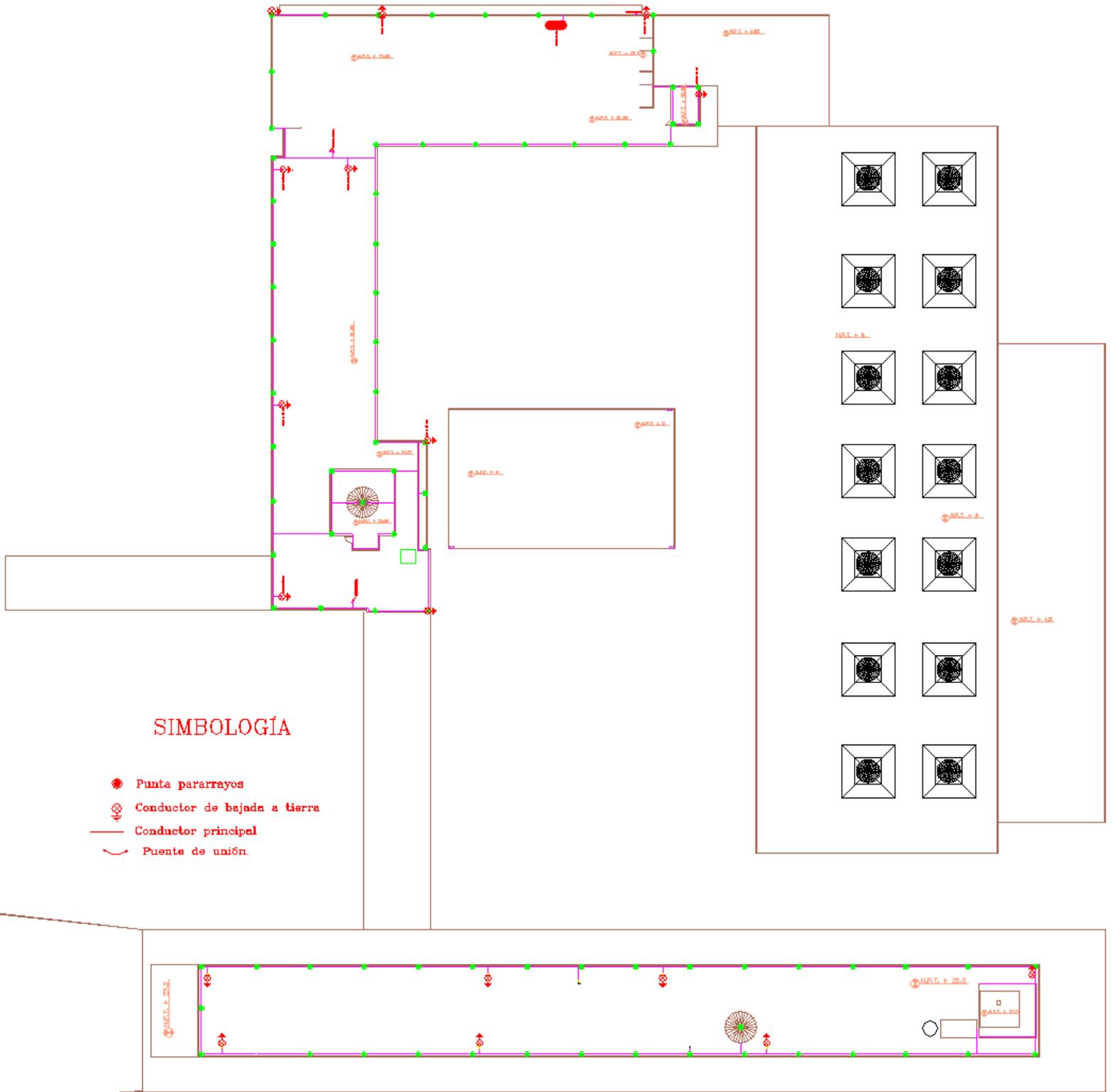


FIGURA 5.1. Plano del estado actual del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

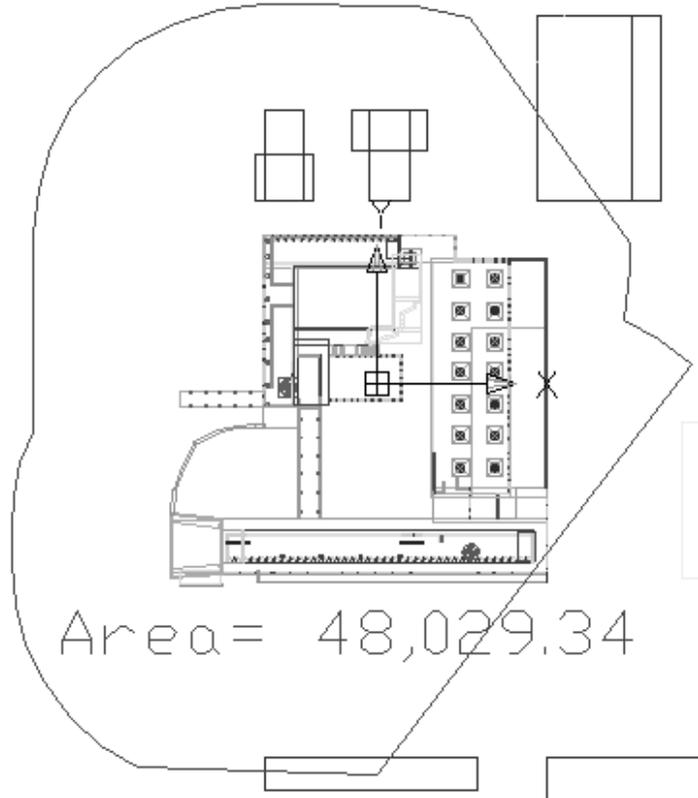


FIGURA 5.2. Área de captura equivalente con otras adyacentes.

$$A_e = 48,029.34 \text{ m}^2$$

$$N_0 = 6 \left[\frac{\text{rayos}}{\text{km}^2 \text{ año}} \right] \times 48,029 \text{ m}^2 \times 10^{-6}$$

$$N_0 = 0.288 \left[\frac{\text{rayos}}{\text{año}} \right]$$

$$\therefore 0.288 \left[\frac{\text{rayos}}{\text{año}} \right] > 0.02 \left[\frac{\text{rayos}}{\text{año}} \right]$$

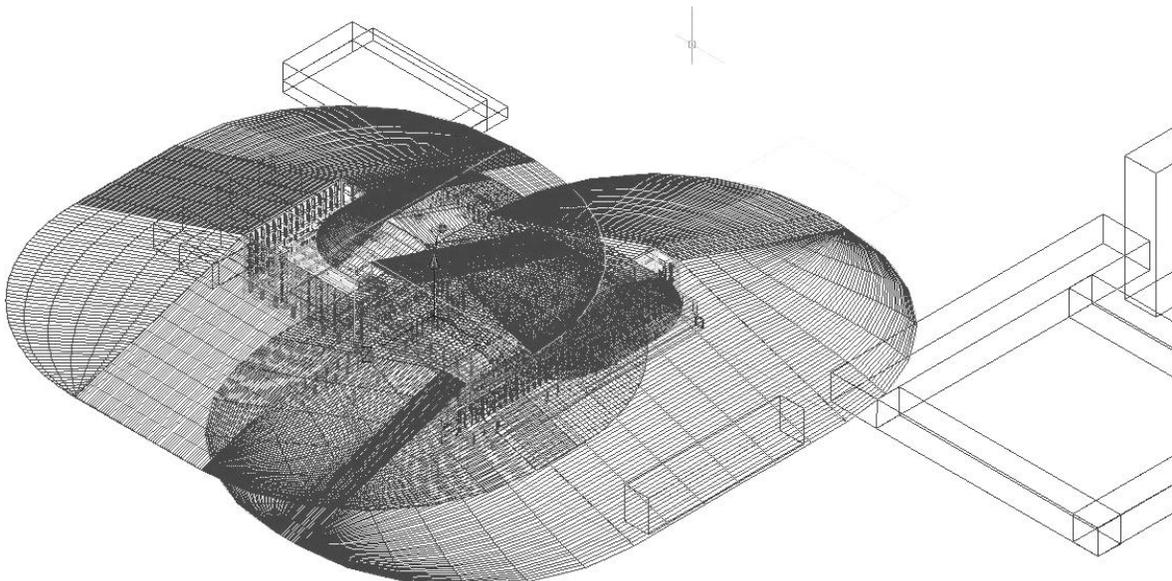


FIGURA 5.3. Área equivalente de captura de la Facultad de Ingeniería UNAM.

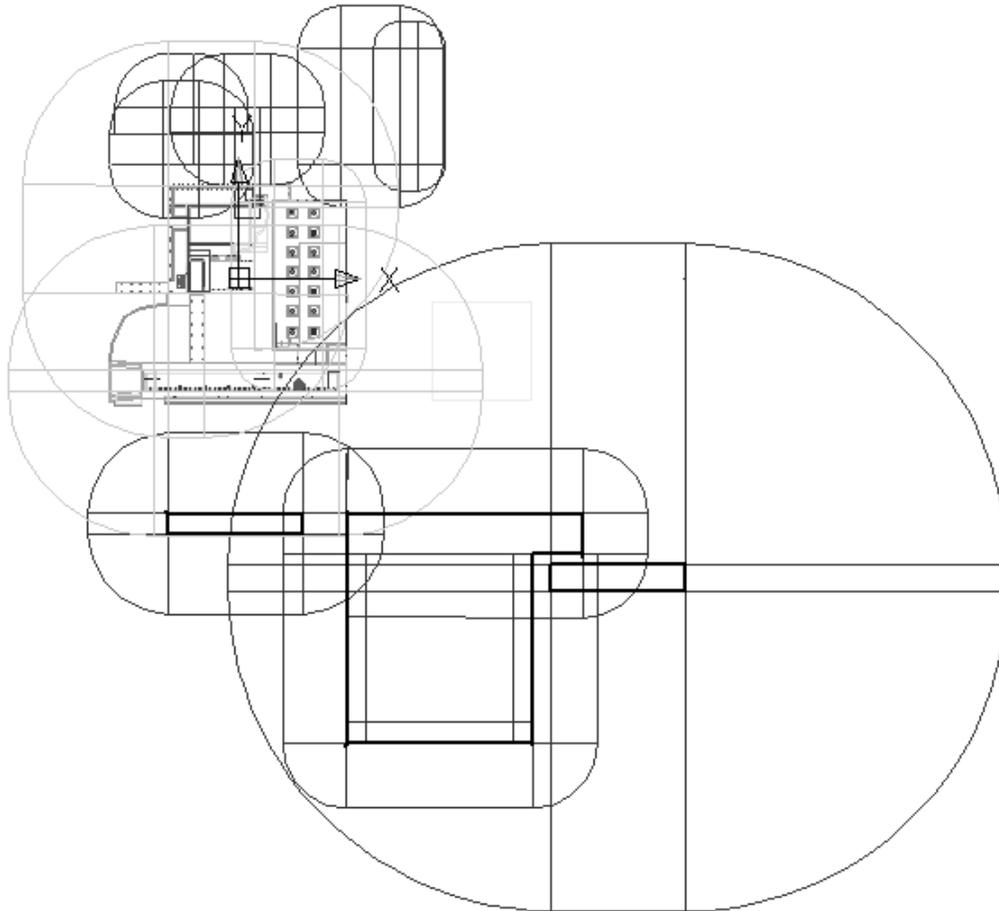


FIGURA 5.4. Área equivalente de la Facultad de Ingeniería UNAM y de las estructuras vecinas obtenida mediante programa de cómputo.

5.1.4 Aplicación del método para el sistema de protección externo

De acuerdo a la clasificación de la estructura, se considera un nivel de protección II, obtenida de la *tabla 4.2*. El radio de la esfera rodante que será empleado con el nivel de protección seleccionado se puede determinar mediante la *tabla 4.10*, cuyo valor de radio r_s es de 30 metros con un valor de corriente de 6 [kA].

Se utiliza el método de la esfera rodante con la ayuda de programas de cómputo en 3 dimensiones para realizar la simulación. Esta aplicación nos permite establecer la ubicación, la distancia, el tamaño y el número de terminales requeridas. La esfera virtual se hace rodar por encima de la estructura que se desea proteger en cada uno de sus puntos y en todas direcciones. La ubicación y la distancia de las terminales dependen de la forma geométrica de la estructura y de las dimensiones de los objetos ubicados sobre esta (aire acondicionado, tanques, antenas, cúpulas metálicas, etc.).



FIGURA 5.5. Rodamiento de la esfera en un extremo de la estructura.

La *figura 5.5* muestra la esfera girando hacia la estructura desde nivel de piso, considerando como primer punto de contacto entre la estructura y la esfera, la terminal aérea localizada en uno de los extremos llamada “pivote”; cabe señalar que pudo ser cualquier otra terminal que estuviera instalada en el extremo de las estructuras a proteger.

A continuación se selecciona la terminal aérea que se empleará, para ello se consulta las especificaciones del proveedor cumpliendo con las características de materiales mencionadas en el capítulo IV, puntas de cobre con una sección de 13 mm de diámetro, perfectamente fijadas a la estructura. La altura de las terminales está relacionada con el espacio que se desea proteger por lo que se eligen puntas de altura de 60 cm, en otro caso puntas de 1.5 m según se requiera, o la instalación de mástiles para aumentar la altura de las terminales, soportados por medio de un tripie, que permitirá proteger los objetos ubicados sobre la estructura.

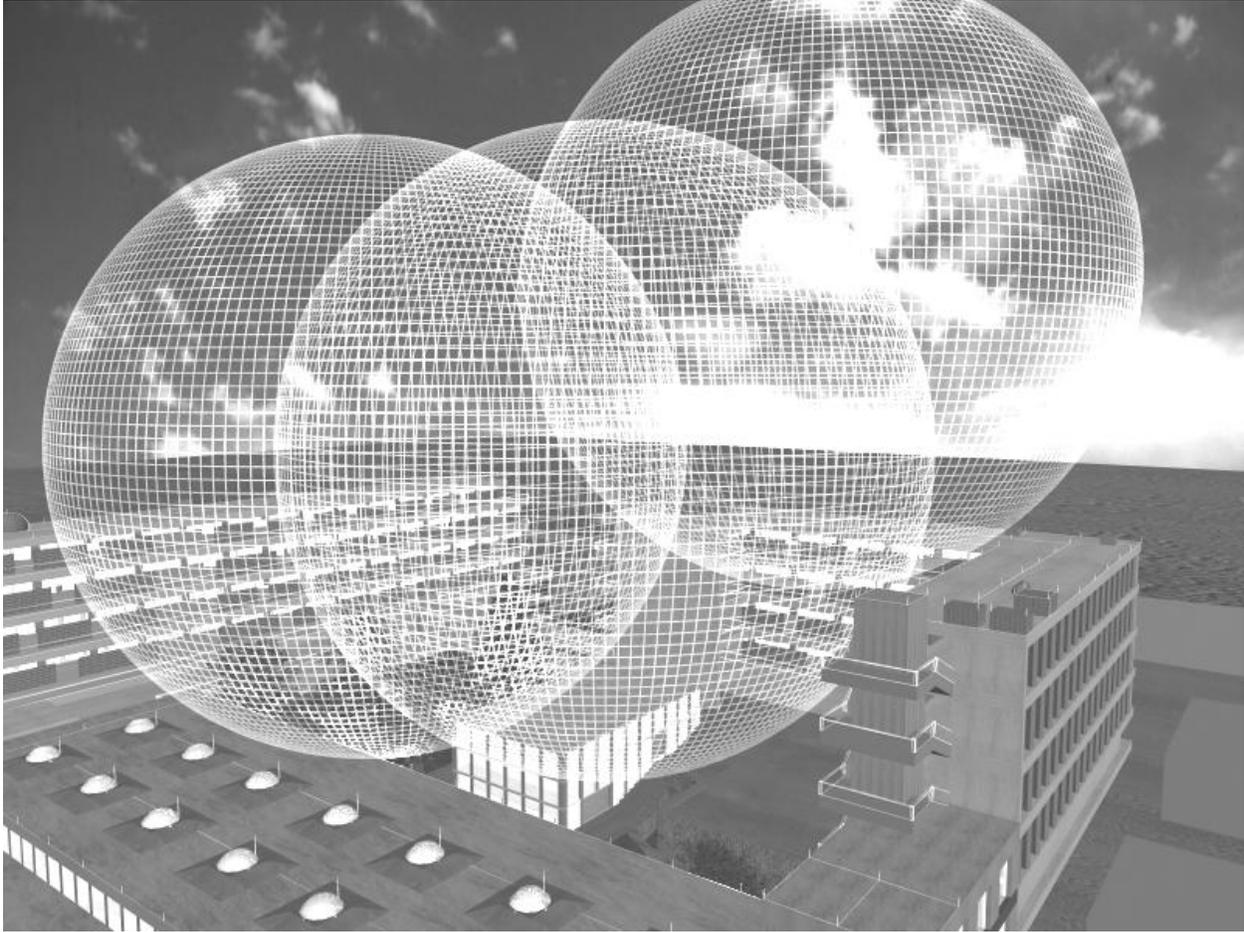


FIGURA 5.6. Rodamiento de la esfera por diferentes puntos de la estructura.

Para colocación y unión de terminales aéreas se instala por el contorno de la estructura y donde se requiera bases unidas por un conductor de características mencionadas en el capítulo IV, garantizando la permanencia de una buena conexión para evitar al máximo la corrosión. Estos deberán estar sujetos en toda su trayectoria por medio de soportes espaciados a intervalos de 1 m como máximo, procurando que el número de uniones y empalmes entre conductores sea el mínimo. En caso que se presenten curvas en la trayectoria se debe cuidar que el ángulo no sea menor a 90° y con radio de curvatura no menos de 200 mm.

Los puntos donde la esfera toca partes metálicas (escalera, barandal, varillas, tuberías de agua, etc.) deben conectarse al sistema de protección externo como se muestra en la figura del plano propuesto (figura 5.7). Existe tubería de agua y estructuras metálicas como el del aire acondicionado, una cúpula de aluminio y una escalera de hierro, referenciados al conductor instalado en la orilla de la estructura mediante soldadura exotérmica; se debe cuidar que estos se encuentren libres de pintura y considerar el empleo de accesorios para evitar la corrosión cuando se tengan diferentes materiales. En ningún caso se deberá conectar al sistema de protección externo tuberías de gas.

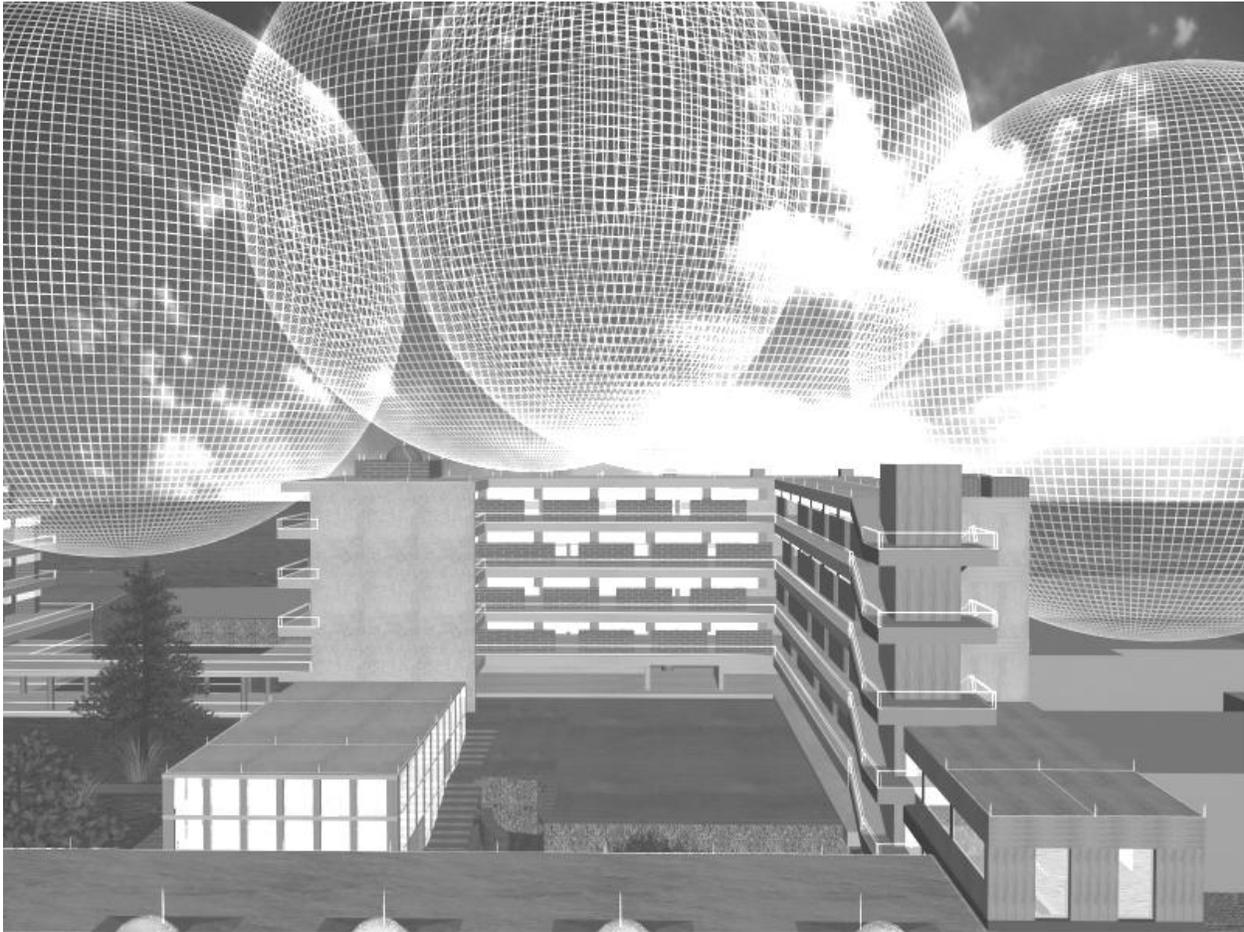


FIGURA 5.7. Rodamiento de la esfera por la estructura a proteger con estructuras vecinas.

Los conductores de bajada se proponen a una distancia de 15 m, distribuidos a lo largo del perímetro de las estructuras con una configuración simétrica, permitiendo la conducción de la corriente de rayo (en caso de la incidencia) por varias trayectorias posibles (*figura 5.9, 5.10 y 5.11*).

Con la aplicación del método de la esfera rodante se obtiene que la protección de los edificios requieren en total de 220 puntas, 14 de 1.5 m y 206 de 60 cm, unidas por un conductor desnudo. La distancia de las puntas están colocadas entre 6 y 7 metros permitiendo que la esfera al ser girada, no toque la estructura y en consecuencia quede protegida. Como la altura del edificio es mayor a 20 m y menor o igual que 60 m, deben instalarse, adicional a las terminales aéreas, conductores horizontales alrededor del edificio a 20 m de altura.

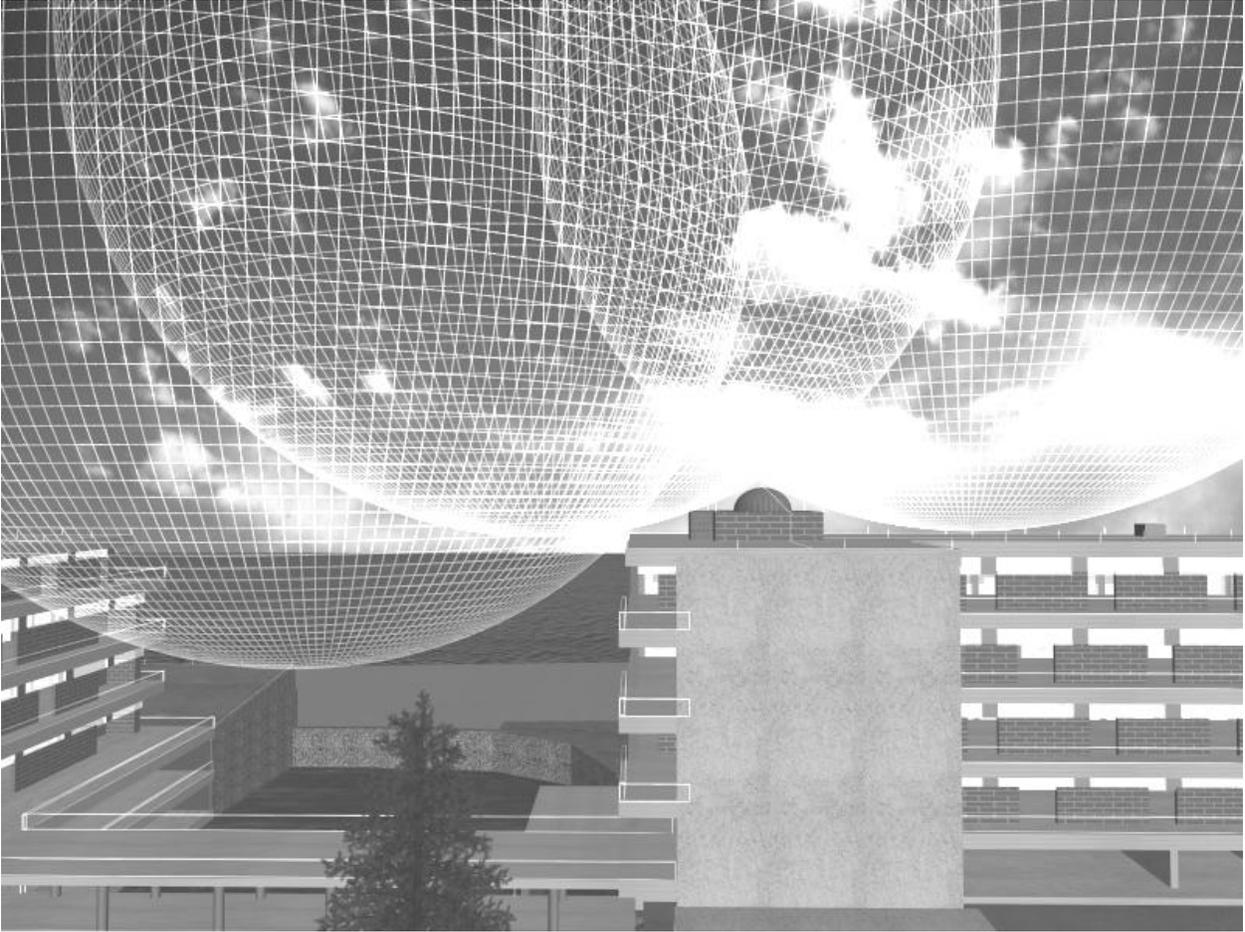


FIGURA 5.8. Rodamiento de la esfera por la azotea de los edificios de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Edificio 1

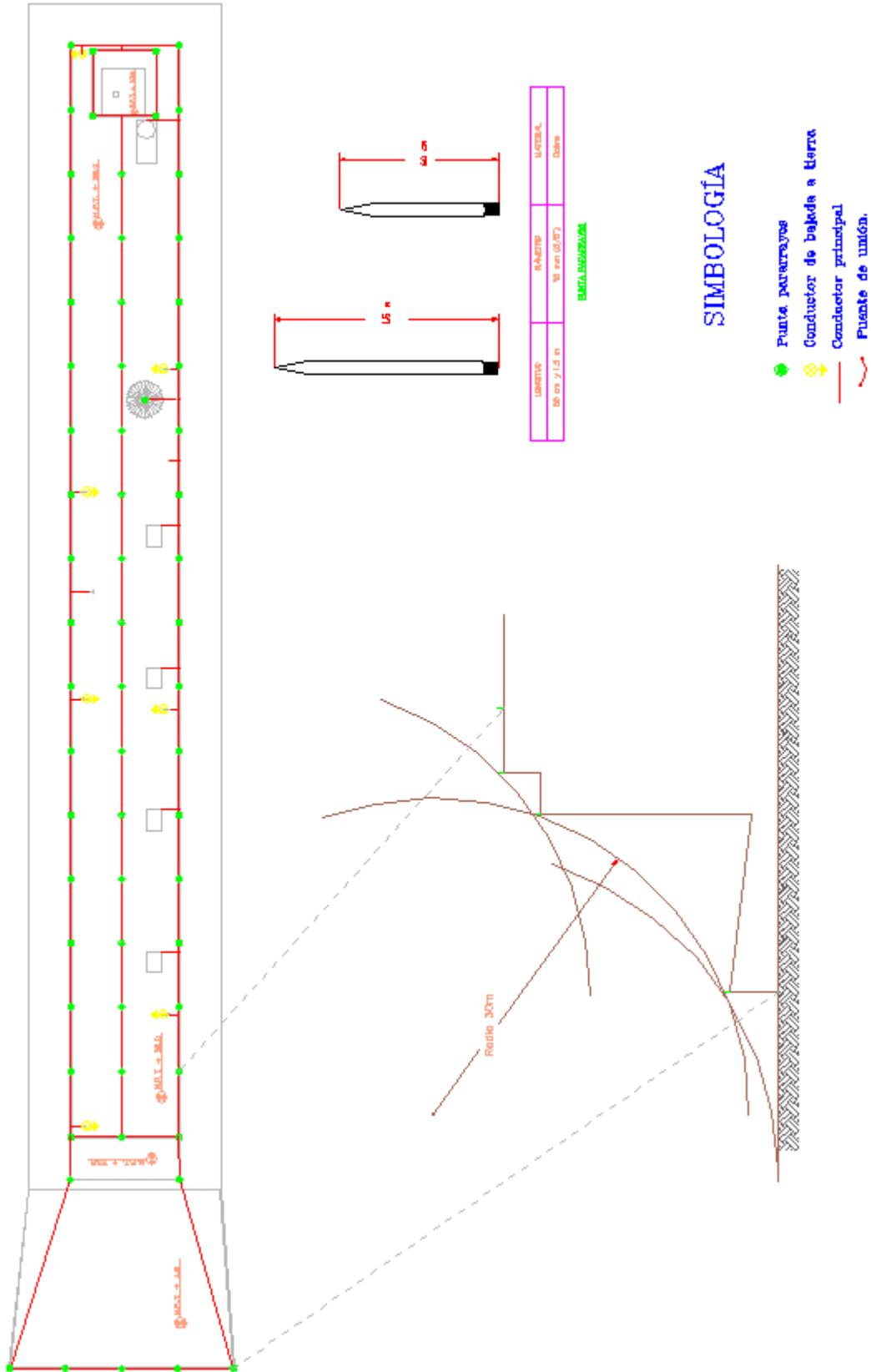


FIGURA 5.9. Propuesta de instalación de terminales aéreas y conductores de bajada para el sistema de protección contra descargas atmosféricas del Edificio 1 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

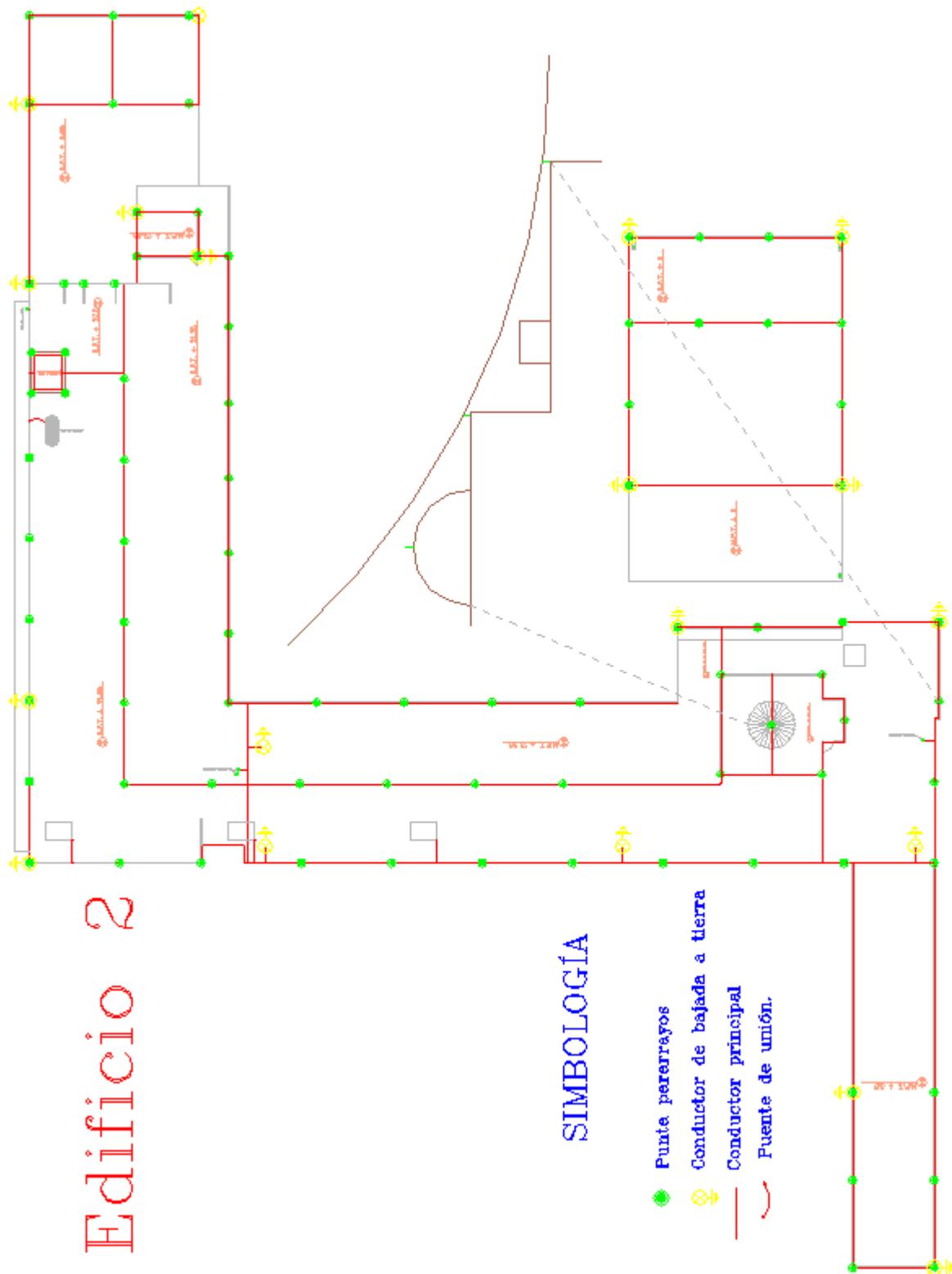


FIGURA 5.10. Propuesta de instalación de terminales aéreas y conductores de bajada para el sistema de protección contra descargas atmosféricas del Edificio 2 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

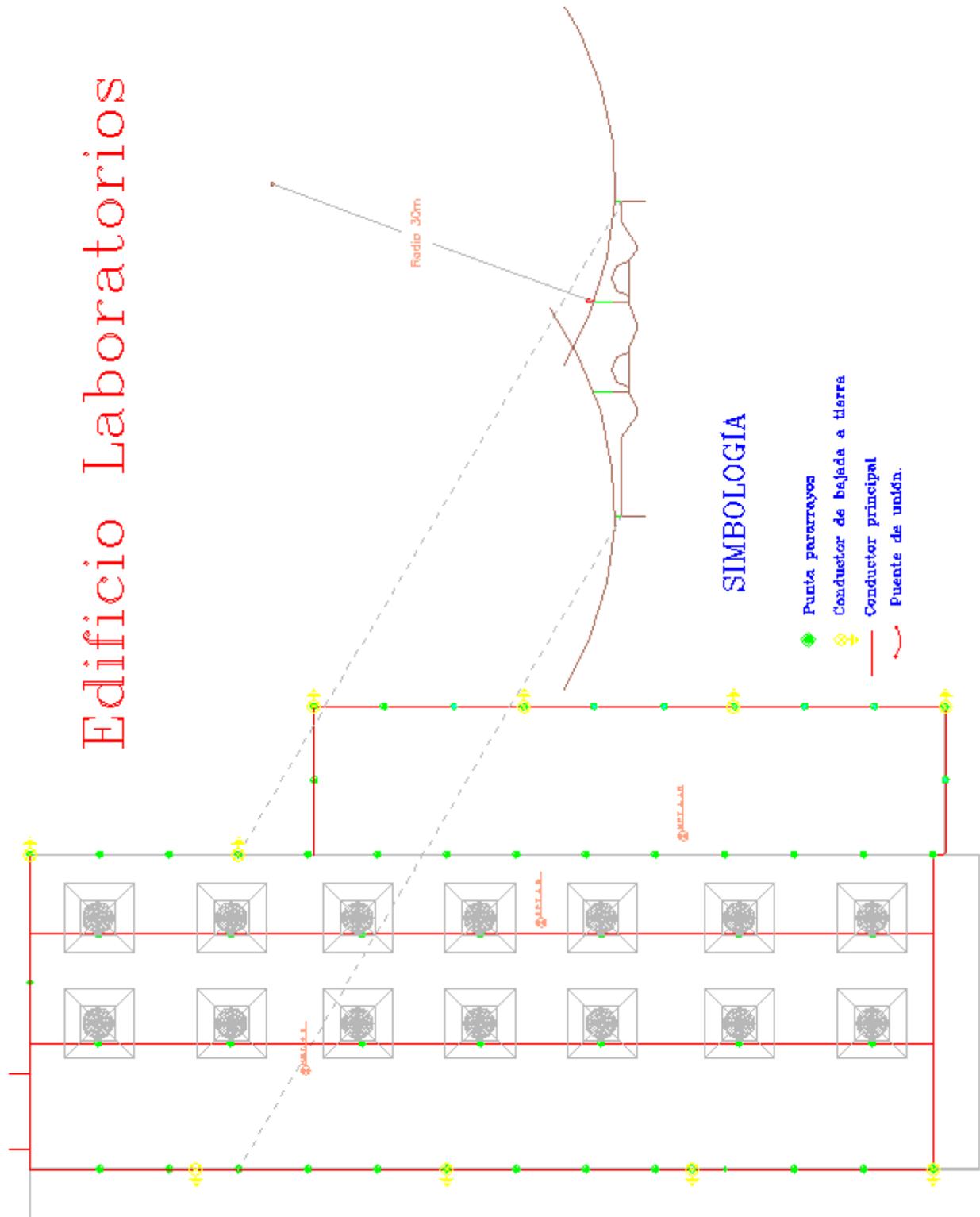


FIGURA 5.11. Propuesta de instalación de terminales aéreas y conductores de bajada para el sistema de protección contra descargas atmosféricas del Edificio de Laboratorios en la Facultad de Ingeniería de la UNAM

CONCLUSIONES

El rayo sigue siendo un fenómeno natural sumamente complejo y el conocimiento de sus parámetros eléctricos siguen obteniéndose de forma paulatina, la información que se tiene aún es incompleta. Lo único que sí se sabe acerca del rayo, es que es un fenómeno variable, aleatorio y destructivo, por lo que es recomendable tomar todas las medidas de seguridad necesarias para asegurar la integridad de las instalaciones y estructuras, así como de su contenido; las nuevas tecnologías de protección del rayo se convierten en una necesidad evidente ante esta situación.

Durante muchos años, los criterios de protección mediante el uso de terminales aéreas utilizadas en el sistema convencional, han sido mejorados a través de estudios de campo y laboratorio para determinar la cobertura efectiva de protección, modificando los ángulos en el caso del método del cono y relacionando los parámetros del rayo para la determinación de los radios de cobertura como es el caso del método de la esfera rodante. La aplicación de estos criterios reducen sustancialmente los riesgos de daño tanto en instalaciones industriales, comerciales y residenciales, como en el sector eléctrico, cuyas características de trazo y ubicación de las líneas de transmisión y distribución de energía los hace vulnerables a la incidencia de rayos.

En los últimos años, la aplicación de nuevas tecnologías ha permitido nuevamente revivir el tema de protección contra descargas atmosféricas, proporcionando un nuevo auge y replanteando la importancia de un sistema de protección para el fenómeno, creando conciencia en su instalación.

La necesidad de un sistema de protección contra corrientes de rayo y sobretensiones se verá incrementada en virtud de la mayor sensibilidad frente a perturbaciones de equipos eléctricos y electrónicos. Este nuevo y complejo reto ofrece al ingeniero la oportunidad de especializarse en este campo y dar un paso adelante. La industria eléctrica debe cumplir las condiciones previas, para ofrecer al mercado los productos adecuados que permita a los ingenieros poner en práctica las medidas para la protección contra descargas de rayo y sobretensiones.

Como se pudo observar, los procedimientos para hacer eficaz y correcta una instalación de pararrayos no son numerosos ni difíciles de ejecutar. Pero hemos de hacer resaltar inmediatamente la circunstancia de que una instalación de pararrayos mal hecha o defectuosa no sólo resulta perfectamente inútil, sino que además constituye un peligro serio para las personas y los bienes.

Disponer de un sistema de protección contra rayos no garantiza la protección absoluta de personas, estructuras u objetos; pero la aplicación de normas reduce de forma significativa el riesgo de los daños producidos. La norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2006 "sistema de protección contra tormentas eléctricas - especificaciones, materiales y métodos de medición", tiene como objetivo emitir las especificaciones, basadas en el método de la esfera rodante, para la ubicación e instalación de los elementos del sistema externo de protección, así como las acciones o recomendaciones para el establecimiento del sistema interno de protección.

Existen en la actualidad instalaciones de protección contra descargas atmosféricas que no están correctamente realizadas o con errores de diseño, lo cual pone en alto riesgo el espacio que se pretende proteger y la integridad de las personas; la falta de información técnica para realizar estas instalaciones, hace que este trabajo resulte una guía práctica tanto para conocimiento del fenómeno, sus características, consecuencias y, de referencia para una correcta instalación externa cumpliendo con la normatividad mexicana.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

APÉNDICE A

Mapa del promedio anual de densidad de rayos a tierra por Estado de la Republica Mexicana.

Este apéndice muestra las isodensidad para evaluar la densidad de rayos a tierra (DRT) en cada Estado de la República Mexicana, excepto la península de Baja California. El mapa de isodensidad por Estado fue elaborado con base en los resultados de un proyecto conjunto entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad, en el periodo comprendido entre 1983 y 1993, por lo que las isodensidad representan el promedio anual de dicho periodo. Las unidades de la DRT son [rayos / (km^2 * año)].

El valor de cada isodensidad es de 0.25 y debe tomarse el nivel superior de la isodensidad que corresponda a la ubicación de la instalación a proteger.

El valor de DRT que debe tomarse para la península de Baja California es de 2 [rayos / (km^2 * año)].

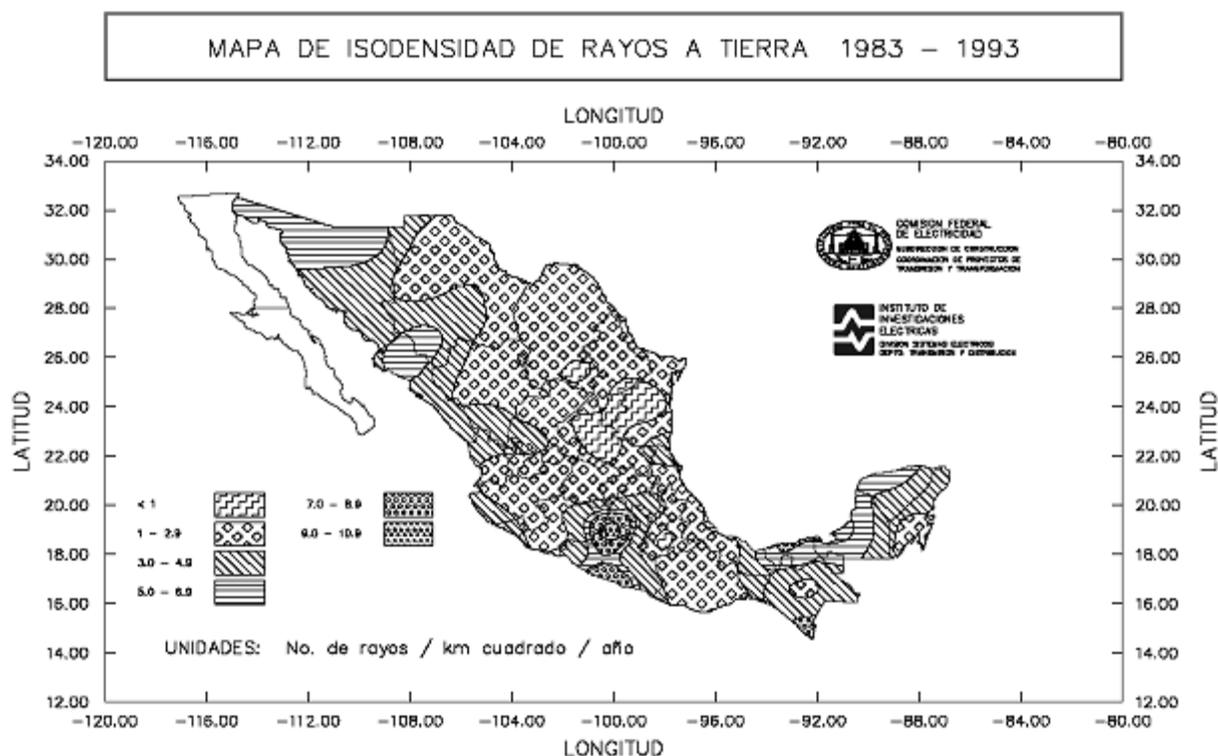


Figura A.1. Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

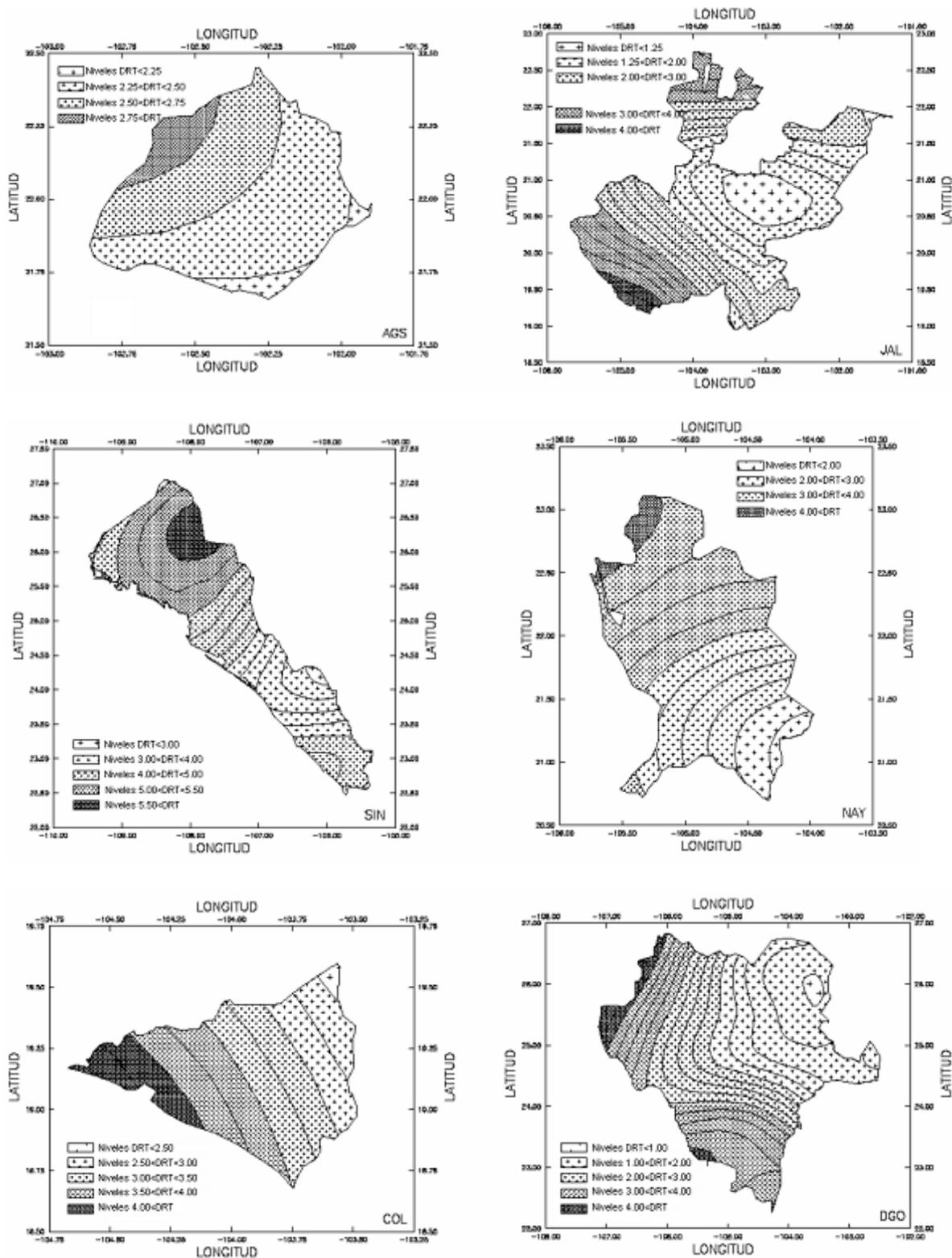


Figura A.1 (a). Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados (continua).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

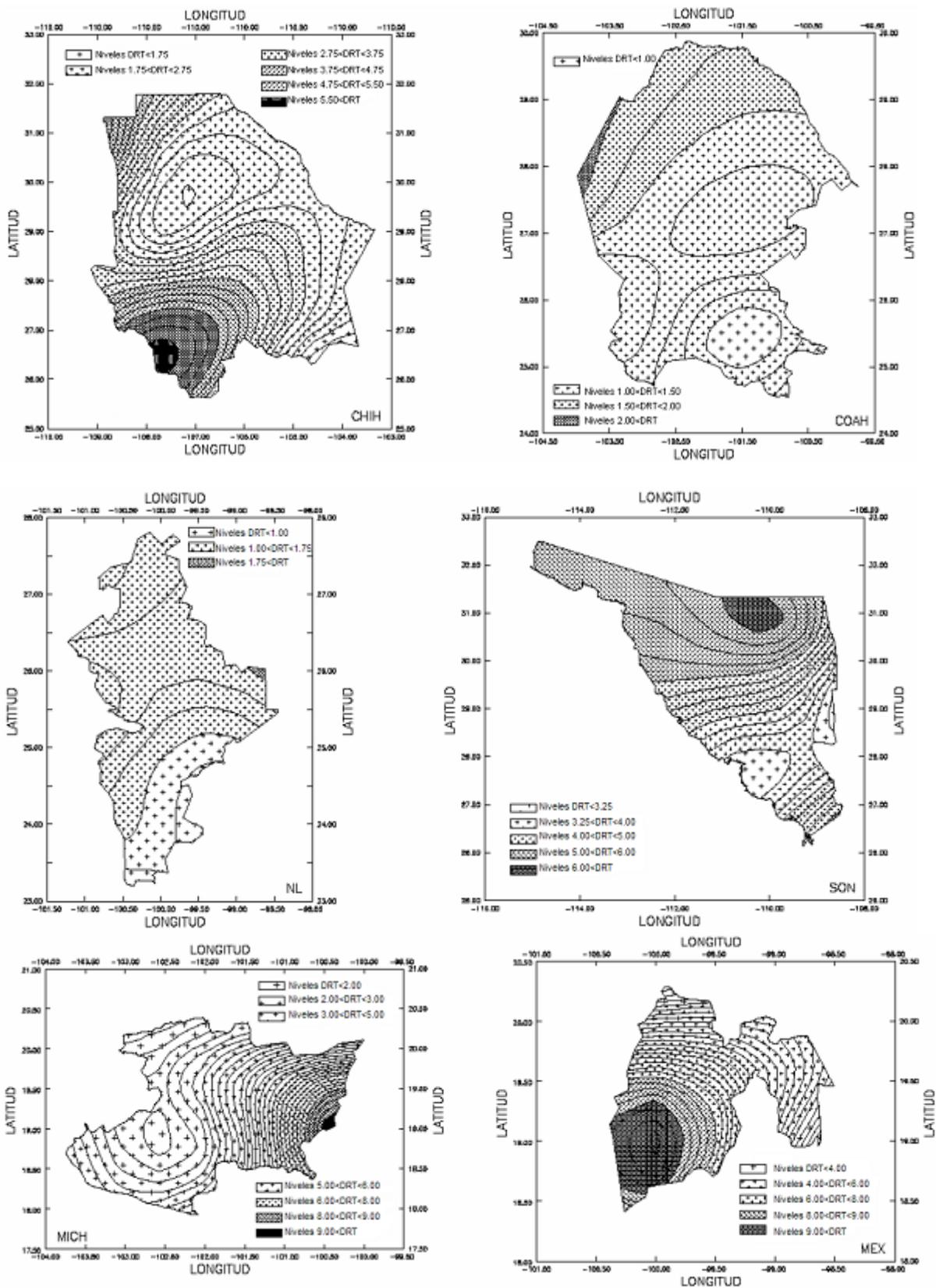


Figura A.1 (b). Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados (continua).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

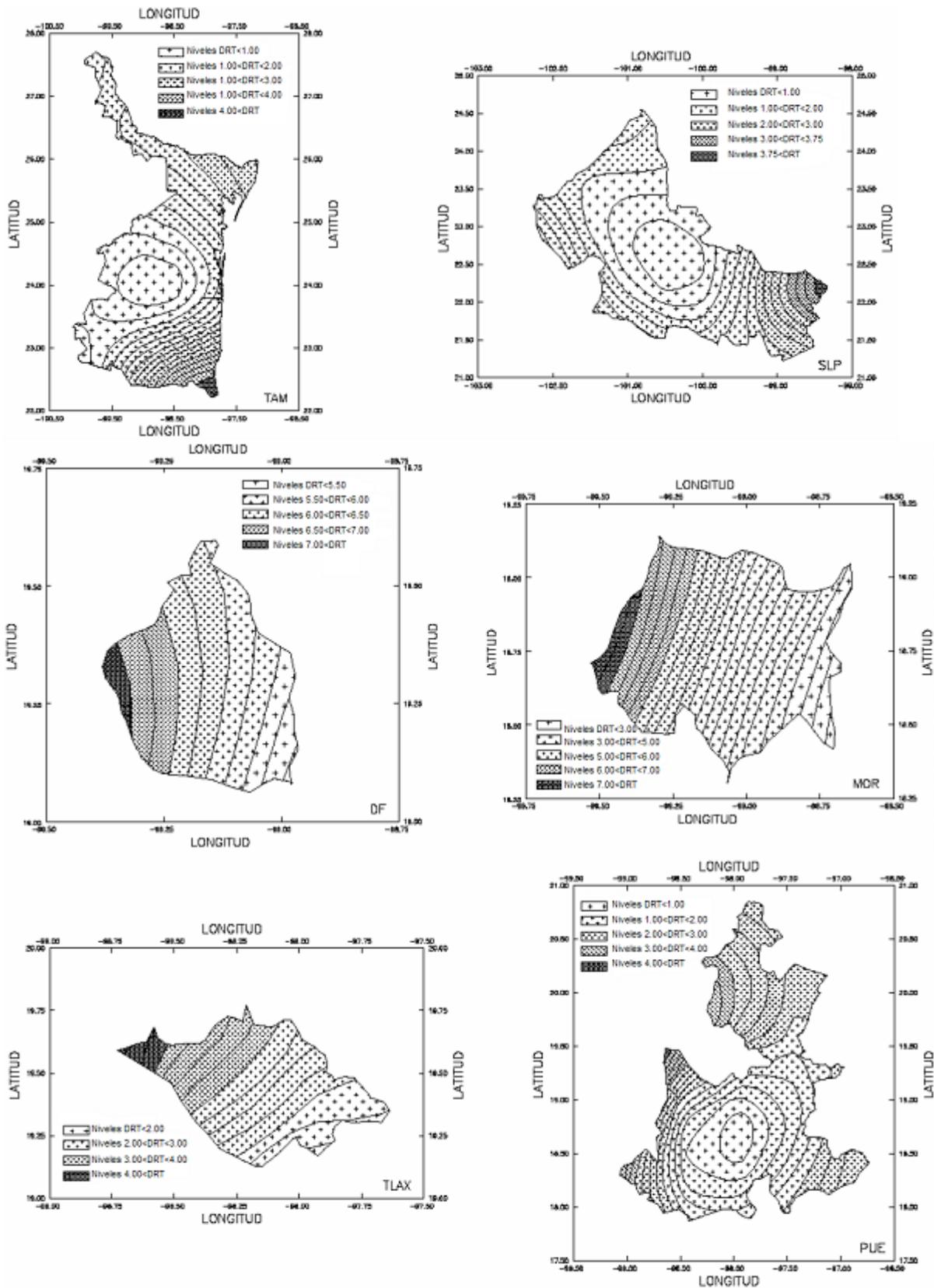


Figura A.1 (c). Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados (continua).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

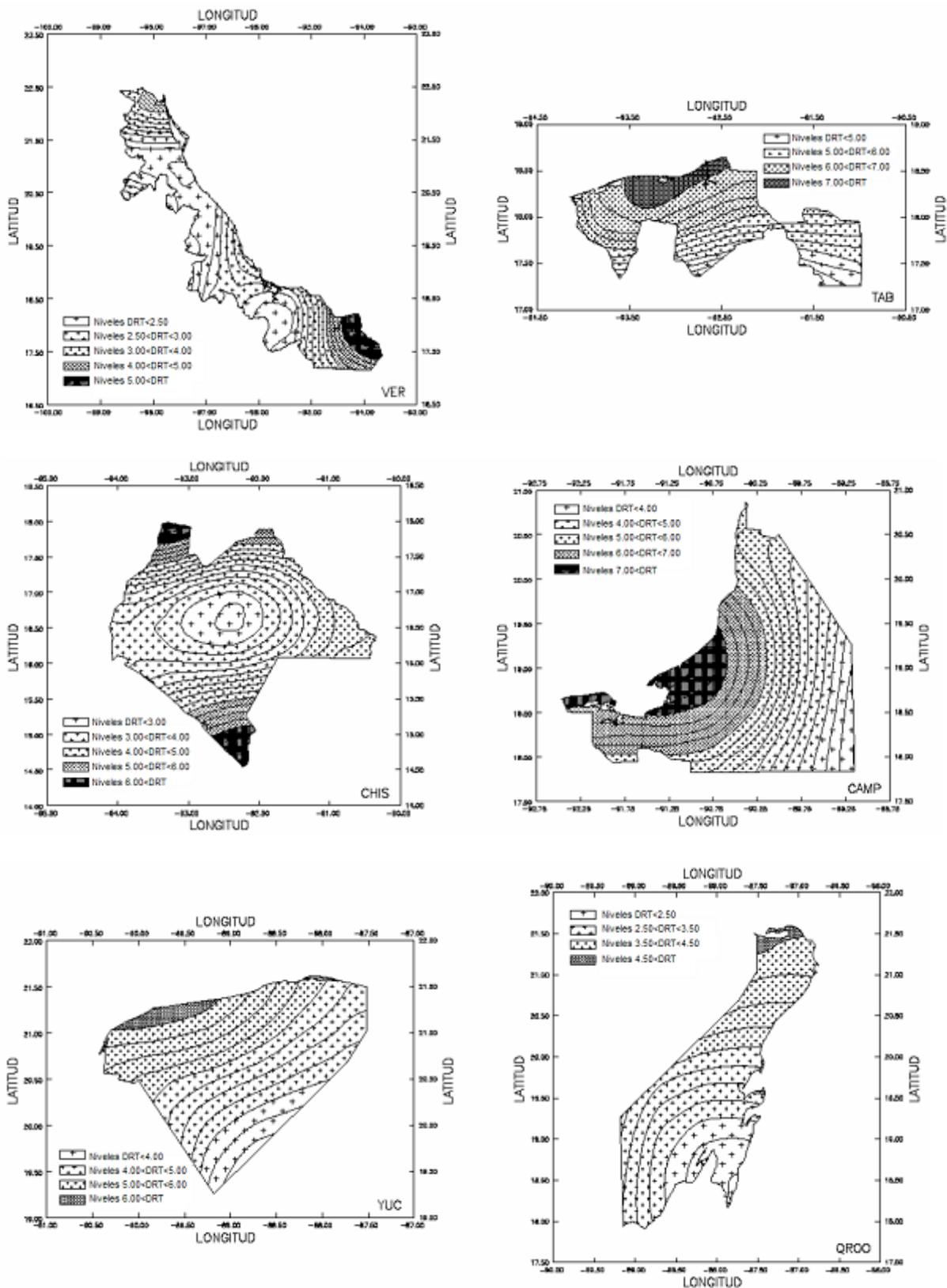


Figura A.1 (d). Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados (continua).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

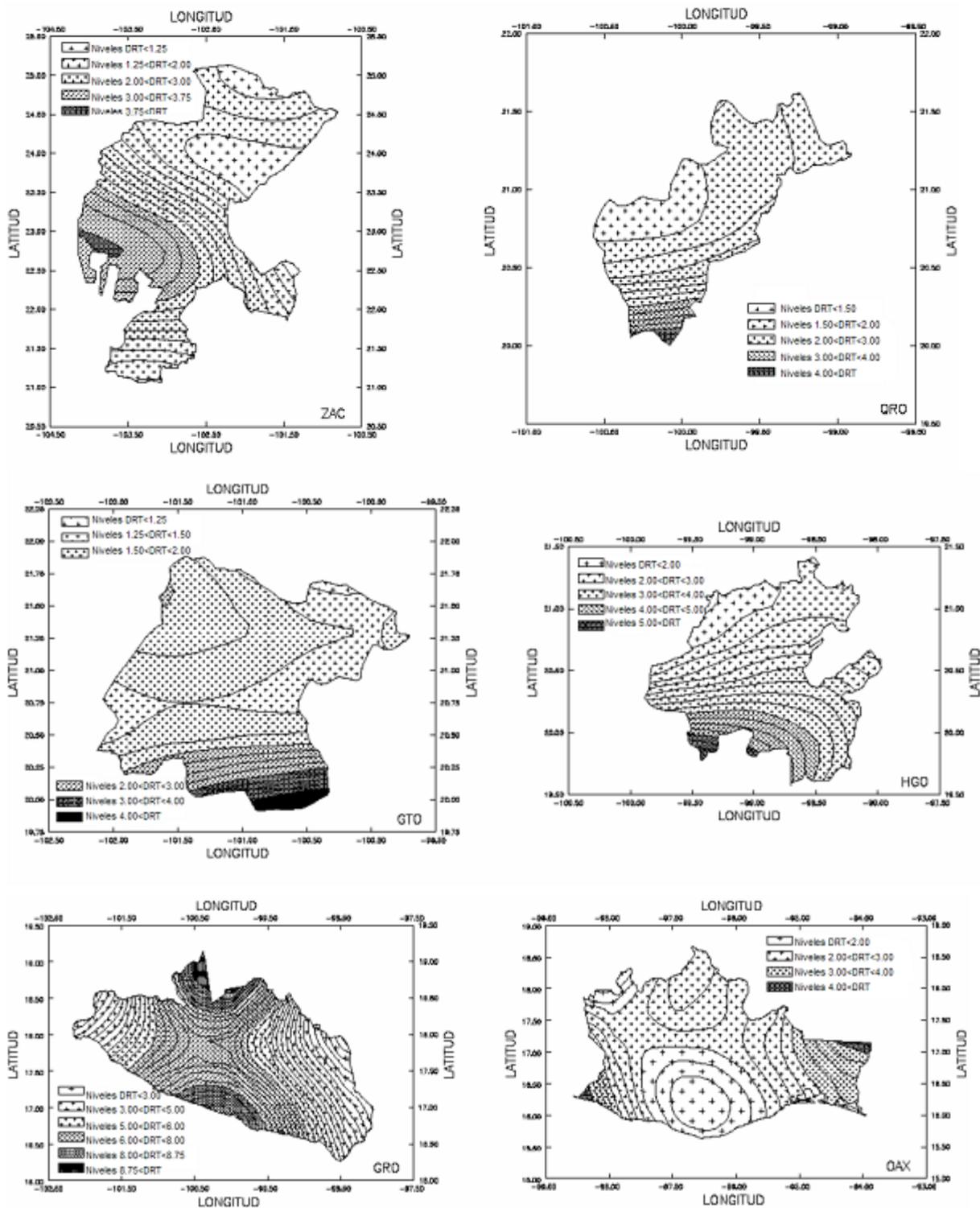


Figura A.1 (e). Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados (concluye).

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

APÉNDICE B

Tabla sobre resistencia a la corrosión de algunos metales y aleaciones comunes.

Clase de material	Corrosión Seca		Corrosión electroquímica a temperatura por debajo de 50 °C									
	Temperatura máxima compatible con buen servicio °C		Ácidos de moderada concentración					Álcalis de moderada concentración	Atmósfera		Agua	
			Gases oxid.	Gases reduc.	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃		H ₃ PO ₄	Ácido acético	Orilla del mar	Industrial
Acero bajo en C	540	540	P	P	P	P	P	B	P	P	R	R
Acero galvanizado			P	P	P	P	P	R	B	B	P	P
Fundición gris			P	P	P	P	P	RB	R	RB	B	R
Fundición 14% Si			RB	E	E	B	B	RB	E	E	E	E
Fundición 2,6% Ni			R	R	P	R	RB	E	B	B	B	B
Acero 3% Ni			P	P	P	P	P	BE	RB	RB	R	R
Acero 12% Cr	730	730	P	P	B	R	B	B	B	B	B	PR
Acero 17% Cr	840	840	P	P	E	P	E	B	B	B	B	PB
Aceros al Cr-Ni												
18-8	900	900	P	R	B	B	B	E	E	B	E	RB
18-8,4 % Mo			P	R	B	B	B	B	E	E	E	B
25-20	1,150	1,090	P	R	E	B	B	E	E	B	E	B
Stellite	1,150	1,150	R	R	RB	E	E	E	E	E	E	E
Hastelloy A	760	980	B	B	P	E	E	E	B	B	B	B
Níquel	1,040	1,260	RB	RB	P	RB	RB	E	E	B	E	RE
Metal Monel	540	1,090	RB	B	P	B	RB	E	E	B	E	BE
Nichrome	1,130	1,040	R	R	R	B	B	B	E	B	E	RE
Iconel, 14% Cr	1,090	1,150	R	R	R	B	B	E	E	B	E	RE
80% Ni-20% Cr	1,090	1,150	RB	RB	B	B	B	E	E	B	E	RE
Cobre			PB	RB	P	RB	RB	B	B	B	B	B
Latón rojo			RB	RB	P	RB	RB	B	B	B	RB	B
Bronce fosforoso			P	RB	P	RB	RB	B	B	RB	B	B
Bronce de aluminio			R	RB	P	RB	RB	RB	B	B	B	B
Alpaca			R	B	P	RB	RB	E	B	B	B	BE
Metal de almirantazgo			P	RB	P	RB	RB	RB	B	B	B	RB
Aluminio	425	425	P	R	P	P	B	P	BE	BE	RE	RB
Magnesio		205	P	P	P	R	P	E	B	B	R	P
Cinc			P	P	P	P	P	P	RP	RP	B	B
Estaño			P	P	P	P	P	R	B	B	R	B
Plomo			R	E	P	E	P	RB	B	B	PB	B
Titanio			RB	PB	E	BE	E	E	E	E	E	E

NOTAS -
 1.- E - Excelente B - Bueno R - Moderado P - Pobre
 2.- Las uniones cobre / aluminio, deben realizarse mediante una conexión bi-metálica.
 3.- La variedad de mecanismos de corrosión y de circunstancias experimentales pueden motivar que en determinados casos se obtengan comportamientos inferiores a los indicados.

Tabla B.1. Resistencia a la corrosión de algunos metales y aleaciones comunes.

APÉNDICE C

Método de la esfera rodante.

Basado en la física del rayo, el punto de incidencia del rayo sobre la tierra o sobre alguna estructura es aquel que haya lanzado el líder ascendente que finalmente haga conexión con el líder escalonado descendente.

La principal hipótesis de este método de protección es que la cantidad de carga espacial contenida en el líder escalonado descendente, la cual precede a la descarga eléctrica, está íntimamente relacionada con la amplitud de la corriente del rayo, por lo que el último paso de la descarga depende del valor pico de la corriente del rayo.

Debido a que el líder escalonado descendente puede aproximarse desde cualquier dirección hacia el objeto a ser golpeado, el ángulo de aproximación puede simularse por medio de una esfera imaginaria alrededor y sobre el objeto a ser golpeado, *figura C.1*. Si la esfera toca el volumen a protegerse, entonces dicho volumen necesita protección. En caso contrario, el volumen estará protegido. El radio de la esfera rodante debe ser equivalente a la longitud del último paso de la descarga para un valor pico de corriente del rayo.

Utilizando la relación entre el último paso de la descarga y el valor pico de la corriente de rayo, se ha encontrado una expresión analítica con la cual es posible evaluar la longitud del último paso de la descarga:

$$r_s = k_s \cdot I^C \quad (\text{C-1})$$

En donde:

r_s es la distancia o longitud en metros (m) del último paso de la descarga,

k_s y C son factores obtenidos a través de estudios de campo del gradiente de potencial de grandes arcos eléctricos generados en laboratorio,

I es el valor pico de la corriente del rayo de retorno en kiloamperes (kA).

Existen diferentes valores para las constantes k_s y c reportados en la literatura especializada, pero el resultado es aproximadamente el mismo. Por lo tanto, utilizando una expresión como la indicada en la ecuación (C-2), es posible determinar la distancia del último paso de la descarga en función del valor pico de la corriente del rayo.

$$r_s = 9.4 \cdot I^{2/3}, \text{ para } I < 30 \text{ kA} \quad (\text{C-2})$$

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

La ecuación (C-2) indica que la longitud del último paso de la descarga involucrado en el proceso de conexión entre el líder escalonado descendente y el líder ascendente será mayor a mayores valores pico de la corriente de rayo. Por lo tanto, la corriente de rayo representa el parámetro más importante en la definición de la protección contra tormentas eléctricas.

Si el líder escalonado descendente se aproxima a la terminal aérea A por la derecha, ya sea la terminal aérea A o la tierra puede ser golpeada por el rayo si la longitud del último paso de la descarga r_s es equidistante a ambos puntos a partir del punto P_1 , como se observa en la figura C.1. Si el punto P_1 está más cerca de la terminal aérea A, entonces el rayo golpeará dicha terminal. Por lo que cualquier estructura que se encuentre a la derecha de la terminal aérea A, a una distancia mayor que r_s o a una altura sobre el segmento de arco proyectado por el radio r_s a partir del punto P_1 será golpeado por el rayo.

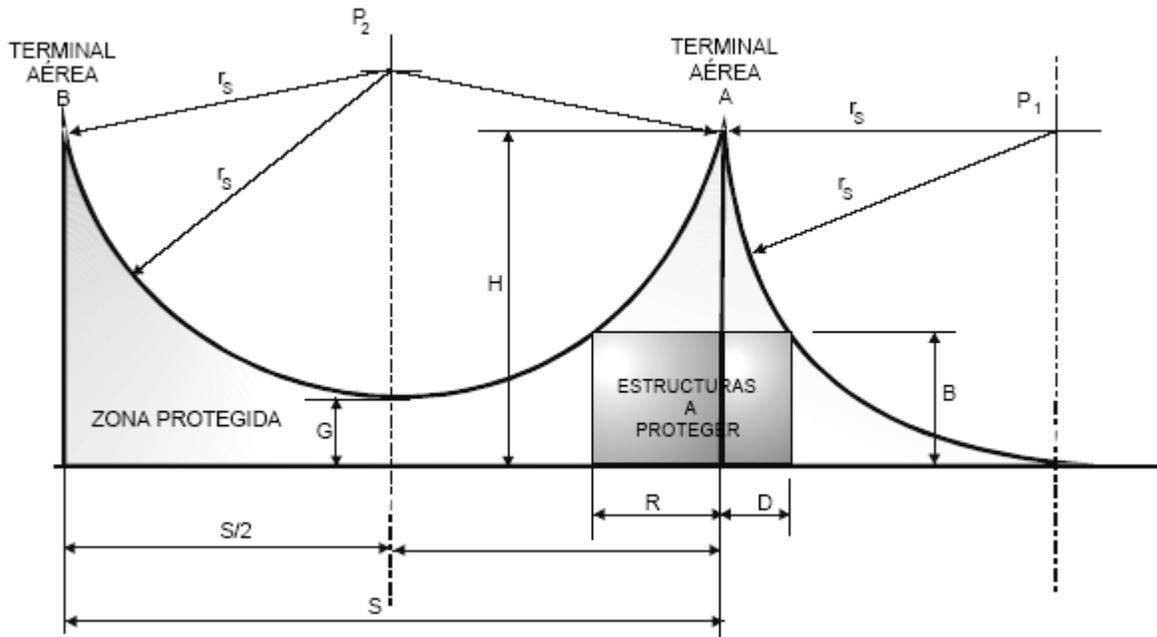


Figura C.1. Zona de protección del método de la esfera rodante.

Considérese ahora el caso cuando el líder escalonado descendente se aproxima a la estructura entre las terminales aéreas A y B. Cuando el líder escalonado descendente se aproxima al punto P_2 , la zona protegida está definida por el arco de círculo de radio r_s , pasando a través de las puntas de las terminales aéreas A y B.

Si una estructura está localizada entre las dos terminales aéreas, la altura G (ecuación C-5) debe ser mayor que la altura de la estructura para ofrecer una protección adecuada. Un valor

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

negativo de la altura G indicaría una zona no protegida entre las dos terminales aéreas. Las ecuaciones con las cuales puede realizarse la evaluación de la protección son las siguientes:

Cuando $H < r_s$

$$D = H \sqrt{\frac{2r_s}{H} - 1} - B \sqrt{\frac{2r_s}{B} - 1} \quad (\text{C-3})$$

$$R = (H - G) \sqrt{\frac{2r_s}{(H - G)} - 1} - (B - G) \sqrt{\frac{2r_s}{(B - G)} - 1} \quad (\text{C-4})$$

Cuando $S < 2r_s$

$$G = H - r_s + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad (\text{C-5})$$

Cuando $H > r_s$

$$D = r_s - B \sqrt{\frac{2r_s}{B} - 1} \quad (\text{C-6})$$

La altura de la terminal aérea puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$H = r_s \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left[\frac{D}{r_s} + \sqrt{\frac{B}{r_s} \left(2 - \frac{B}{r_s} \right)} \right]^2} \right\} \quad (\text{C-7})$$

En donde:

B es la altura del elemento a proteger.

H es la altura de la terminal aérea de protección.

D es la distancia horizontal máxima de protección bajo el arco proyectado por el radio r_s debido a una terminal aérea.

R es la distancia horizontal máxima de protección proyectado por el radio r_s entre dos terminales aéreas de protección.

S representa la distancia de separación entre las terminales aéreas.

r_s representa la distancia del último paso de la descarga o el radio de la esfera rodante.

G es la altura mínima a la cual una estructura se encuentra protegida.

P₁ y **P₂** son los últimos puntos en los cuales el líder escalonado descendente viaja hacia la tierra o hacia la estructura y se produce el punto de conexión entre el líder descendente y el líder ascendente.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Por su característica volumétrica, el método de la esfera rodante puede aplicarse sin restricciones sobre cualquier estructura o sobre terminales aéreas utilizadas en la protección contra tormentas eléctricas.

El diseñador debe verificar la correcta aplicación del método al “rodar” la esfera imaginaria correspondiente al nivel de protección deseado sobre tierra, alrededor y por encima de la instalación a protegerse o cualquier otro objeto en contacto con la tierra capaz de actuar como un punto conductor de la corriente de rayo, teniendo especial cuidado de que la esfera imaginaria no toque los elementos a protegerse, como se indica en la *figura C.2*.

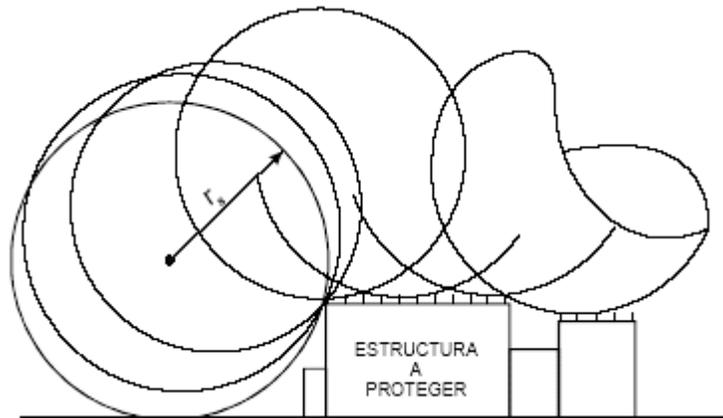


Figura C.2. Rodamiento de la esfera rodante imaginaria para definir la posición de las terminales aéreas de intercepción. La posición y altura de las terminales aéreas en el dibujo es indicativo, con el objeto de ilustrar que la esfera rodante no toque la estructura a proteger.

El radio de la esfera rodante se indica en la tabla 4.10 de la sección 4.2.3, de acuerdo a los niveles de protección, en la cual se muestra la corriente de rayo aproximada que corresponde al radio de la esfera rodante, estimada con la ecuación (C-2).

Los valores indicados en la tabla 4.10 muestran que, si se considera un valor de diseño de 20m (nivel I) para el radio de la esfera rodante, la instalación estará protegida para corrientes de rayo mayores o iguales a 3 kA; las corrientes de rayo menores tienen una elevada probabilidad de penetrar el sistema de protección. Si se considera un valor de diseño de 30m (nivel II) para el radio de la esfera rodante, la instalación estará protegida para corrientes mayores o iguales a 6 kA; las corrientes de rayo menores tienen una elevada probabilidad de penetrar el sistema de protección. Y así sucesivamente para los demás valores de diseño para el radio de la esfera rodante (niveles III y IV). De acuerdo a la clasificación de los niveles, cuanto menor sea el nivel, mayor será la protección, ya que considera corrientes menores en la efectividad del blindaje que ofrecen las terminales aéreas.

APÉNDICE D

Medición de la resistividad del suelo.

A continuación se describe el método de los cuatro electrodos (dos de corriente y dos de potencial) o también conocido con el nombre de método de Wenner, el cual ha demostrado ser simple y efectivo en la medición de la resistividad del suelo, ya que no necesita de electrodos auxiliares profundos.

El procedimiento de medición utiliza cuatro electrodos de prueba auxiliares en línea recta y a una distancia uniforme entre ellos. Como lo muestra la *figura D.1*. Una fuente de corriente, conectada entre los electrodos auxiliares externos, suministra una corriente a tierra. El flujo de esta corriente en la tierra produce una variación de potencial en el suelo, generando una diferencia de potencial entre los electrodos internos. La relación entre la diferencia de potencial (V) y la corriente de prueba (I) corresponde a la resistencia del suelo, la cual es utilizada para determinar la resistividad aparente de forma directa.

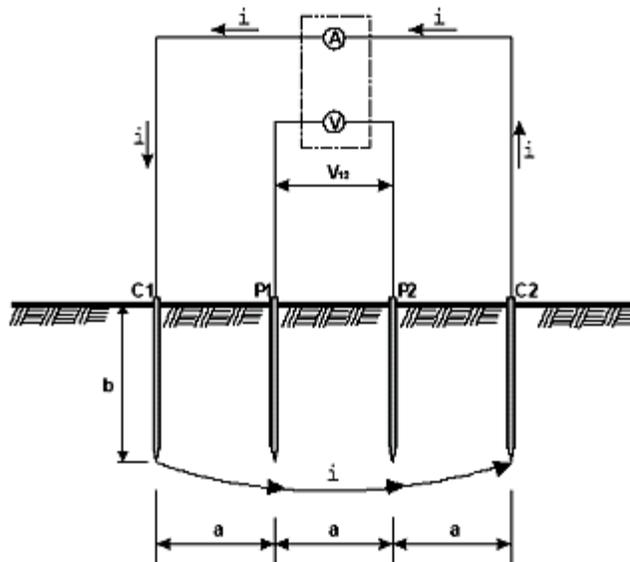


Figura D.1. Método de los cuatro electrodos o método de Wenner.

Procedimiento de Medición

Debe seleccionarse un eje de referencia sobre el suelo para efectuar las mediciones. Posteriormente, debe colarse en línea recta los electrodos como se muestra en la *figura D.1*. Se suministra una corriente de prueba a tierra a través de los dos electrodos externos, de acuerdo con lo indicado por el fabricante del equipo de medición.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Finalmente, se registra el valor de resistencia R obtenido en el equipo de medición. Se recomienda repetir el procedimiento antes descrito para diferentes distancias “a” entre los electrodos auxiliares.

Para este método de medición, la resistividad aparente del suelo esta determinada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (D-1)$$

En donde:

- a es la distancia entre electrodos auxiliares, en metros
- b es la profundidad de los electrodos auxiliares, en metros
- R es la resistencia obtenida en la medición, en Ω
- ρ es la resistividad aparente del suelo, en $\Omega \cdot m$
- n es el factor resultante de aplicar los valores en el denominador.
- V es la diferencia de potencial entre electrodos auxiliares internos, en Volts
- I es la corriente de prueba entre electrodos auxiliares externos, en Ampers

El valor máximo recomendado para la profundidad de los electrodos de prueba auxiliares es del 10% de la distancia entre electrodos auxiliares “a”. Para condiciones prácticas en las que se mantiene la desigualdad $b < a/20$ (la distancia entre electrodos auxiliares es mucho mayor que la profundidad de enterramiento), la ecuación (D-1) se simplifica a:

$$\rho = 2\pi a R \quad (D-2)$$

Cuando los equipos proporcionen directamente el valor de la resistividad aparente, las ecuaciones anteriores no se aplican.

Las distancias entre electrodos pueden ser arbitrarias, pero siempre iguales entre electrodos. Se recomienda que al inicio de las mediciones la distancia mínima de separación entre éstos sea de 1m con un mínimo de 6 mediciones.

Debido a que en las mediciones de resistividad se involucra el volumen del suelo, es necesario que se realice el mayor número de direcciones de medición posibles en el lugar de medición, con el fin de obtener un perfil representativo del suelo. Se propone la *tabla D.1* para registrar las mediciones.

Numero de medición	Distancia de Separación m	Dirección 1 Ωm	Dirección 2 Ωm	Dirección 3 Ωm	Dirección n Ωm	Promedio Ωm
1	1	ρ_{11}	ρ_{21}	ρ_{31}	ρ_{n1}	ρ_1
2	2	ρ_{12}	ρ_{22}	ρ_{32}	ρ_{n2}	ρ_2
3	3	ρ_{13}	ρ_{23}	ρ_{33}	ρ_{n3}	ρ_3
4	4	ρ_{14}	ρ_{24}	ρ_{34}	ρ_{n4}	ρ_4
5	6	ρ_{15}	ρ_{25}	ρ_{35}	ρ_{n5}	ρ_5
6	8	ρ_{16}	ρ_{26}	ρ_{36}	ρ_{n6}	ρ_6

Tabla D.1. Registro típico de mediciones de resistividad.

Interpretación de los resultados.

El objetivo de medir la resistividad es poder representar al suelo mediante un modelo práctico, con el fin de estimar el comportamiento de la red de puesta a tierra. Los modelos más comunes utilizados en la representación del suelo son: suelo uniforme y suelo heterogéneo o de dos capas.

El análisis para la correcta interpretación de resultados puede realizarse mediante dos mecanismos: manual y por medio de programas computacionales. Los programas computacionales representan el medio más eficaz y preciso para obtener una representación del suelo, siendo el mecanismo de análisis recomendado en primera instancia. El análisis manual es sencillo en su aplicación y representa una herramienta que todo diseñador puede utilizar debido a su simplicidad. Los resultados del análisis manual, principalmente para un suelo heterogéneo, deben tomarse sólo como un indicador del suelo, más no como un modelo preciso.

La *tabla D.1* muestra la forma de registrar los valores medidos en el campo. La primera columna indica el número de medición en cada dirección, la segunda columna indica la separación en metros entre los electrodos auxiliares en cada medición, la columna 3 indica los valores obtenidos en las mediciones para la dirección 1, la columna 4 indica los valores obtenidos en las mediciones para la dirección 2 y así sucesivamente hasta la dirección n. La última columna representa el valor de la resistividad del espaciamiento correspondiente entre los electrodos calculada como el promedio de la n direcciones. Con el fin de determinar la tendencia de la resistividad del suelo, deben graficarse los valores promedio obtenidos en la *tabla D.1*. En la *figura D.2* se muestran las curvas típicas de la resistividad aparente promedio del suelo.

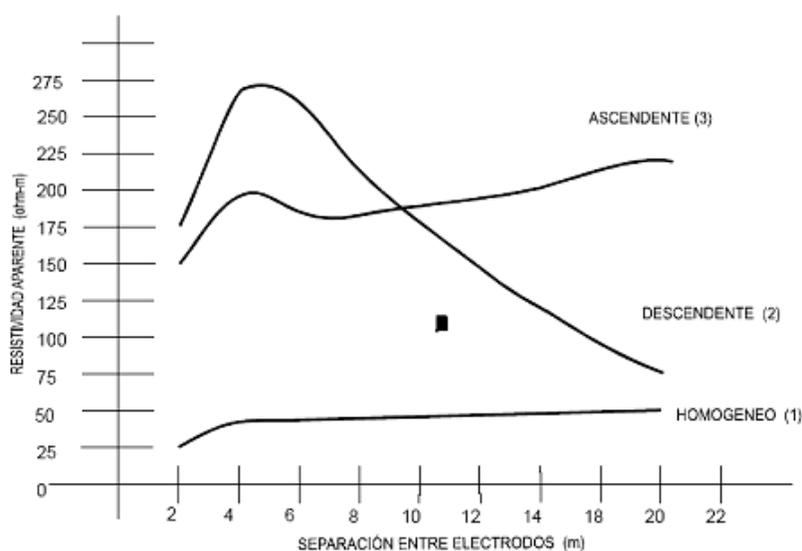


Figura D.2. Curvas típicas de la resistividad aparente del suelo.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Suelo uniforme

Una curva de resistividad aparente del suelo se considera homogénea o uniforme, cuando las variaciones entre mediciones promedio se encuentran dentro de una banda del 10%, tal y como se muestra en la curva (1) de la *figura D.2*. El modelo homogéneo se utiliza cuando es posible definir a través de un valor medio único las variaciones de resistividad con la separación entre electrodos.

El valor único de la resistividad aparente homogénea ρ_{hm} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{hm} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6 + \dots + \rho_n}{n} \quad (\text{D-3})$$

En donde:

n es el número de mediciones en cada dirección realizadas en campo
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ son las resistividades promedio calculadas en cada medición.

Suelo heterogéneo de dos capas

El modelo heterogéneo de dos capas generalmente se obtiene mediante la aplicación de programas computacionales. Este modelo, indicado en la *figura D.2*, representa al suelo por medio de una capa de resistividad superior cuyos límites están indicados por el nivel de suelo y la profundidad, y una capa de resistividad inferior que se proyecta hasta el infinito a partir de la profundidad de la capa superior.

Una curva de resistividad aparente del suelo se considera heterogénea, cuando existe una tendencia ascendente o descendente, como se muestra en las curvas (2) y (3) de la *figura D.2*. Si no es posible obtener un modelo de dos capas para el suelo, puede obtenerse un valor indicativo de la resistividad aparente ρ del suelo, conocido como resistividad uniforme equivalente, mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2} \quad (\text{D-4})$$

En donde:

ρ_{\max} y ρ_{\min} representan el valor máximo y el valor mínimo, respectivamente, de la resistividad aparente promedio obtenidos en la última columna de la *tabla D.1*.

Informe de resultados

Por último, los resultados obtenidos en las mediciones deben representarse en un informe que contenga la información del equipo utilizado, arreglo de los electrodos en la medición, valores obtenidos en la medición contenida en tabla, gráfica de los valores de resistividad contra distancia de separación de electrodos, valor estimado de la resistividad representativa del suelo y las observaciones respectivas.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

APÉNDICE E

Cálculo simplificado y método de medición para la resistencia a tierra.

El cálculo de la resistencia a tierra involucra la aplicación de leyes electromagnéticas para la determinación de gradientes de potencial, potenciales y densidad de corriente de los conductores enterrados que forman la red de puesta a tierra. Actualmente, el tratamiento electromagnético para evaluar el comportamiento de las redes de puesta a tierra se realiza mediante el uso de métodos numéricos. Sin embargo, es posible determinar la resistencia a tierra del sistema mediante formulas simplificadas que, si bien no proporcionan un método exacto, constituyen una forma aproximada de anticipar los resultados esperados en las mediciones de campo.

Los pasos que deben seguirse para evaluar la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra desde el cálculo analítico hasta las mediciones en campo son los siguientes:

- a) Obtener las características eléctricas del suelo, mediante mediciones de resistividad, aplicando el criterio del apéndice D.
- b) Obtener la tendencia (ascendente o descendente) de la resistividad del suelo.
- c) Obtener el modelo de dos capas del suelo, o la resistividad uniforme equivalente, aplicando el criterio del Apéndice D.
- d) Aplicar un tratamiento analítico riguroso o formulas simplificadas, para obtener el valor de resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra.
- e) Comparar el resultado obtenido con el valor de referencia de 10Ω , indicado en 4.2.6.
- f) Modificar la red de puesta a tierra, en caso de obtener un valor mayor a 10Ω .
- g) Confirmar el valor calculado de la resistencia a tierra, una vez instalado el sistema de puesta a tierra, mediante mediciones de campo.

La tabla E.1 muestra las formulas simplificadas para arreglos típicos utilizados en un sistema de protección de puesta a tierra, donde:

R resistencia a tierra, en Ω

ρ resistividad uniforme equivalente, en $\Omega \text{ m}$

L longitud total de los electrodos de puesta a tierra horizontales o verticales, en m

A área de la malla, en m^2

h profundidad de los electrodos de puesta a tierra horizontales, en m

d diámetro del electrodo de puesta a tierra, en m

a radio del electrodo de puesta a tierra, en m

L_t longitud total de los electrodos de puesta a tierra horizontales y verticales, en m

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Arreglo	Vista planta	Fórmula
Para un electrodo vertical		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
Para un electrodo horizontal		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{1,85 h d} \right)$
Para dos electrodos horizontales en "ELE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{1,27 h d} \right)$
Para tres electrodos horizontales en "YE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{0,767 h d}$
Para cuatro electrodos horizontales en "CRUZ"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{0,217 h d}$
Para seis electrodos horizontales		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{9,42 h d}$
Para ocho electrodos horizontales		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{2,69 h d}$
Para un anillo cerrado		$R = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right]$

Tabla E.1. Fórmulas para calcular la resistencia a tierra.

Ejemplo de cálculo

A continuación se muestra un ejemplo para la aplicación de la fórmula simplificada para el arreglo en anillo cerrado.

Red en forma de anillo cerrado de 20 m x 30 m, con 6 electrodos de puesta a tierra verticales (varillas) de 3 metros de longitud, ubicadas en cada esquina y en la parte media de las partes más largas, véase *figura E.1*. Las líneas continuas representan el conductor enterrado a 0,6 m de profundidad y las varillas de 3,0 m de profundidad están representadas por círculos negros.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

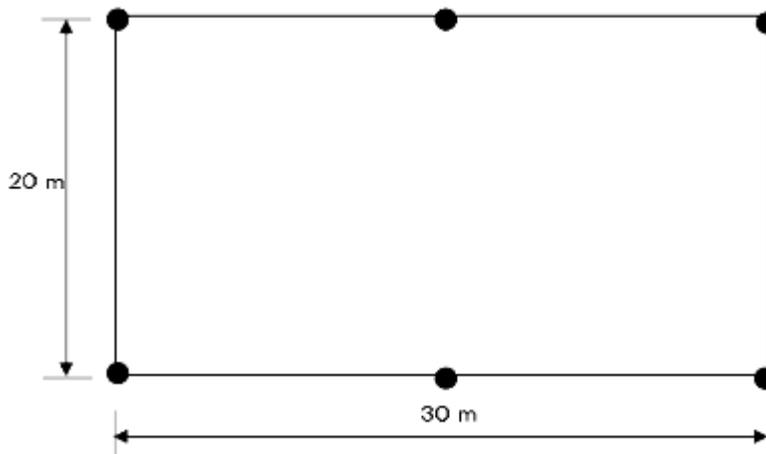


Figura E.1. Red de puesta a tierra para el ejemplo de cálculo comparativo con las fórmulas simplificadas y un tratamiento analítico riguroso.

La fórmula simplificada para este arreglo, indicada en la *tabla E.1*, tiene la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia a tierra} = R = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \Omega \quad (\text{E-1})$$

Por lo tanto, los valores para la fórmula son:

$$L = 30 + 30 + 20 + 20 + (3 \times 6) = 118 \text{ m}$$

$$A = 20 \times 30 = 600 \text{ m}^2$$

$$h = 0,6 \text{ m}$$

ρ = resistividad uniforme equivalente en Ω m de acuerdo al apéndice D.

Suponer que se tienen dos tipos de suelo: uno con tendencia ascendente y otro con tendencia descendente. La *tabla E.2* muestra los valores promedio de las resistividades encontradas en el campo, de acuerdo al criterio indicado en el apéndice D (última columna de *tabla D.1*).

Distancia entre electrodos m	Tendencia ascendente Ω m	Tendencia descendente Ω m
1	85.3	198.9
2	173.2	169.4
3	242.0	105.2
4	293.6	87.3
6	321.7	75.6
8	344.6	70.4

Tabla E.2 Mediciones de resistividad del suelo.

Calculando la resistividad uniforme equivalente, de acuerdo al apéndice D, se tiene:

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Ascendente:

$$\rho = \frac{85.3 + 344.6}{2} = 214.95 \quad \Omega m \quad (\text{E-2})$$

Descendente:

$$\rho = \frac{198.9 + 70.4}{2} = 134.65 \quad \Omega m \quad (\text{E-3})$$

Aplicando los valores obtenidos en las ecuaciones (E-2) y (E-3) en la ecuación (E-1) se obtienen los valores siguientes de resistencia de puesta a tierra:

Para una resistividad con tendencia ascendente $R = 5,6 \Omega$

Para una resistividad con tendencia descendente $R = 3,5 \Omega$

Debe considerarse que el valor de resistencia de puesta a tierra obtenido con una resistividad con tendencia ascendente, generalmente es menor al valor esperado mediante las mediciones de campo y, por el contrario, el valor de la resistencia de puesta a tierra obtenido con una resistividad con tendencia descendente generalmente es mayor al valor esperado mediante las mediciones de campo.

El caso más crítico es cuando la resistividad del suelo tiene una tendencia ascendente, ya que el valor calculado de la resistencia de puesta a tierra siempre está por debajo del valor esperado al medir en el campo. Para este caso y cuando no se obtenga un valor de resistencia de puesta a tierra menor que 10Ω se recomienda aumentar al doble la longitud de los electrodos de puesta a tierra horizontales.

Mediciones de campo de resistencia a tierra

El método consiste en hacer circular una corriente por el electrodo a ser medido y la influencia de esta corriente sobre el electrodo en términos de potencial, es medido entre el electrodo de puesta a tierra bajo prueba y un electrodo auxiliar de potencial.

Se utiliza un electrodo auxiliar para permitir el paso de la corriente a través del electrodo de puesta a tierra bajo prueba. Véase figura E.2.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

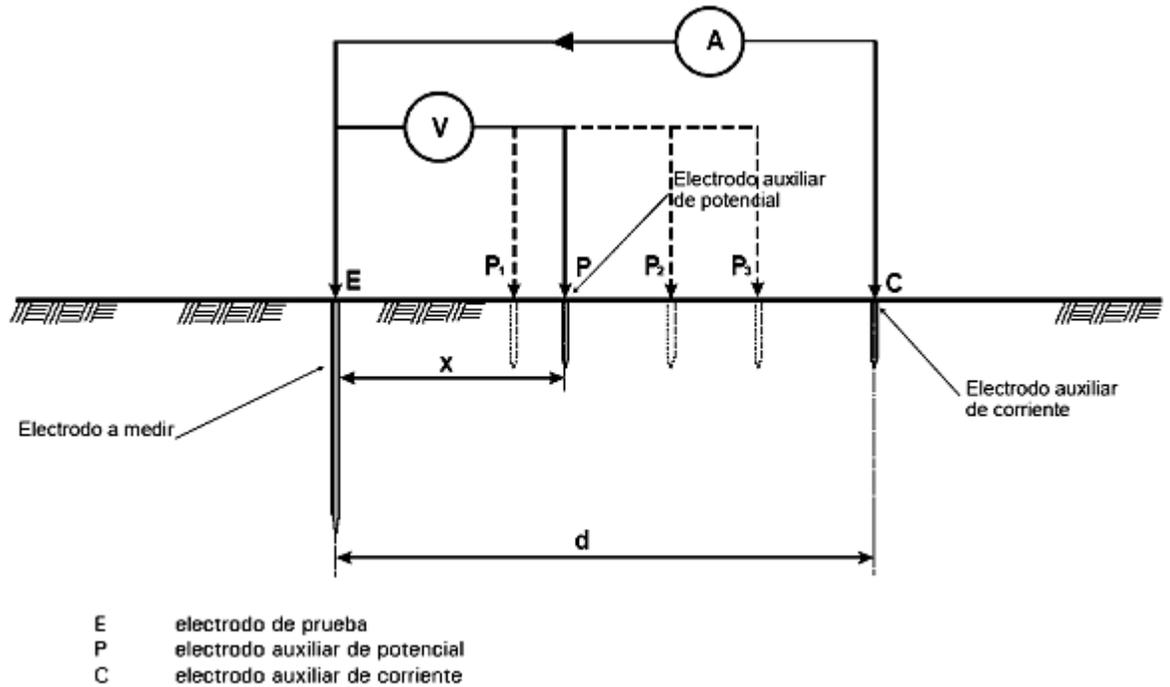


Figura E.2. Método de caída de potencial.

La corriente de prueba I , que circula entre el electrodo de puesta a tierra bajo prueba E y el electrodo auxiliar de corriente C, da como resultando una variación de potencial en la superficie del suelo. El perfil de potencial a lo largo de la dirección C, P y E se muestra en la figura E.3.

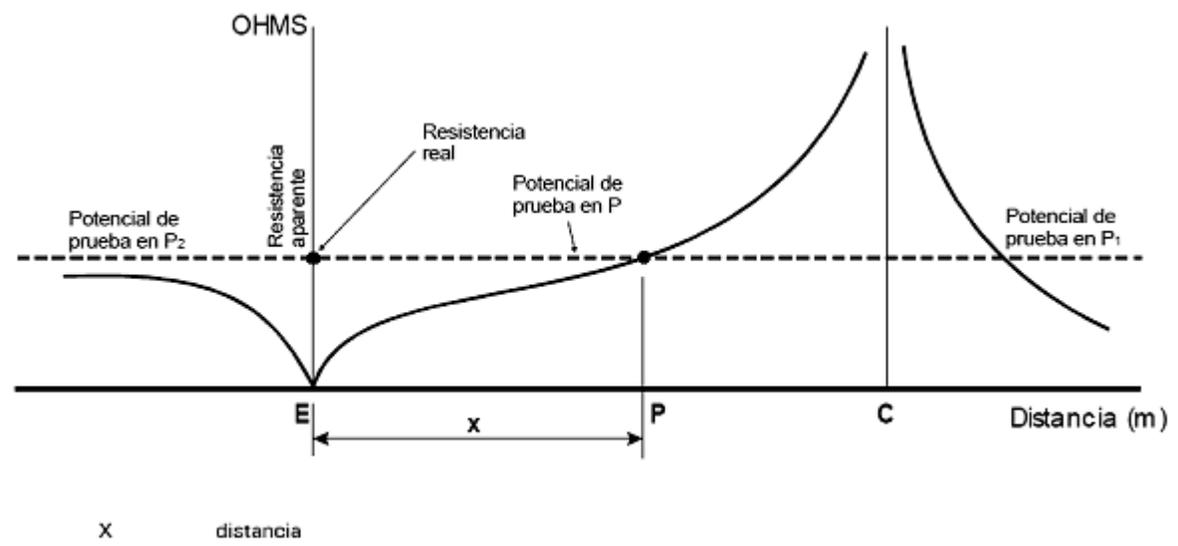


Figura E.3. Resistencia aparente para varios espaciamientos de X

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

Los potenciales son medidos con respecto al electrodo de puesta a tierra bajo prueba E, los cuales, por conveniencia, son supuestos, de valor “cero”.

El método de caída de potencial consiste en graficar la relación $V/I = R$, como una función de la variación de la distancia X. El electrodo auxiliar de potencial se mueve desde la posición del electrodo bajo prueba hasta la posición del electrodo auxiliar de corriente a incrementos del 10% de la distancia entre el electrodo E y el electrodo C. El valor de la resistencia se obtiene para cada incremento.

La resistencia se grafica en función de la distancia de separación X, el valor estimado de la resistencia buscada puede observarse en la parte plana de la curva, tal como se muestra en la figura E.4.

Con el objeto de obtener la porción plana de la curva, es necesario que el electrodo de corriente sea colocado fuera del área de influencia del electrodo a medir.

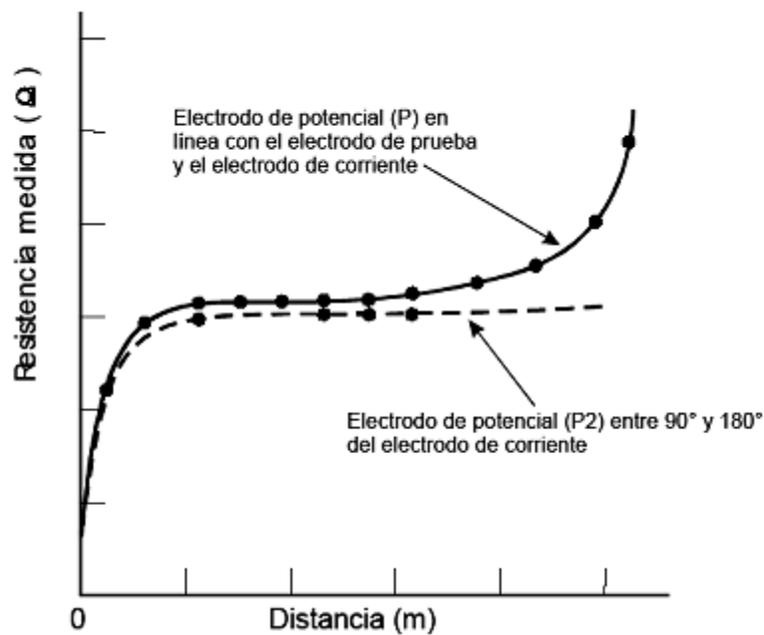


Figura E.4. Resistencia aparente para varios espaciamientos de X.

BIBLIOGRAFÍA

- JARAMILLO MORALES Gabriel A. y Alonso A. Alvarado Castellanos, **“Electricidad y Magnetismo”**, Primera Edición, Trillas, México 1997.
- ALVARENGA Beatriz y Antonio Máximo, **“Física General”**, Tercera Edición, Harla, Colombia, 1995.
- MARTÍN José Raúl, **“Diseño de subestaciones eléctricas”**, Segunda Edición, McGraw-Hill, México 2000.
- CASAGRANDE R. y C. Clerici, **“Pararrayos”**, Ediciones REDE, Barcelona, 1964.
- ENRÍQUEZ HARPER Gilberto, **“El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales”**, Limusa Noriega Editores, México 2005.
- AGUIRRE MALDONADO Elizabeth y Gabriel A. Jaramillo Morales, **“Cuaderno de ejercicios de electricidad y magnetismo”**, División de ciencias básicas, Departamento de Física General y Química UNAM.
- NFPA 780, “Standard for the Installation of Lightning Protection Systems”, 2004 Edition,
- ANCE NMX-J-549-ANCE-2007, “Sistemas de protección contra tormentas eléctricas - Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición”, Primera edición Marzo 2006, México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, “Instalaciones eléctricas (utilización).”

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA PARA LA PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS

- Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-1999, “Electricidad estática en los centros de trabajo - Condiciones de seguridad e higiene.”
- Norma Australiana AS/NZS 2280 “Lightning protection”, October 2003.
- Norma Internacional IEC 1024-1, “Protección de estructuras contra rayos”, 1990.
- Norma Francesa NF-C-17-102, “Protección de las estructuras y de las zonas abiertas contra el rayo mediante pararrayos con dispositivo de cebado”, 1995.
- Microsoft Corporation, “**Enciclopedia Encarta 2005**”, Versión 4CD´s 1993-2005.
- Programa de Televisión “Venganza de la Naturaleza”, **Relámpagos**, Discovery Channel, Programa Grabado Miércoles 10 de agosto 2005, 21 hrs. México.
- Ciclo de conferencias “Semana Técnica de las Instalaciones AMERIC 2005”, **Puesta a tierra y sistemas de pararrayos**, Franklin France por el Ing. Rubén González M., Conferencia Grabada Martes 30 de agosto 2005, 11 hrs. México.

Páginas electrónicas consultadas.

<http://www.monico.com.ar>

<http://www.megger.com>

<http://www.fervisa.com>

<http://www.dehniberica.es>

<http://www.ruelsa.com>

<http://www.andinalink.com>

<http://www.sispoint.com>

<http://www.rayos.info>

<http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot>