

## **CAPÍTULO III. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y SISTEMA DE PARARRAYOS (PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS).**

### **3.1 Introducción a los sistemas de puesta a tierra.**

La mayoría de las contingencias eléctricas se deben a errores de alambrado, y de éstos la mayoría están relacionados con los sistemas de puesta a tierra (de aquí la necesidad de este apartado). Hablar de este tema suena muy abstracto para quien no está relacionado con en el mismo. La puesta a tierra es una conexión de seguridad humana y patrimonial que se diseña en los equipos eléctricos, electrónicos y otros sistemas para protegerlos de disturbios o transitorios por los cuales pudieran resultar dañados. Recordemos que una falla es una fuga de corriente que busca un medio de conducción para drenar a tierra, este medio podría ser una persona y el riesgo es mayor si esta se encuentra en lugares húmedos, por lo que un sistema de puesta a tierra es vital para la protección contra este fenómeno.

Los procedimientos de diseño de un sistema de puesta a tierra se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja, es decir, el proyecto se puede ver como ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

Cuando se propone realizar la instalación de puesta a tierra, de inmediato pensamos en una varilla o una malla de metal conductora enterrada en nuestras instalaciones y que tiene el fin de confinar y dispersar en el terreno subyacente, descargas fortuitas (como eventos imprevistos, fenómenos artificiales o naturales como descargas electrostáticas, descargas atmosféricas y errores humanos), asumiendo su "eliminación"; sin embargo esto es incorrecto, ya que se ha demostrado que en estos puntos existen diferencias de potencial, valores que un determinado momento se podría comparar con el potencial necesario con el que trabajan los aparatos electrodomésticos como refrigeradores, televisores, licuadoras, hornos de microondas, computadoras, etc. Por lo tanto, realizar un sistema de puesta a tierra requiere de un cuidado especial y su realización debe hacerse por personas calificadas.

Se ha comprobado que en la mayoría de las fallas de los sistemas en baja tensión, sobre todo en donde están sistemas de cómputo, que las fallas se deben a una mala conexión del conductor de puesta a tierra.

Por otro lado, se sabe que el globo terráqueo es considerado con potencial cero, no obstante el material que la compone puede tener una resistividad eléctrica muy alta, así que para obtener un valor adecuado se debe hacer un estudio que nos indique que el valor seleccionado está dentro de lo permitido. La resistividad es la característica del terreno de oponer resistencia al paso de la corriente eléctrica en un metro cúbico. Este término se refiere al valor que existe entre el electrodo de la toma de tierra que se desea considerar y otro electrodo lejano de resistencia cero; este valor puede variar dentro de un rango muy amplio, ya que depende del tipo de material que tenga el suelo, del contenido de humedad, de la temperatura, variaciones estacionales, compactación del terreno, etc.

Por mencionar un ejemplo, una conexión sólida a tierra facilita de manera importante la operación de los dispositivos de protección contra sobretensiones, ya que estos equipos como pararrayos, apartarrayos, hilo de guarda, cuernos de arqueo, etc., necesitan de una conexión a tierra para su correcta ejecución.

#### **3.1.1 Definición y objetivos de un sistema de puesta a tierra.**

Un sistema de puesta a tierra es un conjunto de conductores eléctricos (cables y electrodos) directamente enterrados en el suelo y distribuidos a través de una instalación expresamente diseñada para soportar corrientes excepcionales en caso de corto circuito o descarga atmosférica, entre otras eventualidades. A este sistema se conectan todos y cada uno de los elementos de la instalación que requieran ser puestos a tierra, tales como los neutros, tanques y carcasas de los equipos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra, logrando los siguientes objetivos:

- Proveer un medio seguro para proteger al personal.
- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra.
- Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas indeseables.
- Facilitar la operación de los dispositivos de protección.
- Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos, antes de proceder a las tareas de mantenimiento.
- Dar mayor confiabilidad y seguridad al servicio eléctrico.
- Disipar la corriente asociada a las descargas atmosféricas, limitando las sobretensiones generadas.
- Limitar la elevación de potencial de la red a valores aceptables, cuando ocurre una falla a tierra.
- Establecimiento y permanencia de un potencial de referencia (equipotencialidad efectiva).

### 3.1.2 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra se clasifican en dos grandes grupos:

- De acuerdo a su naturaleza: Esta clasificación se refiere a la naturaleza dicotómica de los sistemas de puesta a tierra y se divide en dos secciones:
  - ❖ Instalación artificial de puesta a tierra: son aquellas que se construyen específicamente para tal fin, utilizando las diversas clases de electrodos de puesta a tierra.
  - ❖ Instalación natural de puesta a tierra: son en realidad elementos de otros sistemas técnicos, por ejemplo, líneas de tuberías metálicas o cimientos de estructuras metálicas, de equipos eléctricos, etc., vías férreas y hasta vías de agua que se encuentren dentro del ámbito de la instalación que se desea proteger y/o en su proximidad.
- De acuerdo a su aplicación: Se refiere en otras palabras, a las que distingue las instalaciones de puesta a tierra de acuerdo a su funcionalidad, y constan de tres secciones importantes:
  - ❖ Sistemas de puesta a tierra de protección: tienen la misión de limitar el valor de la tensión contra tierra de aquellas partes del sistema eléctrico que no deben ser mantenidas ni en tensión ni aisladas y con las cuales puede tener contacto el personal. En otras palabras, este sistema es indispensable para asegurar que durante el traspaso de corriente a tierra sus efectos fisiológicos no dañen a los seres vivos que eventualmente estuviesen dentro del ámbito del sistema de tierra o en su proximidad en esos momentos, por ejemplo: la carcasa de una máquina eléctrica.
  - ❖ Sistemas de puesta a tierra de funcionamiento: se aplica para satisfacer ciertas condiciones del servicio del sistema técnico en cuestión, es decir sirven para poner a tierra por necesidad de funcionamiento a determinados puntos del circuito eléctrico, tales como neutro de generadores y transformadores, aparatos para la conexión de la tensión contra tierra, apartarrayos, etc.
  - ❖ Sistemas de puesta a tierra de trabajo: estos sistemas son realizados con carácter provisional, efectuados para poner a tierra parte de la instalación eléctrica, normalmente en tensión, a los cuales se debe llegar para efectuar un trabajo o reparación, tales como cuchillas de seccionadores, etc.

Las clasificaciones anteriores envuelven de manera general a todos los tipos de puesta a tierra, esto es; en el sistema eléctrico existen diferentes dispositivos o partes del sistema con un fin determinado, pero cada uno tiene diferente propósito, no es lo mismo la puesta a tierra contra descargas atmosféricas que la puesta a tierra para cargas electrostáticas. Por tal motivo, es

necesario hacer una clasificación secundaria de los sistemas de puesta a tierra de acuerdo a su propósito, esto es:

- Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.

Esta clasificación tiene el propósito de limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de descargas atmosféricas, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. Se logra uniéndolo mediante un conductor apropiado a la corriente de falla a tierra total del sistema, una parte del sistema eléctrico al planeta tierra.

- Puesta a tierra en señales electrónicas.

Su propósito es evitar la contaminación de señales con frecuencias diferentes a las deseadas. La puesta a tierra se logra mediante blindajes de todo tipo conectados a una referencia cero, que puede ser el planeta tierra. También tiene el propósito de evitar la destrucción de los elementos semiconductores por un incremento en el voltaje. Se colocan dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y la referencia cero.

- Puesta a tierra de protección atmosférica.

Sirve para canalizar la energía de las descargas atmosféricas a tierra sin mayores daños a personas y propiedades. Esta protección se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger.

- Puesta a tierra de protección electrostática.

La finalidad de esta protección es neutralizar las cargas electrostáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniéndolo todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero.

En la figura siguiente se observa un sistema de puesta a tierra simple, formado por un electrodo, un conductor eléctrico y su respectivo conector, así mismo la tierra del planeta y la distribución de potencial.

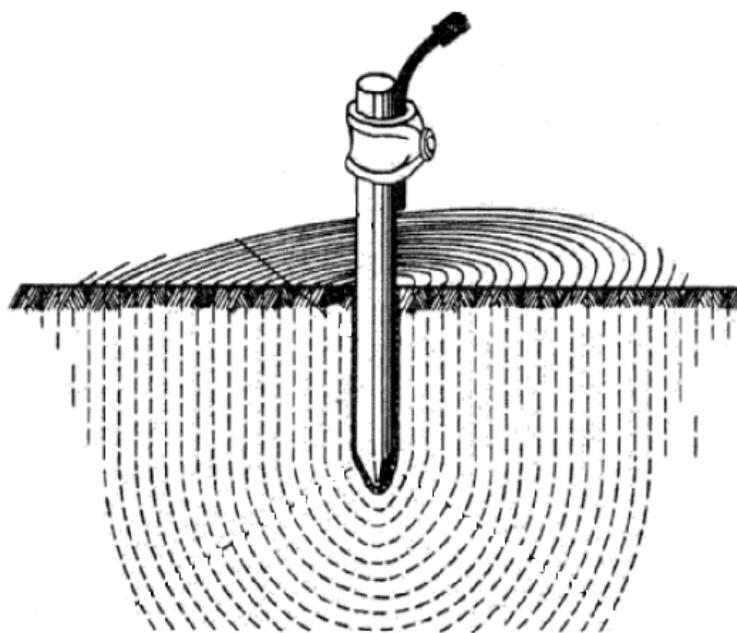


Figura 3.1 Sistema de puesta a tierra simple.

### 3.2 Resistividad del terreno y resistividad superficial.

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar el sistema de puesta a tierra. La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno.

#### 3.2.1 Resistividad del terreno.

La resistividad en otras palabras, es la propiedad que tiene el terreno de oponerse al paso de la corriente eléctrica y está determinada por las características del mismo suelo. La resistividad se mide en ohms-kilómetro u ohms-metro, etc.; pero de acuerdo a la NOM-008-SCFI-1993, la representación dimensional debe estar en ohms-cm. Existen dos formas para determinar el valor de la resistividad: una empírica mediante tabulación y conocimiento del terreno y la otra efectuando la medición directamente en el terreno. Los valores obtenidos en la medición del terreno tienen un doble propósito adicional a la relación con el sistema de puesta a tierra.

- Este tipo de datos es usado para realizar reconocimientos geofísicos debajo de la superficie como ayuda para identificar zonas de mineral, profundidades de roca y otros fenómenos geológicos.
- La resistividad posee un impacto directo sobre el grado de corrosión en tuberías bajo tierra. Una baja resistividad tiene relación con un aumento en actividad corrosiva y así dicta el tratamiento a utilizar.

La resistividad es un factor determinante en el valor de resistencia a tierra que pueda tener un electrodo enterrado, puede determinar la profundidad a la cual debe ser enterrado el mismo para obtener un valor de resistencia bajo.

El valor de la resistividad puede ser muy diferente de un lugar a otro y se afectará de acuerdo con la época del año en función de los siguientes parámetros:

- Sales solubles. A valores pequeños menores al 1% de estas sales, la resistividad es muy grande.
- Composición propia del terreno. Se refiere al tipo de terreno, ya que no es lo mismo tener un terreno con limo que tenerlo con tepetate.
- Estratigrafía. Este término relaciona las diferentes capas de la tierra.
- Granulometría. Este parámetro influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra.
- Estado higrométrico. Depende del contenido de agua, humedad y el clima.
- Temperatura. Si desciende la temperatura la resistividad aumenta.
- Compactación. Este término es inversamente proporcional a la resistividad.

##### 3.2.1.1 Medición de la resistividad del terreno.

Los estudios de la medición de la resistividad del suelo son requeridos para poder llevar a cabo un adecuado y funcional proyecto del sistema de puesta a tierra. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes, obteniéndose lo que se denomina "resistividad aparente" que para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como "resistividad del terreno". Para determinar la resistividad eléctrica del suelo es conveniente hacer mediciones con métodos y aparatos aprobados para estos fines; por ejemplo los medidores de resistencia o también

llamados terrohmetros. En la figura 3.2 se muestra el equipo utilizado en un estudio de resistividad del terreno. Se observa entre otros accesorios a un medidor de resistencia de tierra digital, marca Ave Megger, modelo det5/4r, así como cuatro electrodos (picas).



Figura 3.2 Equipo de medición de resistividad del terreno.

Se recomienda ampliamente que la resistividad del suelo en el lugar donde se desea instalar un sistema de puesta a tierra, se determine de acuerdo con las mediciones de resistencia a tierra correspondientes, o en su caso se investigue el tipo y características del suelo.

En la actualidad se han utilizado diversos métodos para poder calcular y/o determinar la resistividad que presenta el suelo al paso de una corriente eléctrica, pero en la práctica, el método más seguro de medición para la determinación de dicha resistividad, es el método de las cuatro puntas o electrodos (Método Wenner), es por eso que hoy en día es el método más popular para determinar la resistividad del terreno.

El método consiste en enterrar los cuatro electrodos en el suelo a una cierta profundidad y espaciarlos (en línea recta) a la misma distancia uno del otro. A continuación se hace circular una corriente de prueba entre los dos electrodos ubicados en los extremos y el potencial entre los dos electrodos internos se mide con un potenciómetro o voltímetro de alta impedancia. Posteriormente es recomendable que la superficie destinada para la tienda y de la subestación eléctrica se divida en diferentes áreas (tres es recomendable) de trabajo en donde se procede a distribuir y ubicar en ellas varias líneas de medición. Por último, y ya con nuestras líneas de medición ubicadas en sus lugares respectivos, se procede a llevar a cabo la toma de lecturas de resistencia en cada uno de los puntos de los que se constituyó cada línea.

La información recaudada se captura en una tabla (tabla 3.1 para nuestro ejemplo) que nos arroja de manera más clara los datos obtenidos. Los datos que se presentan en la tabla, son aquellos que previamente fueron calculados con las ecuaciones correspondientes, tales como:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times a \times R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde a es la separación de los electrodos, b la profundidad de la medición y R el valor de resistencia obtenido por medio del medidor de resistencia de tierra digital.

Para obtener solo un valor de resistividad, se saca el promedio de las mediciones.

SEPARACION ENTRE ELECTRODOS	PROFUNDIDAD DE ELECTRODOS	RESISTENCIA MEDIDA	RESISTIVIDAD DEL TERRENO
			(HORIZONTAL)
a (m)	h (m)	R (ohms)	□ (ohms-m)
6.00	0.20	10.00	53.51
6.00	0.20	2.60	67.02
6.00	0.20	12.00	40.46
6.00	0.20	2.50	51.62
6.00	0.20	8.90	49.75

Tabla 3.1 Resistividad de área determinada.

En muchas ocasiones se utilizan solo como referencia valores generales de resistividades de terreno promedio, esto es valores realizados por estudios previos, pero que no son únicos. En la siguiente tabla se muestran algunos de ellos.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHM-METRO
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humos	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silícea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres alterados	100 a 600

Tabla 3.2 Resistividad general de tipos de terreno.

Estos valores obtenidos solo tienen validez si se cuenta con la aprobación a través de un certificado de aprobación de calibración del medidor de resistencia de tierra digital.

En las siguientes imágenes se muestra la secuencia de trabajo al realizar un estudio de resistividad del terreno. En la primera imagen se observa una vista panorámica del terreno con una capa de material empleado para terracerías. La segunda imagen muestra a los electrodos

colocados con la separación indicada. Finalmente la última imagen presenta el valor obtenido por medio del medidor de resistencia de tierra.



Figura 3.3 Vista panorámica del terreno.



Figura 3.4 Colocación de los electrodos de prueba.



Figura 3.5 Lectura tomada en un área determinada con una separación de 8.00 m y profundidad de 0.30 m.

### 3.2.2 Resistividad superficial.

Los diversos componentes del suelo determinan el valor de la resistividad del terreno, por lo tanto cuando se tiene resistividad alta se considera un mal conductor pero a su vez un buen aislante. Por ejemplo se sabe que la grava tiene mayor resistividad que la arena, esto es debido a su granulometría.

Lo anterior nos quiere decir que la capa de material que se debe tener inmediato a la base de los equipos o debajo de las personas, debe ser un material que presente una resistividad alta con el fin de reducir las descargas de corriente producidas por una falla a tierra en la malla. Si la capa interior del suelo tiene una resistividad más baja que el material superficial, solo algunas corrientes de rejilla ascenderán hacia la capa delgada del material superficial, entonces al colocar este material, la corriente que circula por el cuerpo humano disminuye considerablemente debido a la gran resistencia de contacto que ofrece entre a tierra y los pies.

Además la capa superficial se utiliza para retardar durante un periodo largo, la evaporación de la humedad y así, limitar que la capa superior de la tierra se seque durante la estación seca del año. Cabe mencionar que no siempre se logra el objetivo de reducir las descargas de corriente, pero si garantiza una proporción 10:1. Por tal motivo se acostumbra colocar en la subestaciones tipo interior, tarimas aislantes sobre una capa de concreto frente a los gabinetes de alta tensión para reforzar este concepto, así como se observa en la figura 2.21 del capítulo II mientras las de tipo intemperie se coloca grava o tezontle.

A continuación se muestra la tabla 3.3 que indica los valores estándar de resistividad superficial de los materiales que se utilizan como capas superficiales de terreno en subestaciones.

Material	Resistividad (ohm-metro)
Permafrots	3500-4000
Asfalto seco	$2 \cdot 10^6$ - $30 \cdot 10^6$
Asfalto mojado	1000
Concreto seco	1200-10000
Concreto mojado	21-100
Grava seca (tipo moran y tipo de galeana)	3000
Grava bolder	15000
Grava mojada	500
Compuesto GAP seco	0.032
Compuesto GAP con 30% de agua en masa	0.015

Tabla 3.3 Resistividad superficial de tipos de material.

### 3.3 Potenciales tolerables y potenciales de la malla de puesta a tierra.

#### 3.3.1 Orígenes.

La circulación de corrientes de falla a través de las conexiones a tierra, produce a su vez elevaciones de potencial del equipo conectado a tierra y gradientes de potencial sobre la superficie del terreno. Las circunstancias que pueden provocar una descarga eléctrica por este motivo son las siguientes:

- Una corriente de falla a tierra relativamente alta en relación con el dimensionamiento del sistema de puesta a tierra.
- Gradientes de potencial altos en uno o varios puntos de la superficie de la tierra, debidos a la resistividad elevada del terreno, que provoca una inadecuada distribución de la corriente a tierra.
- La presencia de una persona en un determinado lugar que provoque continuidad en dos puntos con alta diferencia de potencial.
- Ausencia de una resistencia de contacto suficiente o de otras resistencias en serie que limiten, a un valor seguro, la corriente a través del cuerpo.
- Tiempo suficiente de duración de la falla y del contacto del cuerpo (flujo de corriente a través de él), tal que cause daño considerando una intensidad de corriente dada.
- En las discontinuidades de las envolventes de las subestaciones en SF6, se producen transitorios de alta frecuencia que se transfieren peligrosamente al exterior.

En los sistemas eléctricos, el método de aterrizamiento puede determinar la magnitud de las sobretensiones tanto en estado estable como en estado transitorio. Los sistemas no aterrizados están sujetos a sobretensiones muy elevadas que reducen la vida de los equipos, principalmente en los transformadores y máquinas rotatorias.

La corriente de falla a tierra total, provoca elevación en el potencial, y cuando se cuenta con cables de energía con pantalla, neutros aterrizados, barras aisladas en gas SF6, alimentadores subterráneos, etc., se provee una trayectoria de baja impedancia en paralelo de retorno hacia la fuente, que abate la magnitud de las sobretensiones esperadas.

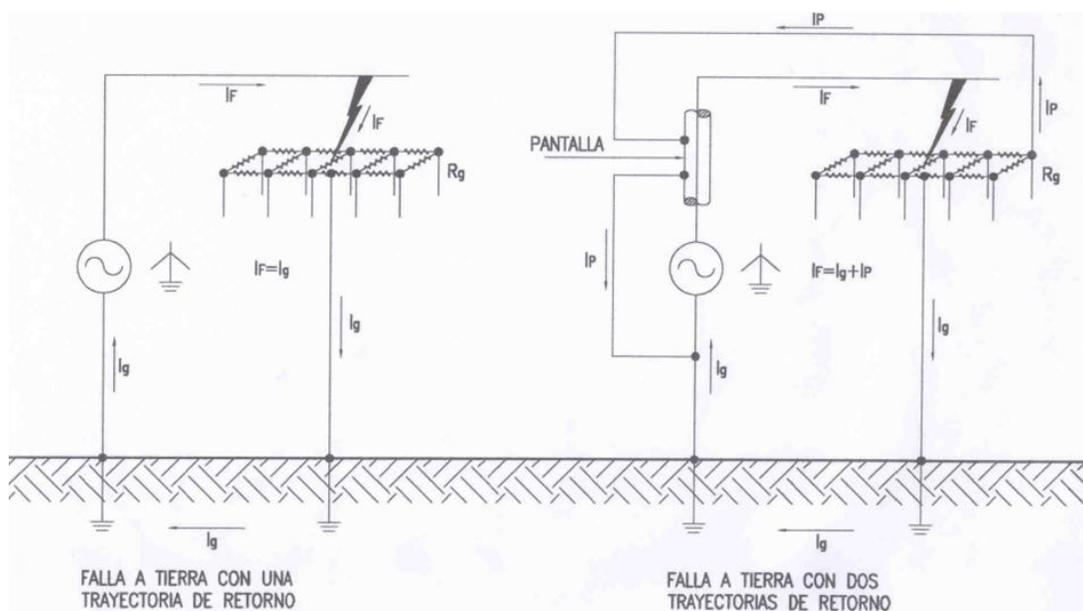


Figura 3.6 Flujo de corriente de retorno cuando se abate una sobretensión.

Se puede observar que en ambos casos, el efecto de la corriente que entra a la tierra debe analizarse, considerando la localización de los electrodos de puesta a tierra, las características del terreno, en general los elementos que conforman la malla de puesta a tierra y el tiempo de operación de los dispositivos de protección, para determinar las tensiones peligrosas que se puedan presentar durante las condiciones de falla, debido a que estos gradientes de potencial se producen dentro y alrededor de la subestación. La idea generalizada de que puede tocarse todo objeto conectado a tierra sin sufrir daño alguno es falsa y resulta evidente que ella ha sido la causa de muchos accidentes.

Los gradientes de tensión originados pueden alcanzar valores de varios kV/cm, no afectan la composición de la malla a menos que excedan los valores críticos o tolerables del cuerpo que están determinados por el tipo de material del suelo. Una vez excedido el gradiente, se provoca un arco en la superficie del electrodo de tierra que se introduce en el suelo, hasta que los gradientes se reducen a valores que puede soportar el terreno. Para un diseño adecuado de la red de tierra se asume que los gradientes que se presentan no exceden las tensiones de toque y de paso críticas.

Las corrientes en condiciones de falla que fluyen por los electrodos hacia el terreno circundante, pueden afectar la resistividad del suelo en la vecindad de los electrodos de tierra, de tal manera que sus características térmicas y el contenido de humedad determinarán si la corriente de una magnitud y duración, causará que el terreno pierda humedad y se incremente su resistividad. Se considera aceptable un valor de densidad de corriente que no exceda los  $200 \text{ A/m}^2$  en un segundo.

La circulación de las intensidades de corriente mencionadas por la instalación de puesta a tierra pueden originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo, entre la instalación de puesta a tierra y el terreno que la rodea o entre dos puntos del mismo,

de tal manera debe concebirse la instalación de puesta a tierra para que incluso con la aparición de las diferencias de potencial mencionadas cubran los objetivos del sistema de puesta a tierra explicados en párrafos anteriores. Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que significa que no se deje de reconocer la importancia de los otros objetivos.

La norma IEEE Std.80-2000, indica que "toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en ningún punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma, las personas en tránsito corran el riesgo de estar sometidas a una tensión peligrosa, durante cualquier defecto de la instalación eléctrica o en la red unida a ella". Ello induce, equivocadamente, a pensar en la posibilidad de una seguridad absoluta. A este respecto, es oportuno recoger la afirmación que, sobre el riesgo contiene la IEEE Std.80-2000. Su traducción dice así: "un somero análisis mostrará que es absolutamente imposible, a menos que se abandone totalmente la distribución de energía eléctrica, prevenir en todo momento, en todo lugar y bajo todas las circunstancias, la presencia de tensiones peligrosas. Sin embargo, este hecho no releva al ingeniero de la responsabilidad tanto razonablemente se pueda. Afortunadamente, en la mayoría de los casos mediante un diseño cuidadoso e inteligente esa probabilidad puede reducirse a un valor extremadamente bajo".

Entonces, nos conviene remarcar, que las puestas a tierra no garantizan la seguridad total de las instalaciones eléctricas ante los incalculables transitorios y fenómenos, reacciones anómalas, imprudencias y, aún, despropósitos que las personas pueden llevar a cabo con respecto a una instalación de baja, media y alta tensión y que, por otro lado, incluso serán elementos coadyuvantes a aumentar la gravedad en caso de accidentes por contactos directos.

### 3.3.2 Efectos fisiológicos de la corriente a tierra (corriente tolerable por el cuerpo humano).

Al circular la corriente de tierra por los electrodos se origina en ellos y en la tierra que los rodea fenómenos de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Así, por ejemplo, desde el punto de vista de la seguridad para las personas, el potencial de electrodo y su distribución sobre el terreno son el problema central por atender, ya que se manifiesta como voltajes de contacto y de paso en ellas si se encuentran en la zona de influencia del sistema de puesta a tierra; tales tensiones no sólo les puede afectar a su salud, sino hasta ocasionarles la muerte.

Los efectos de la corriente eléctrica que puede circular a través de las partes vitales de un cuerpo humano dependen de la frecuencia, magnitud y duración de la corriente. La secuela más peligrosa por dicha exposición es una condición que presenta el corazón conocida como fibrilación ventricular. Los humanos somos muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica con la frecuencia de los sistemas de potencia (50 o 60 [Hz]), magnitudes de 0.1 [A] pueden ser mortales. El cuerpo humano puede soportar una magnitud de corriente ligeramente mayor con una frecuencia de 25 [Hz] y una magnitud de cinco veces mayor con corriente directa. Entre las frecuencias de 3,000-10,000 [Hz], corrientes aun mayores pueden ser toleradas. En algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar muy altas corrientes debidas a descargas atmosféricas.

El fenómeno de la circulación de corriente eléctrica en el cuerpo humano debido a una falla, depende de diversas eventualidades, entre las cuales se pueden mencionar:

- Camino de circulación de corriente y distribución de la misma dentro del cuerpo humano.
- Intensidad de corriente eléctrica.
- Tiempo de circulación de la corriente eléctrica en el cuerpo humano.
- Tipo de onda de la corriente: impulso (rayos), corriente alterna, corriente continua.
- Frecuencia de la corriente alterna senoidal.

- Nivel de voltaje aplicado para la circulación de la corriente.
- Humedad de la piel y superficie de contacto con caminos de la circulación de la corriente externos al cuerpo humano.
- Condiciones orgánicas de la persona bajo el efecto de una corriente eléctrica.

La disciplina tecnológica de la medicina que se ocupa de tales efectos es la electrofisiología; y a partir de una larga serie de experimentos, algunos en personas y muchos en animales, se ha determinado el grado de peligrosidad de la corriente sobre el cuerpo humano, es decir, los valores de corriente y de voltaje que son peligroso para él, tales magnitudes ya están normalizadas y sirven de base para el diseño de los sistemas de puesta a tierra, los cuales se describen a continuación (según IEEE Std.80-2000):

- 1 [mA]: Nivel de percepción, ligera sensación de hormigueo.
- 1 a 6 [mA]: Desagradable. No se pierde el control muscular.
- 9 a 25 [mA]: Dolor. Dificultad o imposibilidad de soltar un objeto energizado agarrado con la mano (let-go-current).
- 25 a 60 [mA]: Aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración. Excepto en casos de paro respiratorio, los efectos desaparecen cuando la corriente se interrumpe. Cuando existe paro respiratorio con técnicas de resucitación se puede salvar a la persona.
- 60 a 100 [mA]: Ocurre fibrilación ventricular, paro respiratorio, paro cardiaco. Los daños causados son severos y puede morir la persona.

Además de las consecuencias antes mencionadas hay que tomar en cuenta el valor de la resistencia óhmica del cuerpo. Diversos estudios experimentales han demostrado que la impedancia del cuerpo humano es siempre resistiva pura y que al paso de la corriente alterna cuya frecuencia sea superior a 10 [kHz], no provoca más efectos que el de calentar los tejidos por donde pasa la corriente, aunque esto es suficiente para provocar daños considerables a la persona.

Los rangos de valores anteriores solo son válidos para corriente alterna y para corriente directa son muy similares, por tal motivo en algunas bibliografías los consideran iguales, además que en ambos se hacen diferencia entre los valores que soportan los hombres y las mujeres.

La magnitud de corriente que puede circular por el cuerpo de una persona se debe mantener por debajo del umbral de fibrilación en el diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación, para evitar el daño o muerte de la persona. La magnitud de corriente de no fibrilación con un rango de duración de 0.03 a 3.0 segundos, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y está determinada por la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}; \text{ para una persona con de 50 [kg] de peso.} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}; \text{ para una persona con de 70 [kg] de peso.}$$

3.3.3 Definiciones de potenciales tolerables y potenciales de la malla.

Existen diferentes formas de choques eléctricos que puede experimentar una persona dentro o fuera de una subestación, pero cinco formas de contactos circunstanciales son las más comunes, ocasionando para cada uno un tipo de tensión (mostradas en la figura 3.7), de tal manera se requiere establecer una tensión “tolerable” por el cuerpo humano, basándose en la

ecuación 3.2. A continuación se definen a cada una de estas tensiones según lo indicado en la norma internacional IEEE Std.80-2000, capítulo 8.

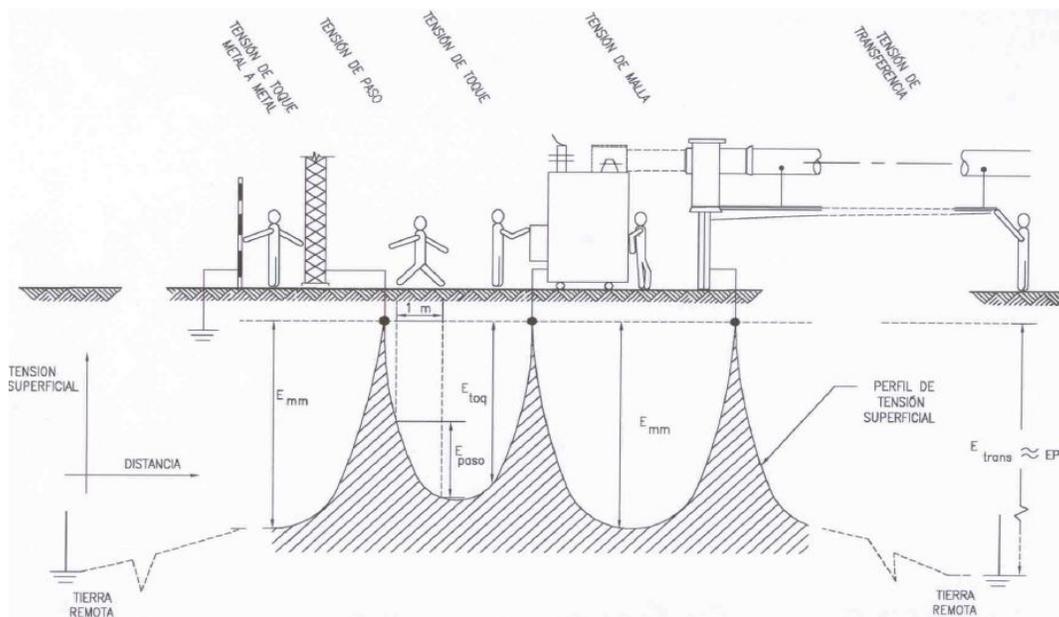


Figura 3.7 Situaciones básicas de choque eléctrico.

- *Tensión de toque metal a metal (voltaje real de toque)*. Es la diferencia de potencial entre objetos metálicos o estructuras dentro del lugar de la subestación que pueden establecer un puente por el contacto mano-mano ó mano-pies.
- *Tensión de malla (voltaje real de la malla)*: Es el máximo voltaje de toque dentro de una malla de rejilla aterrizada.
- *Tensión de toque (voltaje de toque límite o potencial de toque tolerable)*. Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial a tierra (GPR) y el potencial en la superficie, en un punto donde la persona está de pie y al mismo tiempo hace contacto con la mano en una estructura aterrizada.
- *Tensión de paso (voltaje de paso límite o potencial de paso tolerable)*. Es la diferencia de potencial en la superficie del suelo experimentado por una persona a una distancia de 1 metro sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.
- *Tensión de transferencia (voltaje o potencial transferido o remoto)*. Es un caso especial del voltaje de toque, donde el voltaje se transfiere hacia el interior o fuera de la subestación, desde o hacia un lugar exterior distante al lugar de la subestación.

Finalizando este tema, es importante recordar que la seguridad de una persona va a depender de la prevención que se tenga respecto a la cantidad crítica de absorción de la descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine y se suspenda el servicio de energía al sistema, de aquí la justificación de los potenciales tolerables por el cuerpo humano, ya que el manejo del voltaje máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder estos valores.

### 3.4 Diseño, cálculo y especificaciones de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica.

#### 3.4.1 Fundamento.

Para dar cumplimiento a los requisitos básicos para el diseño de un sistema de puesta a tierra, así como la puesta a tierra de equipos e instalaciones eléctricas, se deben tomar en cuenta

todos los factores implicados en el diseño. Los principales factores del diseño que se deberán considerar para el cálculo del sistema, son principalmente: resistividad del suelo, corriente máxima de falla de fase a tierra, calibre del conductor del sistema, tensiones de paso y toque tolerables, tensión de malla y tensión de toque del sistema, así como el valor de la resistencia a tierra.

A continuación se realiza el procedimiento de cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación, tomando algunos parámetros indicados en párrafos y capítulos anteriores y otros se seleccionan por experiencia, facilidad en los cálculos y por recomendaciones.

Se realiza este ejemplo con el fin de evitar los errores que se comenten en las instalaciones de puesta a tierra en las tiendas comerciales, ya que en ocasiones la malla está muy “sobrada” o no cumple con los requerimientos técnicos mínimos, muchas veces no se realiza cálculo alguno y solo se colocan electrodos en configuración en delta, agregándoles intensificadores para “bajar” la resistencia del terreno y así obtener el valor de resistencia de puesta a tierra requerido por la norma, pero no consideran aspectos como los potenciales antes mencionados.

Otro fundamento del procedimiento descrito abajo, es ilustrar las ecuaciones correspondientes y valores de corriente de corto circuito adecuados para que el diseño de la malla sea el correcto.

### 3.4.2 Objetivo.

El objetivo de un sistema de puesta a tierra es verificar que los potenciales de toque y de malla, no excedan los valores límite de los potenciales tolerables por el cuerpo humano. Además obtener un valor de resistencia a tierra que este dentro del rango del valor recomendado por las normas.

### 3.4.3 Procedimiento.

El procedimiento de diseño encuentra su justificación en las siguientes normatividades:

- IEEE Std. 80-2000 Guide for Safety in Ac Substation Grounding.
- Norma NRF-011-CFE.
- NOM-001-SEDE-2005. Instalaciones Eléctricas (Utilización).

### 3.4.4 Datos conocidos.

- Contribución de CFE:

a.  $P_{cc_{1\phi}} = 171 \text{ [MVA]}$

b.  $\frac{X}{R} = 10$  (es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC).

- Resistividad del terreno  $\rho_t$ :

Este valor se obtiene de los valores de la tabla 3.1 y con la ecuación que se muestra (según ecuación B-4 del apéndice B de la norma NMX-J-549-ANCE-2005.

$$\rho_t = \frac{\rho_{m\acute{a}x} + \rho_{m\acute{i}n}}{2} \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}. \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\rho_t = 53.74 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}.$$

Resistividad superficial  $\rho_s$  :

$\rho_s = 5000 [\Omega \cdot m]$ . Valor común referente a tabla 3.3.

➤ Profundidad de la red y profundidad de la capa superficial:

$h = 0.60 [m]$  y  $h_s = 0.10 [m]$ , respectivamente.

Se tomó este valor por facilidad, ya que las normas NRF-011-CFE e IEEE Std.80-2000 en sus artículos 5.4.3 y 9.2 inciso 1, respectivamente; indican que la profundidad de la malla se recomienda a 0.50 [m], así como en la NOM-001-SEDE-2005 en su artículo 250-81, (d) menciona que un anillo de tierra debe estar por lo menos a 0.80 m debajo de la superficie, sin embargo en nuestro país lo más usual es a una profundidad de 0.60 [m].

➤ Longitud de la red:

$l_r = 13.50 [m]$ , (arbitrario solo para ilustrar el método, ya que depende de los valores reales existentes).

➤ Ancho de la red o malla o rejilla:

$a_r = 4.50 [m]$ , (arbitrario solo para ilustrar el método, ya que depende de los valores reales existentes).

➤ Tiempo de duración de la falla (tiempo de liberación o limpia de falla):

$t_f = 0.10 [s]$ .

Se asume que la subestación no se despejara (limpiar la falla) por circuitos disyuntores con plan de recierre automático. Así, la duración de la falla y la duración de las descargas son iguales.

➤ Longitud del electrodo:

Varilla tipo Copper-Weld = 3.05 [m].

Este tipo de electrodo es el más usual en nuestro país para sistemas de puesta a tierra de subestaciones (aunque el tipo rehilete también es otra opción, pero no está fundamentado para este cálculo).

➤ Diámetro del electrodo:

$\phi = 0.0159 [m]$

### 3.4.5 Diseño de la red.

a) Cálculo de la sección del conductor de la red:

$$A_{kcmil} = I_G \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_f \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_{amb}}\right)}} \dots\dots\dots (3.4)$$

Se sabe que la ecuación simplificada queda de la siguiente manera:

$$A_{kcmil} = (I_G)(K_f)(\sqrt{t_f}) \dots\dots\dots (3.4'')$$

Pero esta ecuación sólo es válida para un tiempo de falla de  $t_f = 0.5$  [s] y una temperatura de fusión del conductor igual a  $T_m = 1084$  [°C].

Además se sabe que:

$$I_{mm^2} = 1.974 \text{ kcmil} \dots\dots\dots (3.5)$$

Entonces:

Para obtener  $I_G$  se tiene que:

$$I_G = I_{cc1_\phi} \times D_f \times C_p \times S_f \dots\dots\dots (3.6)$$

Donde:

$I_G$  es la corriente máxima de la rejilla.

$I_{cc1_\phi}$  es la corriente de corto circuito en el peor lugar de falla.

$D_f$  es el factor de decremento, debido a la onda de corriente asimétrica para un tiempo de falla dado, tomando en cuenta la compensación de DC (dc offset).

$C_p$  es el factor de proyección por cambios a futuro.

$S_f$  es el factor de división de corriente. Este factor depende de muchos parámetros y que pueden ser variables, de tal manera que si no se tiene el dato por parte de compañía suministradora (regularmente no se proporciona) es difícil aproximarlos de manera correcta, por tal motivo para efectos de facilidad en los cálculos este factor se desprecia, siempre y cuando tomando la siguiente consideración: este factor se basa en contribuciones simétricas remotas versus la corriente local, entonces aunque se utilicen componentes simétricas tradicionales para encontrar su valor, se obtienen resultados muy pesimistas aun si se considera una expansión a futuro.

Obtendremos primero la  $I_{cc1_\phi}$ , de la siguiente manera:

$$I_{cc1_\phi} = \frac{MVA_{cc1_\phi}}{\sqrt{3} \times kV} \dots\dots\dots (3.7)$$

Sustituyendo valores:

$$I_{cc1_\phi} = \frac{171 \times 10^6}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3)};$$

$$I_{cc1_\phi} = 7,488.1765 \text{ [A]} \text{ Asimétricos.}$$

Cabe mencionar que la tensión que se utiliza es la del lado de alta tensión (para nuestro estudio tomaremos el lado de media de los dos transformadores y considerar una carga individual como la suma de los dos transformadores, aunque estrictamente solo se debe tomar la carga del transformador mayor, ya que es muy difícil que los dos fallen al mismo tiempo) como indica la norma IEEE Std.80-2000 en su capítulo 15.8 párrafos 3 y 4, ya que este valor de corto circuito (manifestado en el GPR) es el máximo que puede haber en nuestro sistema (aportación de CFE). Se utiliza la aportación monofásica de corto circuito, ya que esta falla (monofásica) es asimétrica y está en desequilibrio, mientras que la falla trifásica se encuentra en equilibrio por ser una falla franca y simétrica, además que en esta falla solo existen la componente simétrica de sec (+), omitiendo la de sec (-) y sec (0) independientemente si la falla está conectada a tierra o no.

Para subestaciones de distribución en donde no se tenga el dato de aportación de compañía suministradora la corriente de corto circuito monofásica a utilizar es la que se obtiene del lado de baja tensión; considerando a un transformador con conexión a tierra en el lado de baja. El lado de baja se considera una fuente local de tierra, debido a esto la fuga de corriente hacia la tierra del planeta es insignificante por lo tanto esta corriente de falla es la máxima corriente que circulará por el conductor de la malla, sin embargo no provoca aumento en el GPR, lo cual origina que los potenciales de la malla no sean los máximos y se puedan dar en cualquier otro lado. Entonces, los potenciales de la malla deben ser calculados con la tensión lado de alta tensión del transformador (puede ser delta o estrella no aterrizada), ya que al suceder una falla en este punto, la corriente circula directamente por el terreno aumentando los potenciales. Esta corriente se dirige a la compañía suministradora y regresa al punto en donde se originó la falla.

Para obtener el factor de decremento  $D_f$  (asimetría) aplicamos la siguiente ecuación:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2(t_f)}{T_a}} \right)} \dots\dots\dots (3.8)$$

En donde:

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{(120\pi)R} \dots\dots\dots (3.8')$$

Sustituyendo valores, se tiene que:

$$T_a = \frac{10}{120\pi}$$

$$T_a = 0.026 \text{ [s]} \text{ (constante de tiempo de la compensación de DC en segundos).}$$

Entonces sustituyendo valores:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.026}{0.10} \left( 1 - e^{-\frac{2(0.10)}{0.026}} \right)}$$

$$D_f = 1.1224$$

Otra forma de obtener este factor es con la tabla 3.4 “Valores típicos de  $t_f$ ”, en donde debido al  $t_f = 0.10 \text{ [s]}$  y la relación  $\frac{X}{R} = 10$ , además de considerar que las protecciones operan entre 6 y 8 ciclos, se puede tomar el valor típico de 1.125 que es aproximadamente igual al valor obtenido de manera exacta a través de la ecuación 3.8.

Obteniendo el factor de proyección  $C_p$ :

Este factor se refiere al incremento de la corriente de falla en el sistema a futuro, debido a esto se considera un incremento del 25 %, quedando:

$$C_p = 1.25 \dots\dots\dots (3.9)$$

Ahora bien, sustituimos valores en la ecuación 3.5 se observa:

$$I_G = (7488.1765)(1.1224)(1.25)$$

$$I_G = 10,505.9116 \text{ [A]}$$

Para obtener los factores restantes de la ecuación 3.3, tomamos como referencia la tabla 3.5 “Constantes de materiales”.

Duración de falla $t_f$		Factor de decremento $D_f$			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Tabla 3.4. Valores típicos del  $D_f$ .

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor $\alpha$ a 20 °C	$K_0$ al 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión $T_m$ (°C)	$\rho_r$ 20 °C ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )	Factor de capacidad Térmica por unidad de volumen (d) TCAP [J/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{°C}$ )]
Cobre recocido suave - inmersión	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial inmersión - dura	97,0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Cobre revestido alambre de acero	40,0	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Cobre revestido alambre de acero	30,0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Cobre revestido barra de acero	20,0	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Acero 1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Acero revestido barra de acero	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Zinc bañado barra de acero	8,6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acero inoxidable 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

Tabla 3.5 Constantes de materiales.

Por lo que:

- ❖  $\text{TCAP} = 3.42$
- ❖  $\alpha_r = 0.00381$
- ❖  $\rho_r = 1.78$
- ❖  $K_0 = 242$

- ❖  $T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$  Este valor ha sido punto de discusión, debido a que algunos proyectistas utilizan el valor de  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , el cual corresponde a la máxima temperatura que soportan las conexiones soldables. Lo cierto es que ambos valores pueden ser aceptables con la diferencia que considerando las conexiones soldables se obtienen valores muy bajos de calibres por lo que da pauta a decidir el calibre del conductor de forma empírica y sin hacer cálculo alguno. Sin embargo, para este trabajo utilizamos el valor indicado en la norma, es decir el de  $1084 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- ❖  $T_{amb} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$  (dato del lugar de instalación).

Finalmente sustituyendo valores en la ecuación (3.3) se tiene que:

$$A_{kcmil} = 10,505.9116 \left( \frac{197.4}{\sqrt{\left( \frac{3.42}{(0.133)(1.78)(0.00381)} \right) \ln \left( \frac{242 + 1084}{242 + 38} \right)}} \right)$$

$$A_{kcmil} = 27.0073 \text{ [kcmil]}$$

Este valor según la tabla 3.6 “Diámetros de conductores” y la ecuación 3.4, corresponde a un calibre 4 AWG, sin embargo se requiere que el conductor de la malla tenga la suficiente resistencia mecánica para evitar que se rompa por el movimiento de la tierra o asentamientos normales del terreno (art. 921-24, (a) de la NOM-001-SEDE-2005); entonces, por estos requisitos de dureza, un conductor calibre mínimo 2/0 AWG es adecuado, pero por “costumbre” y experiencia, en nuestro país se coloca regularmente un calibre 4/0 AWG. Finalmente:

$$A_{AWG} = 4/0 \text{ [AWG]}; \quad \phi = 0.0134 \text{ [m]}$$

CALIBRE AWG O KCM		DIÁMETRO DEL COBRE mm	ÁREA DEL COBRE		DIÁMETRO TOTAL CON AISLAMIENTO	
			mm <sup>2</sup>	CM	TW VINANEL 900	THW VINANEL NYLON
ALAMBRES	14	1.63	2.08	4160	3.25	2.74
	12	2.05	3.30	6600	3.68	3.17
	10	2.59	5.26	10520	4.22	3.96
	8	3.26	8.34	16680	5.72	5.19
CABLES	14	1.84	2.65	5520	3.48	2.96
	12	2.32	4.22	8440	3.96	3.44
	10	2.95	6.83	13660	4.57	4.32
	8	3.71	10.80	21600	6.15	5.64
	6	3.91	12.00	26240	7.92	6.60
	4	5.89	27.24	41740	9.14	8.38
	2	7.42	43.22	66370	10.67	9.91
	1/0	9.47	70.43	105500	13.54	12.54
	2/0	10.64	88.90	133100	14.70	13.71
	3/0	11.94	111.96	167800	16.00	15.00
	4/0	13.41	141.21	211600	17.48	16.40
	250	14.61	167.64	250000	19.50	18.24
	300	16.00	200.96	300000	20.90	19.63
	400	18.49	268.51	400000	23.40	22.12
500	20.65	334.91	500000	25.60	24.28	

Tabla 3.6 Diámetro de conductores.

b) Cálculo de los potenciales tolerables:

➤ Potencial de paso tolerable:

Las ecuaciones que se utilizan son las correspondientes para personas con un peso aproximado de 50 kg ya que ofrece resultados más conservadores que con un peso de 70 kg según 5.4.2 de la norma NRF-011-CFE-2004, por lo que:

$$E_{\text{paso}} = [1000 + (6 \times C_s \times \rho_s)] \times \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \dots \dots \dots (3.10)$$

Donde  $C_s$  es el factor de reducción, este factor realiza una reducción de la resistividad normal de la capa superficial, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho_t}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \dots \dots \dots (3.11)$$

Sustituyendo valores se tiene que:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{53.74}{5000} \right)}{(2) 0.10 + 0.09}$$

$$C_s = 1 - \left( \frac{0.0890}{0.29} \right) = 0.6931$$

Otra forma de obtener el factor de reducción es tomando en cuenta a la figura 3.8 (esta gráfica corresponde a la figura No.11 de la norma IEEE Std.80 – 2000 Guide for Safety in Ac Substation Grounding) y considerando al factor de reflexión K, observamos que:  $C_s \approx 0.69$

Obteniendo el valor de  $K = \frac{\rho_t - \rho_s}{\rho_t + \rho_s}$  que en la grafica nos representa la curva, el valor del espesor de la capa superficial es el eje horizontal y el eje vertical es el valor del coeficiente de reducción  $C_s$ .

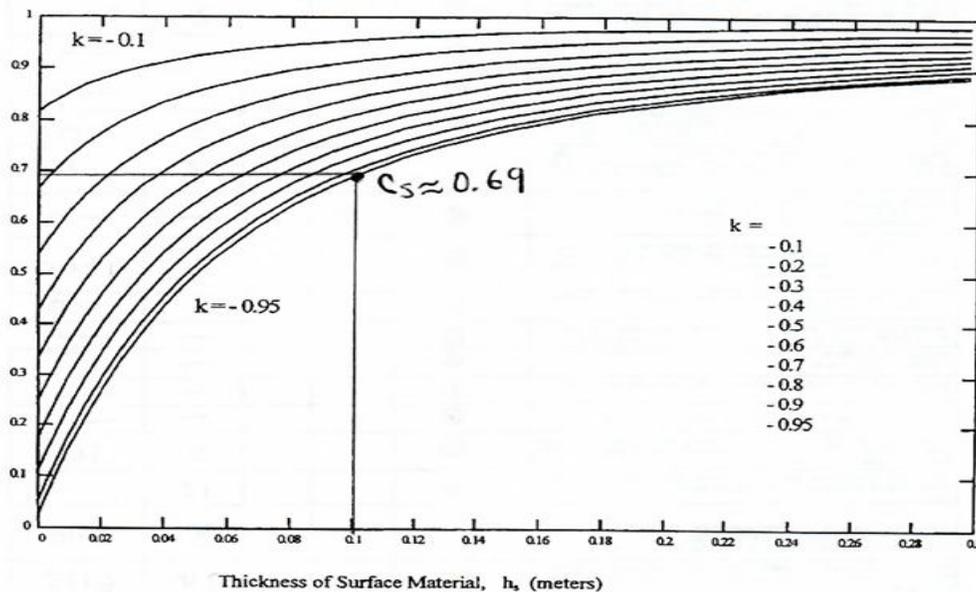


Figura 3.8 Gráfica de  $C_s$  v/s  $h_s$ .

Debido a lo anterior, sustituimos valores en la ecuación 3.10 y obtenemos:

$$E_{\text{paso}} = [1000 + (6 \times 0.6931 \times 5000)] \frac{0.157}{\sqrt{0.133}}$$

$$E_{\text{paso}} = 9,381.9011 \text{ [V]}$$

➤ Potencial de contacto tolerable:

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + (1.5 \times C_s \times \rho_s)] \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \dots\dots\dots (3.12)$$

Sustituyendo valores:

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + (1.5 \times 0.6931 \times 5000)] \frac{0.157}{\sqrt{0.133}}$$

$$E_{\text{contacto}} = 2,668.3507 \text{ [V]}$$

c) Disposición física:

La disposición física de la malla de puesta a tierra se observa en la figura 3.9, en donde se observa que el espaciamiento de los conductores longitudinales y transversales es el mismo, obteniendo así una malla rectangular con conexiones soldables entre conductores. Además se debe tomar en cuenta que el perímetro de la malla encerrará toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, con ello se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y en las terminales cercanas (art. 5.4.3 NRF-011-CFE, 9.2 inciso 3 del IEEE Std.80-2000).

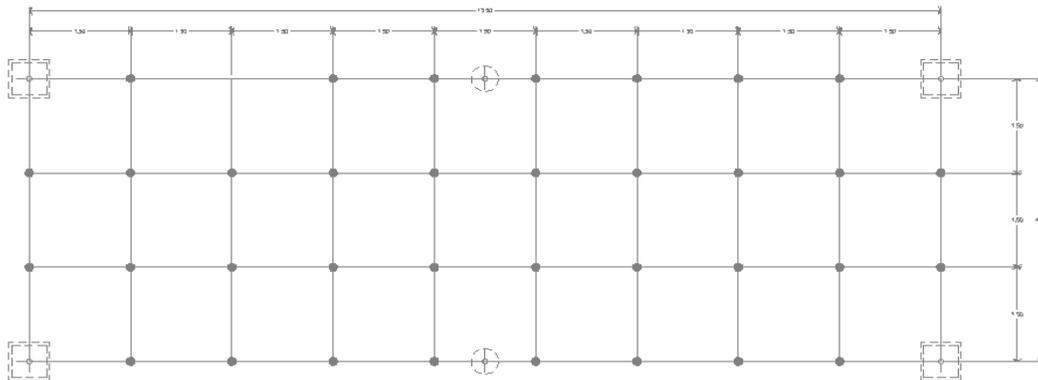


Figura 3.9 Malla de puesta a tierra.

d) Cálculo de la resistencia a tierra de la malla.

La resistencia a tierra de la malla se obtiene con la siguiente ecuación simplificada (ecuación de Severak), según 14.2 del IEEE Std.80-2000, pero nuestra malla consta de electrodos horizontales (malla) y electrodos verticales (varillas o rehilete) por lo que la ecuación correcta sería la hecha por Schwarz, y la ecuación de Severak es sólo para mallas sin varillas, sin embargo en este artículo y lo indicado en el 14.3 del mismo estándar indica que esta ecuación (Severak) ha probado que obtiene un resultado muy similar a la de Schwarz. Cabe mencionar que esta última (Schwarz) se basa en determinar la combinación de la resistencia de la malla, de los electrodos verticales y la resistencia mutua a tierra, entonces:

$$R_g = \rho_t \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{(20)(A_m)}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A_m}}} \right) \right] \dots\dots\dots (3.13)$$

En donde se observa que los parámetros que se desconocen son:

$L_T$  que es la longitud total de los conductores enterrados (cable y electrodos) y  $A_m$  que es el área cubierta por los conductores en  $m^2$ .

El primer término se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_T = L_c + L_v \dots\dots\dots (3.14)$$

Se sabe que  $L_c$  es la longitud de los conductores ( $L_{cond}$ ) y se calcula:

$$L_{cond} = L_c = (\# \text{ conductores transversales} \cdot a_r) + (\# \text{ conductores logitudinales} \cdot l_r) \dots (13.15)$$

$$L_c = (10 \times 4.50) + (4 \times 13.50)$$

$$L_c = 99 \text{ [m]}$$

Por otro lado  $L_v$  es la longitud de los electrodos (Varilla).

$$L_v = 6 \times 3.05 \text{ [m]}$$

$$L_v = 18.3 \text{ [m]}$$

Por lo que la longitud total es:

$$L_T = 99 + 18.3$$

$$L_t = 117.3 \text{ [m]}$$

El segundo término que hace falta es el Área de la malla:

$$A_m = l_r \times a_r \dots\dots\dots (3.16)$$

$$A_m = (13.50)(4.50)$$

$$A_m = 60.75 \text{ [m}^2\text{]}$$

Entonces sustituyendo valores se tiene en 3.13:

$$R_g = 53.74 \left[ \frac{1}{117.3} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 60.75}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.60 \sqrt{\frac{20}{60.75}}} \right) \right]$$

Finalmente:

$$R_g = 3.6705 \text{ [}\Omega\text{]}$$

- a) Cálculo de GPR (Elevación de potencial de tierra).

El GPR es el máximo potencial eléctrico de una subestación de malla aterrizada que puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto aterrizado que se asume como el potencial de tierra remoto. Si este valor se encuentra por debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno. Únicamente se requiere conductores adicionales para la puesta a tierra de los equipos (art. 5.4, paso 7 de la norma NRF-011-CFE-2004).

El GPR se calcula de la siguiente manera:

$$GPR = I_G R_g \dots\dots\dots (3.17)$$

Conocidos los valores de esta ecuación se obtiene que el GPR es:

$$\begin{aligned} \text{GPR} &= (10,505.9116) (3.6705) \\ \text{GPR} &= 38,561.9485 \text{ [V]} \end{aligned}$$

Como este valor es mayor que el potencial tolerable de contacto ( $E_{\text{contacto}} = 2,669.3194 \text{ [V]}$ ), se procede a calcular los potenciales reales que existirán en la malla.

b) Cálculo de la tensión de malla máxima.

$$E_m = \frac{(\rho_t)(K_m)(K_i)(I_G)}{L_m} \dots\dots\dots (3.18)$$

➤ Cálculo de  $K_m$ :

El factor  $K_m$  es el factor geométrico que toma en cuenta el espaciamiento para el voltaje de malla y se calcula de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \dots\dots\dots (3.19)$$

Donde:

$D$  es el factor de espaciamiento de los conductores paralelos.

$h$  es la profundidad de la red.

$d$  es el diámetro exterior del conductor de la red.

$K_{ii}$  es el factor de ponderación correctivo que se ajusta por los efectos de los conductores internos en la esquina de la malla y toma el valor de la unidad para las rejillas que tengan electrodos verticales en las esquinas y/o a su largo de su perímetro o dentro de la rejilla (art. 5.4, paso 8 de la norma NRF-011-CFE-2004).

$K_h$  es el factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla.

$n$  es el factor geométrico o también llamado el número de conductores equivalentes en cualquier dirección formado por las constantes  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ , y  $n_d$ .

Se observa que el factor de espaciamiento  $D$  ya es conocido (1.50 [m]), debido a la propuesta de la malla, pero se puede comprobar con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{2l_1l_2}{L - l_1 - l_2} \dots\dots\dots (3.19)$$

Donde:

$$l_1 = l_r$$

$$l_2 = a_r$$

$$L = L_c$$

Sustituyendo valores se comprueba:

$$\begin{aligned} D &= \frac{2(13.50)(4.50)}{99 - (13.50 + 4.50)} \\ D &= 1.50 \text{ [m]} \end{aligned}$$

También se observa el resultado de la 3.3 y obtiene el diámetro del conductor de la malla y que es igual a 0.0134 [m].

Obteniendo a  $K_h$ :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \dots\dots\dots (3.20)$$

De esta última se sabe que  $h_0 = 1 [m]$ , por ser la profundidad de referencia.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.60}{1}}$$

$$K_h = 1.2649$$

Obteniendo a  $n$  :

$$n = (n_a)(n_b)(n_c)(n_d) \dots\dots\dots (3.21)$$

Pero se sabe que  $n_c = 1$ ;  $n_d = 1$ , para mallas cuadradas y rectangulares (art. 16.5.1, ec. 85 del IEEE Std.80-2000).

Además:

$$n_a = \frac{2(L_c)}{L_p} \dots\dots\dots (3.22)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A_m}}} \dots\dots\dots (3.23)$$

Pero:

$L_p$  es la longitud perimetral de la rejilla en metros y se calcula de la siguiente manera:

$$L_p = (2 \times l_r) + (2 \times a_r) \dots\dots\dots (3.24)$$

$$L_p = (2 \times 13.50) + (2 \times 4.50)$$

$$L_p = 36 [m]$$

Sustituyendo valores en 3.22 y 3.23 respectivamente:

$$n_a = 5.5$$

$$n_b = 1.0745$$

Conociendo estos valores, se conoce el valor de 3.21:

$$n = (5.5)(1.0745)(1)(1)$$

$$n = 5.9097$$

Finalmente sustituyendo valores en la ecuación (3.19) se tiene:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[ \frac{(1.50)^2}{(16)(0.60)(0.0134)} + \frac{1.50 + (2 \times 0.60)}{(8)(1.50)(0.0134)} - \frac{0.60}{(4)(0.0134)} \right] + \frac{1}{1.2649} \ln \left[ \frac{8}{\pi[(2 \times 5.9097) - 1]} \right] \right\}$$

$$K_m = 0.3176$$

➤ Cálculo de  $K_i$ :

Este factor se refiere a la corrección que se tiene que hacer respecto a la geometría de la malla, también es llamado factor de irregularidad, se obtiene con la ecuación siguiente:

$$K_i = 0.644 + [(0.148)(n)] \dots \dots \dots (3.24)$$

Sustituyendo se tiene:  $K_i = 0.644 + (0.148 \times 5.9097)$

$$K_i = 1.5186$$

➤ Cálculo de  $L_m$ :

$L_m$  es la longitud efectiva de  $L_v + L_R$  para el voltaje de la malla y se obtiene con:

$$L_m = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_e}{\sqrt{(L_x)^2 + (L_y)^2}} \right) \right] L_R \dots \dots \dots (3.25)$$

En donde se observa que:

- $L_e$  = Longitud de un solo electrodo = 3.05 [m].
- $L_x$  = 13.50[m] (longitud máxima de la red sobre el eje x).
- $L_y$  = 4.50[m] (longitud máxima de la red sobre el eje y).
- $L_R = L_v = 18.3$ , longitud total de los electrodos instalados.

Finalmente:

$$L_m = 99 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{3.05}{\sqrt{(13.50)^2 + (4.50)^2}} \right) \right] 18.3$$

$$L_m = 132.15 \text{ [m]}$$

Toda vez, conocidos todos los valores requeridos, se sustituyen en la ecuación 3.18 y nos queda:

$$E_m = \frac{(53.74)(0.3176)(1.5186)(10,505.9116)}{132.15}$$

$$E_m = 2,060.5735 \text{ [V]}$$

c) Cálculo de la tensión de paso máxima.

$$E_{paso} = \frac{(\rho_t)(I_G)(K_s)(K_i)}{L_s} \dots \dots \dots (3.26)$$

➤ Cálculo de  $K_s$ :

Este es un factor geométrico referente al espaciamiento para el voltaje de la malla y se calcula como sigue:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2(h)} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{(n-2)}) \right] \dots \dots \dots (3.27)$$

Se observa que las incógnitas de esta ecuación ya se conocen, por lo que al sustituirlas nos queda:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2(0.60)} + \frac{1}{1.50 + .060} + \frac{1}{1.50} (1 - 0.5^{(5.9097 - 2)}) \right]$$

$$K_s = 0.6149$$

➤ Cálculo de  $K_i$

Este valor ya está calculado en párrafos anteriores y es:  $K_i = 1.9957$

➤ Cálculo de  $L_s$

$L_s$  es la longitud efectiva de  $L_v + L_R$  para el voltaje de la malla, se obtiene con:

$$L_s = 0.75(L_c) + 0.85(L_R) \dots\dots\dots (3.28)$$

$$L_s = [(99)(0.75) + (0.85)(18.3)]$$

$$L_s = 89.80 \text{ [m]}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 3.26, se tiene:

$$E_{\text{paso}} = \frac{(53.74)(10,505.9116)(0.6149)(1.5186)}{89.80}$$

$$E_{\text{paso}} = 5,870.8766 \text{ [V]}$$

De igual manera como se determinó el factor de espaciamiento, se realizará la comprobación del número de electrodos de puesta a tierra por medio de la ecuación (30), quedando:

$$N_c = (0.60)(\sqrt{A_r}) \dots\dots\dots (3.29)$$

$$N_c = (0.60)(\sqrt{60.75})$$

$$N_c = 4.67$$

$$N_c \approx 5 \text{ Electrodo tipo varilla de Copper-Weld.}$$

Esto nos indica que el numero de electrodos por medio de esta ecuación no siempre es el adecuado, pero nos arroja una idea muy cercana al valor que por proyecto se supone y que más tarde se comprueba (para este caso 6 electrodos tipo varilla Copper-Weld).

### 3.4.6 Conclusión.

Una vez que se obtuvieron los potenciales reales que existirán en la malla, se procede a comparar estos valores con los potenciales tolerables por el cuerpo humano, considerando:

$$E_m < E_{\text{Contacto Tolerable}} \dots\dots\dots (3.30)$$

$$E_{\text{paso}} < E_{\text{Paso Tolerable}} \dots\dots\dots (3.31)$$

Entonces sustituyendo valores en las ecuaciones 3.30 y 3.31 se tiene que:

$$2060.5735 < 2668.3505$$

$$5870.8766 < 9381.9011$$

Con lo anterior estamos cumpliendo lo indicado en el artículo 16 de la norma IEEE Std.80-200 Guide for Safety in Ac Substation Grounding.

A demás, se observa que la Resistencia tierra de la malla está por debajo del valor requerido por la norma NOM-001-SEDE-2005. Instalaciones Eléctricas (Utilización) en su artículo 921-25 (b), esto es:  $R_g = 3.6705 < 10 \text{ } [\Omega]$ .

Una vez calculada la malla, se indican los complementos mecánicos, eléctricos y notas de instalación de la misma. Finalmente se realiza la instalación. En la figura 3.10 se muestra una malla de puesta a tierra instalada en un establecimiento comercial, se observan los electrodos verticales (varillas tipo Copper-Weld) y los electrodos horizontales (malla). Además se observan las conexiones entre conductores de la malla por medio de soldaduras exotérmicas.



Figura 3.10 Malla de puesta a tierra.

Cabe mencionar que los electrodos verticales (varillas) pueden ser sustituidos por electrodos tipo rehilete en lugares en donde no se pueda instalar una varilla, ya que presenta una longitud mucho menor que la varilla, sin embargo para desarrollar el cálculo de la malla, se requiere la longitud del electrodo, la cual por lógica se indicaría la longitud de la varilla del propio rehilete, pero nos damos cuenta que es muy pequeña y que afectaría al cálculo, debido a esto algunos ingenieros asumen que la longitud del electrodo tipo varilla es compensada con el ancho y altura de las hojas del propio rehilete. Entonces, en el cálculo se considera la longitud de la varilla aunque se instale electrodo tipo rehilete, lo cual no cumple con norma, sin embargo este recurso es muy utilizado por proyectistas y constructores. En la figura 3.11 se observa un electrodo tipo rehilete con una altura desde la base hasta la punta de la varilla de 0.60 [m] y ancho de la hoja del rehilete de 0.40 [m].

En ocasiones el estudio de la resistividad del terreno nos arroja resultados que nos muestran que en el lugar de la instalación de la malla predominan las capas de conglomerado calizo de matriz arcillosa (roca), esto complica demasiado la instalación, por tal motivo existen varios métodos para solucionar el problema, uno de ellos es como se mencionó arriba, colocar electrodos tipo rehilete, pero no basta con esto, ya que la resistencia a tierra sigue siendo muy alta, por lo que se sugiere romper la roca e introducir bentonita (que tiene la propiedad de retención de agua, siempre y cuando el terreno se mantenga húmedo) o un compuesto comercial conocidos como "intensificador de tierras". El llenado de este material debe ser de 30 kg por cada registro de puesta a tierra, posteriormente rellenar con material orgánico vegetal (tierra negra) compactada a cada 0.20 m hasta llegar al nivel en donde se colocará el concreto. Además utilizar una proporción de 0.025 [m] abajo y arriba del conductor instalado (quedando éste en medio) de intensificador por cada 2.13 metros lineales de conductor, considerando una cepa de 0.10 [m] de ancho.

Es importante comentar que el uso de un medio químico como la sal para mejorar la resistividad es inadecuado, ya que se ha comprobado que ésta se diluye por presión osmótica en el terreno, y esto al principio, mejora la resistividad del terreno. Pero, al paso del tiempo, la corrosión que sufrió el metal en contacto con la sal y la disminución paulatina de la concentración salina, elevan nuevamente la resistividad.

Otro método para lograr la reducción que se desea en la resistencia de tierra es incrementar el diámetro de los electrodos al modificar el suelo alrededor del electrodo. La capa interna del suelo más cercana al electrodo mismo, normalmente comprende la mayor parte de la resistencia de tierra del electrodo hacia la tierra remota. El problema radica en que este método solo es válido utilizando componentes químicos, tales como cloruro de sodio, magnesio y sulfato de cobre o cloruro de calcio, así como el uso de bentonita, lo cual no es viable según lo indicado anteriormente (art. 14.5 IEEE Std.80-2000).

Como dato adicional, en un momento dado que los potenciales reales de la malla resultan muy elevados y el “costo beneficio” de modificar la malla a base de los métodos antes mencionados no es factible, se recomienda colocar una película de plástico entre la malla de tierras y la losa de concreto, para bajar dichos potenciales (IEEE Std.80). Sin embargo, en nuestro país esta solución no es muy usual y por lo tanto no probada.

En ocasiones se llega a instalar subestaciones en la azotea del establecimiento, de tal manera que un sistema de puesta a tierra no puede instalarse, para esto se emplea el procedimiento de tierra remota, y en donde se instalen los electrodos sí se tiene que considerar el potencial de paso y de contacto.



Figura 3.11 Electrodo de puesta a tierra tipo rehilte.

Un punto importante el buen funcionamiento del sistema de puesta a tierra es la medición constante de la resistencia a tierra, ya que ésta varía con el paso del tiempo, debido a diversos factores, tales como aumento de la resistividad de la ubicación de los electrodos por la reducción gradual de los métodos para “bajar” este valor, variación de las características del terreno, etc. Entonces, esta actividad (medición de la resistencia a tierra) es radical en la malla, por tal motivo se recomienda que por lo menos se consideren un par de registros de puesta a tierra con acceso libre a los electrodos. También se debe verificar la medición de la puesta a tierra de las partes metálicas de los equipos eléctricos. En la figura 3.12 se muestra la medición de un electrodo tipo varilla y en la figura 3.13 la de la puesta a tierra de la carcasa de un transformador.

En conclusión, para que el sistema de puesta a tierra de resultados satisfactorios durante largo tiempo, es necesario a parte de un buen diseño, un mantenimiento preventivo para evitar contingencias que den origen a eventos irreparables. En la figura 3.14 se observa el deterioro de una barra de puesta a tierra colocada en el exterior, se observa que no hay ninguna protección contra la corrosión y daños físicos.



Figura 3.12 Medición de un electrodo de puesta a tierra.



Figura 3.13 Medición de la puesta a tierra de carcasa.



Figura 3.14 Barra de puesta a tierra en mal estado.

### 3.5 Otros sistemas de puesta a tierra y la equipotencialidad entre ellos.

Los sistemas de puesta a tierra muchas veces son mal interpretados debido a su naturaleza y función, ya que existen sistema de puesta tierra de pararrayos, sistema de puesta a tierra de subestación, sistema de puesta a tierra para telecomunicaciones, sistema de puesta a tierra de sistemas derivados separadamente, entre otros. Esto ha dado origen a que cada uno presente “independencia entre sí con el fin de evitar aportaciones de corrientes indeseables en cada sistema”, sin embargo esto es incorrecto ya que debe existir una equipotencialidad de los

sistemas para evitar la aparición de voltajes peligrosos en cada uno de los sistemas, debido a la distribución del potencial en el momento de falla, así como se indica en la figura 3.1.

La NOM-001-SEDE-2005 indica en su artículo 250-81 que los “electrodos que se encuentren en la misma propiedad, en cada edificio o estructura perteneciente a la misma, deben de interconectarse entre sí”. De la misma manera en la sección 9.10.16 del IEEE Std.1100-2005 (libro esmeralda), recomienda claramente la unión de los distintos sistemas de electrodos.

La justificación de la no interconexión de los sistemas de puesta a tierra que muchos ingenieros (principalmente ingenieros en telecomunicaciones) comentan, es que las corrientes de falla o descarga que fluyen por la malla provenientes de otros sistema de puesta a tierra, tales como el de pararrayos o el de la subestación provocan fallas en los dispositivos electrónicos, debido a las “altas frecuencias” y por lo tanto los sistemas deben estar separados.

Si bien, un sistema de puesta a tierra para los sistemas de comunicaciones debe ofrecer un camino seguro para las descargas de corrientes de fallas, descargas atmosféricas, descargas estáticas y señales de interferencia electromagnética y radiofrecuencia (EMI y RFI), un sistema de puesta a tierra coordinado, debe reducir fundamentalmente la posibilidad de que aparezcan tensiones importantes entre elementos metálicos adyacentes. No obstante, es necesario tomar medidas suplementarias, (protectores, descargadores, dispositivos activos de supresión de transitorios, etc.), en todo lo que esté referido a cables, conexiones y posibles vías de ingresos de transitorios que pueden provocar daños en forma parcial o total de los equipos.

Los equipos electrónicos no trabajan satisfactoriamente cuando se presentan transitorios o interferencias. Los primeros originan un sobre-esfuerzo eléctrico que es la causa mayor de fallas de los componentes electrónicos de los puertos de interconexión de datos y los de control en bajo voltaje y se origina por diversas causas: descargas atmosféricas, por las maniobras de interrupción de cargas inductivas o por descargas electrostáticas. Este sobre-esfuerzo es causado por voltajes de una magnitud de decenas de volts a varios miles de volts y con duración de unas decenas de nanosegundos a unas centenas de microsegundos. Los que se conocen normalmente como "picos" de voltaje". Ningún cable enterrado, ni siquiera los de potencia, son inmunes a los transitorios provocados por las descargas atmosféricas. La buena noticia es que estos transitorios se eliminan mediante componentes conectados a tierra del sistema.

Las corrientes provocadas por las descargas atmosféricas prefieren viajar por conductores metálicos más que por la simple tierra, porque representan un camino de menor impedancia. Esto destruye el aislamiento, además, las descargas también causan una diferencia de potencial entre el blindaje y los conductores internos, que puede destruir componentes electrónicos en la interconexión, ya que los cables y sus circuitos de conexión deben soportar los voltajes máximos que se puedan obtener entre los extremos de los cables. Cuando es muy grave el problema debido a la interconexión de los conductores de los diferentes sistemas de puesta a tierra, los conductores se prefieren del tipo de fibra óptica. Otra solución utilizada es el interconectar los distintos sistemas de puesta a tierra, mediante conexiones a una red de tierra perimetral adicional, para lograr el mismo potencial a tierra en cualquier lado.

En lo referente a las interferencias podemos mencionar a grandes rasgo tres tipos:

- *Interferencia causada por armónicas.* Las armónicas se generan en fuentes de poder de tipo conmutada de computadoras y en los variadores de frecuencia, entre otros lugares. Su efecto en los equipos electrónicos se mitiga incrementando calibres de conductores, cambiando el diseño y configuración del transformador de alimentación y usando filtros activos. Los filtros pasivos compuestos de capacitores e inductores no son generalmente efectivos (excepto como protección de bancos de capacitores) porque la frecuencia de corte del filtro tiene que ser muy cercana a la fundamental, lo que es prácticamente imposible de diseñar en un filtro de este tipo.
- *Interferencia en radiofrecuencia.* La interferencia por radiofrecuencia, RFI por sus siglas en inglés, es causada principalmente por transmisiones radiales. Sin

embargo, este tipo de interferencia también es producida por los componentes electrónicos trabajando a altas frecuencias. En los equipos electrónicos su efecto se minimiza con un buen blindaje en cables y en los mismos equipos. Aunque, la mejor manera de acabar con la RFI es blindar el ruido directamente en su fuente. Los blindajes mencionados para ser efectivos se deben conectar a la tierra del sistema (tierras aisladas).

- *Interferencia electromagnética.* Este tipo de interferencia, conocido por sus siglas en inglés EMI, es ruido eléctrico que se manifiesta como un voltaje en un sistema eléctrico. Sus fuentes son las mismas que generan la interferencia en radiofrecuencia. Este tipo de interferencia en los equipos electrónicos se corrige conectando todo a una única puesta a tierra del sistema.

Como se puede observar, los efectos en los equipos electrónicos provocados por estos fenómenos se eliminan mediante la conexión adecuada de los componentes a una referencia de tierra, sin embargo esta conexión se debe realizarse con cables con aislamiento, a este método se le llama “tierra aislada”.

Existen varios métodos de puesta a tierra aislada pero la mayoría tienen limitantes con las altas frecuencias por lo que el método menos problemático es el siguiente:

Se conoce como esquema de malla de referencia para una sala o centro de cómputo, con piso falso, consiste en utilizar los travesaños e interconectarlos como soportes de suelo y plano de tierra, la cerámica del piso encaja en los travesaños, permitiendo el acceso al interior del piso. Al ofrecer un plano de referencia de tierra, baja la impedancia a tierra en todas las frecuencias. En el mercado se conoce dicha malla como Signal Reference Grid (SRG) y la comercializa la compañía Erico entre otras y solo debe cumplir dos aspectos:

- Emplear travesaños atornillados.
- Usar elementos compatibles entre sí, de manera que se puedan efectuar conexiones a presión de baja resistencia.

La tierra aislada es la tierra de referencia cero para la lógica digital y la mantiene libre de ruidos eléctricos. El propósito es mantener los equipos eléctricos sensibles protegidos de los ruidos eléctricos producidos en los bucles de tierra y de múltiples conexiones a tierra. El calibre del cable es crucial para los modernos circuitos electrónicos. Algunas bibliografías argumentan que el conductor de puesta a tierra aislada debe ser continuo, de calibre igual a los conductores portadores de corriente, pero según norma esto no está indicado, ya que la NOM-001-SEDE-2005 en su artículo 210-5, (b) solo indica que este conductor debe tener aislamiento de color verde o con franjas amarillas. La justificación que se puede encontrar al respecto pero no válida por norma es que el calibre debe ser igual al de las fases, debido a que cuanto más grande sea el grosor del conductor, menor será la impedancia de retorno al sistema de conexión a tierra del edificio, y cuanto más baja sea la impedancia la lógica será más pura (libre de ruidos eléctricos), en consecuencia el resultado es un mejor funcionamiento del sistema.

La tierra aislada aísla la tierra del equipo sensible del sistema de puesta a tierra de canalizaciones y controla la conexión al sistema de puesta a tierra de fuerza, así los cambios en el potencial de tierra debidos a corrientes inducidas de tierra que fluyen por las canalizaciones son eliminadas. Si estas corrientes circulan por los conductores de datos, comunicación y control, el cableado de tierra aislada puede contribuir al ruido en modo común (cualquier señal eléctrica indeseable que es común a todos los conductores del circuito simultáneamente con respecto a tierra), por ejemplo la diferencia de potencial entre el neutro y la tierra, otra forma y las más drástica es la diferencia de potencial entre los sistemas de puesta a tierra del sistema eléctrico.

Finalmente, se debe entender que la independencia de los sistemas de puesta a tierra es cosa del pasado y que la equipotencialidad es lo primordial para un buen funcionamiento. Estamos conscientes que la aportación de corrientes y voltajes indeseables en los sistemas de puesta a tierra de equipo sensible es difícil de eliminar y que descifrar la cantidad exacta de corrientes

en alta frecuencia es imposible, así como la cantidad exacta de armónicas presentes en un sistema no se puede dar con precisión y que las improvisaciones para el ensayo y error no tiene cabida en nuestra profesión, esto se lo debemos dejar a los científicos, ya que nosotros como ingenieros debemos de “caminar” por lo seguro.

Sin embargo existen muchos fabricantes que proporcionan soluciones “mágicas” o “artesanales” para evitar los problemas antes dichos, por ejemplo, existe en el mercado un dispositivo llamado “bobina de choque” que se vende con la firme idea de solucionar el problema de la equipotencialidad y las altas frecuencias, pero el estudio a fondo de este dispositivo ha comprobado su ineficiencia para estos valores de frecuencias, ya que se comporta como un circuito abierto y que en un momento dado la bobina puede generar sobretensiones, las cuales ocasionan serios problemas. Lo mismo sucede con la famosa “vía de chispas”; su funcionamiento es como un diodo y por lo tanto en altas frecuencias se comporta también como circuito abierto y no existe equipotencialidad en los sistemas.

Para concluir el tema de la interconexión de los sistemas de puesta a tierra, se mencionan dos ejemplos de problemas suscitados en la vida real, debido a una mala interconexión.

- Si bien, el desarrollo de grandes diferencias de voltaje entre gabinetes conectados a electrodos separados cuando se presenta una descarga atmosférica no es común, durante una visita que realizaron unos ingenieros especialistas en el ramo a una planta de generación de energía eléctrica en Altamira, Tamaulipas, un empleado relató lo siguiente:

“Yo estaba en el cuarto de control y vi el resplandor de una descarga atmosférica seguida casi inmediatamente de un gran trueno y chispas en la parte posterior del tablero que contiene el sistema de control de la planta. El daño en las tarjetas electrónicas hizo operar indebidamente una válvula de gas y a los pocos segundos se disparó la planta. Nos llevó algunas horas cambiar las tarjetas para reiniciar la operación de la planta”.

Se encontró que el sistema de puesta a tierras general estaba unido al sistema de puesta a tierra del sistema de pararrayos, a la malla de la subestación, a la malla de la cerca, a los conductores de guarda de la línea de 115 kV, así como a los hilos de retenida. Sin embargo, un grupo de tres electrodos no tenía unión, sino a través del terreno con el resto de los electrodos. Se informó que esos electrodos eran propios de los termopares y la instrumentación. Esa fue la causa del arqueo en el tablero de control, la puesta a tierra de la instrumentación estaba asilada del resto de los sistemas puestos a tierra.

- En un edificio corporativo de Nuevo León, se presentaba el problema de que la imagen de un proyector de vídeo era inestable. Al apagar un grupo de cargas la imagen se volvía estable. Con las cargas prendidas el campo magnético de 60 [Hz] alrededor del proyector era de 23 [mG]. Al apagar las cargas el campo magnético disminuía a menos de 3 [mG]. Posteriormente se encontró que en varios puntos los conductores puestos a tierra se habían unido a canalizaciones de comunicación, estas canalizaciones están puestas a tierra ya que iban soportadas con continuidad eléctrica a la estructura metálica del edificio. Al medir la corriente enlazando todos los conductores eléctricos dentro de la canalización medimos 18 [A]. De manera tal que concluimos que este amperaje en lugar de retornar por los neutros (conductores puestos a tierra) retornaban por otros ductos metálicos y esa corriente originaba campos magnéticos intensos.

La interconexión de las redes de puesta a tierra no debe limitarse exclusivamente a los sistemas de electrodos, deben instalarse apropiadamente los cableados de las llamadas tierras electrónicas, así como los conductores de puesta a tierra de las carcasas de los sistemas y equipos (art. 250-57, 250-122) con el objeto de asegurarse que estén conectados a tierra en un único punto. Se debe poner a tierra a los soportes para conductores tipo charola (art. 318-7), las cajas de conexión (art. 250-112 y 370-40), así como la puesta a tierra de los luminarios (sección E del artículo 410), etc. Todos los artículos hacen referencia a la NOM-001-SEDE-2005.

Es increíble que en la actualidad existan instalaciones en las que se omiten parte o casi por completo el sistema de puesta a tierra, en la figura 3.16 se muestra luminarios que no tiene la conexión de puesta a tierra, así como en la figura 3.15 se muestra que la caja de conexiones no presenta ningún conductor de puesta a tierra. Estos ejemplos nos dan muestra de lo antes comentado. También en la figura 3.17 se muestra una conexión a tierra improvisada y en mal estado, esto definitivamente no cumple con la norma, además que eléctricamente no garantiza un buen contacto, es decir no representa una puesta a tierra eficaz.

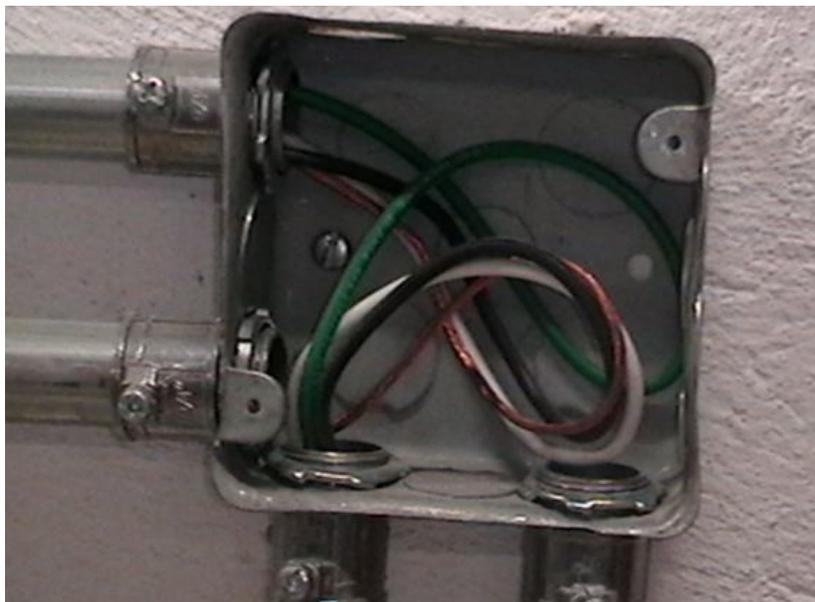


Figura 3.15 Caja de conexiones sin puesta a tierra.



Figura 3.16 Luminario sin conductor de puesta a tierra



Figura 3.17 Conexión incorrecta del conductor de puesta a tierra.

### 3.6 Conceptos generales del sistema de pararrayos.

#### 3.6.1 Justificación.

Las contingencias eléctricas ocasionadas por descargas atmosféricas pueden resultar no muy comunes en las instalaciones de media-baja tensión y que solo se presentan si el establecimiento no cuenta con un sistema de pararrayos, o cuando llega a suceder lo atribuyen a que la descarga “fue demasiado grande”. Sin embargo estas fallas existen y se deben principalmente a una mala selección de la punta pararrayos, así como una instalación inadecuada, muchas veces se realiza el sistema de pararrayos en base a lo que los fabricantes indican en sus catálogos y no se revisan las normas correspondientes (asumiendo que algunas puntas pararrayos no tienen justificación por norma). El conocer el origen de las descargas y los medios de protección siempre es una ventaja respecto al “conocimiento” adquirido por pruebas y experiencia.

El objetivo básico de un estudio de sistemas de pararrayos consiste en definir un proyecto que permita construir las instalaciones eléctricas para protección razonablemente confiable contra descargas atmosféricas, los planos eléctricos deberán mostrar la ubicación y las principales características de dispositivos, los dibujos se deberán representar con el suficiente detalle que permita su interpretación en campo y la adecuada construcción, adicionalmente, se deberán respetar las especificaciones de las normas obligatorias en el lugar de la instalación, así como las preferencias del usuario.

Muchas veces se realizan construcciones con una altura considerable y se supone que por no ser tan alta, no requiere un sistema de pararrayos, además que se “asume” que en esa área geográfica no se presentan con regularidad impactos de rayo, sin embargo el estudio correcto de este sistema indica que se deben evaluar entre otros puntos, el factor de riesgo que presenta el lugar, considerando la densidad de rayos a tierra. Los daños que se pueden producir por no instalar pararrayos suelen ser catastróficos, por ejemplo, en estructuras de concreto armado donde se supone que las varillas tiene continuidad hasta la cimentación, la descarga puede destruir secciones, especialmente entre el punto que recibe el impacto del rayo y la estructura más próxima, y en el punto de la cimentación por donde tendrá que disiparse la energía del rayo a tierra. En la figura 3.18 se observa una estructura después de ser impactada por un rayo y los daños provocados a la misma.



Figura 3.18 Estructura dañada por una descarga atmosférica.

### 3.6.2 Formación de una descarga atmosférica y la protección adecuada.

Para entender el funcionamiento del sistema de pararrayos y determinar el adecuado para el establecimiento, es necesario conocer el origen de las descargas atmosféricas, ya que no todas terminan impactando a las estructuras. Para esto comencemos por definir que las descargas de energía entre nubes se les llaman “centella” y las que se originan entre nubes y tierra “rayos”.

Dado que las nubes son las productoras de rayos debemos comprender su formación hasta llegar a formar una tormenta eléctrica, ya que dichas nubes pasan por una serie de procesos antes y después de la descarga de energía. En la formación de una nube intervienen grandes procesos de calor atmosféricos cuyos agentes básicos de transferencia de calor son la entrada de energía del sol y el vapor de agua. Las nubes se forman cuando una masa de aire cargada de humedad se calienta y se eleva por la atmósfera.

Conforme el aire gana altura, la presión atmosférica disminuye gradualmente, dando lugar a que el aire se dilate originando una caída de temperatura. Conforme el aire húmedo sigue elevándose el vapor de agua llega a condensarse alrededor de partículas de polvo, cuando ocurre esta condensación se libera calor latente, esta liberación de energía se da cuando el agua cambia de estado líquido a gaseoso y viceversa. Gracias a esta liberación de energía el aire sigue ascendiendo y ganando altura. Como estos eventos ocurren a diferentes alturas y diferentes condiciones atmosféricas los tipos de nubes que se forman son diversos. Todas las nubes son diferentes y como se mencionó no todas son productoras de rayos, el único tipo de nube que puede llegar a formar un rayo son los cumulonimbos, comúnmente llamados nubarrones. Este tipo de nubes, toma una forma muy extensa tanto horizontal como verticalmente. Su forma, muy característica, es a menudo comparada al perfil de un yunque, del cual se desprenden los planos inferiores y superiores horizontales. La existencia en un cumulonimbo de altos gradientes de temperatura (la temperatura puede bajar hasta - 65° C en la parte superior), provoca corrientes de aire ascendentes muy rápidas, lo que genera una electrización de las partículas de agua (gran generación de cargas estáticas por fricción).

En una nube de tormenta típica, la parte superior, constituida por cristales de hielo, está cargada generalmente de forma positiva, mientras que la parte inferior, constituida por gotitas de agua está cargada negativamente. En consecuencia, la parte inferior de la nube provoca el desarrollo de cargas de signos opuestos (por lo tanto positivas en la parte del suelo que se encuentra en la proximidad). El cumulonimbo implica por lo tanto la generación de un gigantesco condensador plano, nube-suelo, cuya distancia alcanza a menudo 1 ó 2 km. En condiciones de tiempo normales el campo eléctrico, desarrollado es del orden de un centenar

de volts por metro. Durante la formación de nubes de tipo cumulonimbo, el campo eléctrico desarrollado puede alcanzar hasta 15 a 20 kV/m en valor absoluto, siendo éstas las condiciones ideales para generar una descarga atmosférica en el suelo (rayo). Otra forma de llamar a este tipo de nubarrón es nube de tormenta que es la nube "lista" para presentar descargas atmosféricas, esperando que la rigidez dieléctrica del aire se pierda. Entonces la carga del nubarrón queda distribuida como se muestra en la figura 3.19.

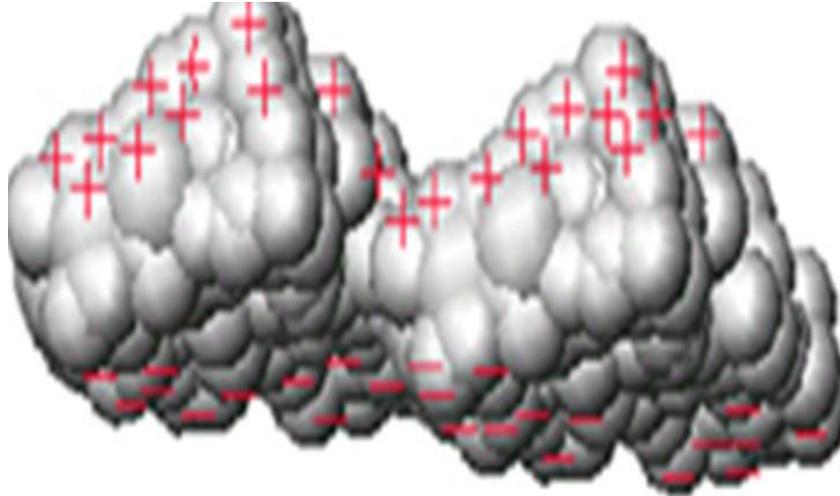


Figura 3.19 Cargas eléctricas en nubarrón.

Antes y durante la aparición del rayo, se pueden observar descargas intranube (en el seno de la propia nube) o internube (entre dos nubes distintas). El tipo de rayo más estudiado es que ocurre entre nube-tierra. Estas descargas son del orden de microsegundos y son circuitos cerrados: empiezan en la nube, pasan por la tierra y terminan en la nube. El rayo que rompe la rigidez dieléctrica del aire se llama "líder" y a éste lo siguen los demás. Cabe mencionar que existen también rayos entre tierra-nube, es decir en sentido contrario a los de nube-tierra, como se muestra en la figura 3.20 y 3.21, respectivamente.

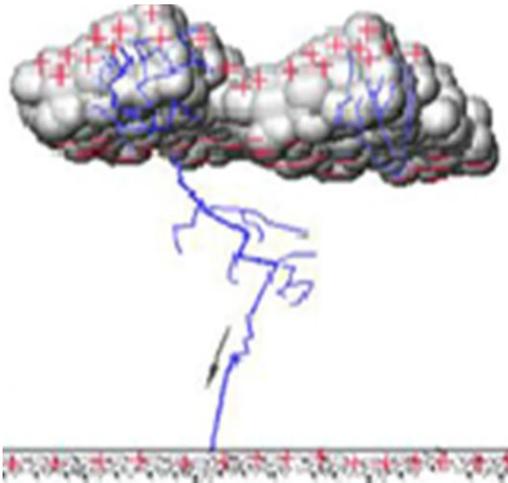


Figura 3.20 Descarga entre nube-tierra.

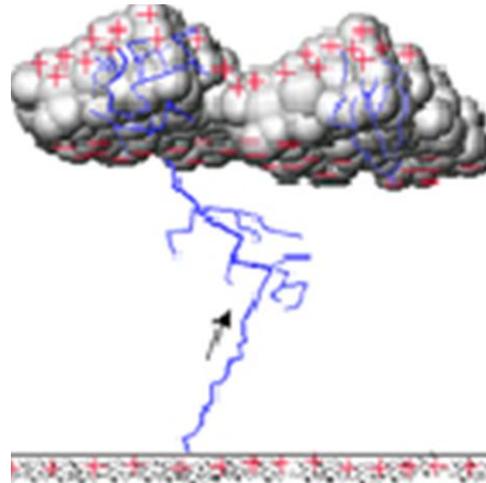


Figura 3.21 Descarga entre tierra-nube.

Es importante mencionar que los rayos se manifiestan de diversas formas y son el resultado de una corriente de tipo impulsivo de fuerte intensidad que se propaga en primer lugar en un medio gaseoso (la atmósfera), luego en un medio sólido más o menos conductor (el suelo). Los efectos se enlistan a continuación:

- *Efecto luminoso:* Se refiere a los relámpagos.
- *Efecto sonoro o acústico:* Este efecto hace referencia a la propagación de una onda de choque mecánica en el aire cuyo origen es el canal de descarga; la percepción de este efecto comienza a partir de una decena de km. A este efecto se le conoce también como trueno.
- *Efecto térmico:* Las liberaciones de calor por el efecto Joule en el canal ionizado es lo que este efecto, representa.
- *Efecto electrodinámico:* Corresponde a las fuerzas mecánicas de las que son objeto los conductores colocados en el campo electromagnético creado por esta circulación de corriente intensa, pudiendo dar como resultado deformaciones en los materiales que se hallan a su paso.
- *Efecto electroquímico:* Relativamente menores, este efecto se traduce por una descomposición electrolítica por aplicación de la ley de Faraday.
- *Efecto de inducción:* En un campo electromagnético variable, cualquier conductor es proclive a corrientes inducidas.
- *Efecto sobre un servicio (humano o animal):* El paso de una corriente de una cierta intensidad, durante una corta duración es suficiente para provocar riesgos de electrocución por ataque cardíaco o respiratorio a lo que hay que añadir los riesgos de quemaduras.

Entonces, hasta el momento nos queda claro, que las descargas atmosféricas son fenómenos que pueden dañar considerablemente tanto a las estructuras como a las personas y por lo tanto debemos protegernos. El elemento que nos puede proporcionar esta protección es el pararrayos.

Se denomina en general, pararrayos a los dispositivos que son destinados a descargar hacia la tierra del planeta las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, de modo que no dañe a las personas y equipos. Los pararrayos son sistemas integrales de protección que constan de un sistema externo y en caso de definirse la necesidad de protección de equipos y sistemas sensibles debe especificarse un sistema de protección de tipo interno. Es decir puede constituirse por dos subsistemas: externo e interno.

El sistema externo es conformado por los elementos de captación, bajantes y SPT (sistema de puesta a tierra). Existen varias tecnologías para los sistemas de captación, sin embargo este un tema polémico y hasta el momento existen algunas que son aceptadas por normas y documentos técnicos normativos, un ejemplo son las puntas Faraday. El sistema interno consta de supresores de picos y otros accesorios los cuales tiene como objetivo desviar a tierra las corrientes de descarga y las ondas de sobretensión inducidas por la descarga atmosférica.

Los pararrayos consisten en un mástil, una base y una punta o cabeza captora. Esta última puede tener muchas formas en función de su principio de funcionamiento. Independientemente del tipo de punta, ésta se encuentra unida a la tierra del planeta mediante un conductor especial para pararrayos, regularmente es trenzado y de diferentes números de hilos.

Debido a la forma y características del pararrayos, la densidad de carga en la punta es tal que ioniza el aire que lo rodea, de modo que las partículas de aire cargadas positivamente son repelidas por el pararrayos y atraídas por la nube, realizando así un doble objetivo:

- Por una parte, se produce una compensación del potencial eléctrico al ser atraídos esos iones del aire por parte de la nube, neutralizando en parte la carga. De esta forma se reduce el potencial nube-tierra, esto marca el límite entre el comportamiento dieléctrico y el conductor del aire, y por tanto previenen la formación del rayo.

- Por otra, conducen al rayo a tierra ofreciéndole un camino de menor resistencia. Este camino lo formarán el pararrayos, los conductos de descarga y el sistema de puesta a tierra.

Un fenómeno que debemos tener en cuenta es el de "disipación natural", que es producida por los arboles, vallas, rocas y demás objetos de forma puntiaguda, ya sean natural o artificiales, sometidos al campo eléctrico de la nube de tormenta, que irán produciendo esa compensación de potencial de forma natural, produciendo la neutralización de la carga de la nube, o al menos, reduciéndola significativamente, con lo que se disminuye el riesgo al llegar la nube sobre zonas habitadas o peligrosas.

El diseño de un sistema integral de protección contra rayos obedece a un análisis particular de cada instalación, en el cual se tome en cuenta los niveles isoceraúnicos de la zona, la importancia de la instalación, los riesgos que representan las sustancias que pueden manejarse, la vida de las personas, etc. De manera que la decisión del tipo de configuración del sistema depende de un análisis de riesgos y es a partir de ahí que se lleve a cabo la protección.

### 3.7 Diseño, cálculo y especificaciones del sistema de pararrayos.

El realizar un buen diseño del sistema de pararrayos requiere varias cosas que no son triviales. No se trata de poner una punta aquí, otra allá y listo. Se trata de un desarrollo de ingeniería el cual implica sistemas captadores, bajantes, sistema de puesta a tierra y medidas de protección contra efectos secundarios del rayo, especialmente cuando existen sistemas sensibles, tales como equipos electrónicos, etc.

Para el diseño del sistema de pararrayos se debe tomar en cuenta todo lo indicado en las normas nacionales y las internacionales si así fuese el caso, esto es cumplir con lo indicado en la NOM-022-STPS-2008, la NOM-001-SEDE-2005 y NMX-J-549-ANCE-2005 en el caso de los requerimientos nacionales y la norma internacional NFPA-80.

Cabe mencionar que, existen otras normas internacionales, tales como la UNE-21186, NFC-17102 o la NP-4426, que son normas aplicables a pararrayos con dispositivo de cebado (PDC) y que solo en estas normas se han incluido la justificación técnica de este tipo de punta.

Independientemente del tipo de punta seleccionado el procedimiento de cálculo del sistema de pararrayos debe seguir cierta orden, tomando en consideración que el patrón tiene la obligación de establecer las condiciones de seguridad para controlar la generación y acumulación de las cargas eléctricas estáticas y prevenir los posibles efectos de las descargas atmosféricas en el lugar (art. 5.2 NOM-022-STPS-2008), además que debe capacitar a los trabajadores que estén en riesgo de exposición con elementos susceptibles de ser cargados electrostáticamente ( art. 5.5 NOM-022-STPS-2008). A continuación se muestra una lista de pasos que se recomiendan para determinar el sistema de pararrayos:

- i. Se requiere determinar el riesgo e índice de impacto.

La valoración de riesgo es una medida empírica, la cual estima en forma razonable, la probabilidad de incidencia de un rayo directo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo (art. 4.2 NMX-J-549-ANCE-2005).

La decisión de dotar a una estructura con un sistema de pararrayos, así como la selección del nivel de protección adecuado, se basa en la frecuencia esperada de impactos sobre la estructura o la zona a proteger, dada por  $N_0$  y la frecuencia de rayos, promedio permitida anualmente  $N_d$ , esto es:

$$N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6} \dots\dots\dots (3.31)$$

(art. 4.2.1 NMX-J-549-ANCE-2005)

Donde:

$N_0$  es la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura.

$N_g$  es la densidad promedio anual de rayos de tierra por  $km^2$  (densidad de rayos a tierra, DRT), ver mapa isoceráunico del apéndice D de la norma NMX-J-549-ANCE-2005.

$A_e$  es el área equivalente de captura de la estructura, en  $m^2$ .

Para obtener la frecuencia anual permitida de rayos directos a una estructura  $N_d$ , que no es más que el riesgo permitido de incidencia de un rayo directo a una estructura de acuerdo al tipo de estructura, uso y contenido (art. 4.2.2 NMX-J-549-ANCE-2005). Los valores se encuentran definidos en la siguiente tabla.

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
Granja	Riesgo principal de incendio y 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
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
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
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, 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
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0,02
Edificios de 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
<b>NOTAS</b>		
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), debe instalarse un SEPTÉ.		

Tabla 3.7 Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes.

El área equivalente de captura de la estructura, se calcula con las siguientes ecuaciones, dependiendo de la clasificación en que se encuentre. Esto es:

- Para una estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo plano y de dos aguas, se calculan con las ecuaciones siguientes (art. 4.2.3 NMX-J-549-ANCE-2005):

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \dots\dots\dots (3.32)$$

Donde:

$A_e$  es el área equivalente de captura en  $m^2$ .

$a$  es la longitud de uno de los lados de la estructura en m.

$b$  es la longitud de otro lado de la estructura en m.  
 $h$  es la altura de la estructura en m.

Esta ecuación se refiere a un área de captura equivalente para una estructura con techo plano y terreno plano.

$$A_e = ab + 6hb + 9\pi h^2 \dots\dots\dots (3.33)$$

Donde los parámetros son iguales a los anteriores, pero la ecuación se refiere a un área de captura equivalente para una estructura con techo de dos aguas y terreno plano.

- Para una estructura aislada ubicada en terreno irregular, se calcula como:

$$A_e = ab + 6h_e(a + b) + 9\pi h_e^2 \dots\dots\dots (3.34)$$

Donde:

$A_e$  es el área equivalente de captura en  $m^2$ .  
 $a$  es la longitud de uno de los lados de la estructura en m.  
 $b$  es la longitud de otro lado de la estructura en m.  
 $h_e$  es la altura equivalente de la estructura en el terreno irregular en m.

- Para una estructura con otras adyacentes, se calcula primero las distancias correspondientes con la siguiente ecuación y posteriormente el área equivalente de captura:

$$X_s = \frac{d + 3(h_s - h)}{2} \dots\dots\dots (3.35)$$

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.  
 $d$  es la distancia horizontal entre la estructura y el objeto vecino en m.

Una vez obtenido el valor de  $N_0$  debe compararse con el valor de la frecuencia media anual permitida  $N_d$  para evaluar la necesidad de protección, considerando lo siguiente:

- Si  $N_0 \leq N_d$  el sistema de pararrayos es opcional.  
 Pero se debe tener en cuenta que existe la posibilidad de que un rayo incida sobre la estructura, ya que el cálculo de  $N_0$  es estimado.
- Si  $N_0 > N_d$  el sistema de pararrayos es obligatorio.

Para este segundo caso el sistema de pararrayos debe contener por lo menos tres componentes fundamentales: terminales áreas, conductores de bajada y sistema de puesta a tierra. Además que se debe seleccionar el nivel de protección adecuado para la altura y ubicación de las terminales áreas de acuerdo a la tabla 3.8.

Consideraciones importantes en el diseño del sistema de pararrayos son:

- El número y ubicación de las terminales áreas del sistema dependen del nivel de protección seleccionado y de aplicación del método de protección.
- El número y ubicación de los conductores de bajada dependen del tipo de sistema de protección.
- El número de electrodos de puesta a tierra o sistema de puesta a tierra determinara el valor de la resistencia a tierra requerida para estos sistemas.

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Nivel de protección recomendado
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.	III ó IV
Granja	Riesgo principal de incendio y 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 los animales.	II ó III
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
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.	I ó II
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.	I ó II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	II
Edificios de telecomunicaciones	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas económicas por falta de continuidad en el servicio.	I ó II
NOTA- El nivel de protección I es el de mayor protección y el nivel de protección IV es el de menor protección.		

Tabla 3.8 Niveles de protección.

El siguiente paso es obtener el radio de protección de la terminal área o punta pararrayos, este procedimiento resulta ser muy complicado, aunque no lo parezca, debido a que aquí entra el criterio de selección del tipo de punta.

En el mercado de nuestro país existen diversos tipos de puntas pararrayos, tales como la “punta Faraday”, “punta dipolo corona”, “puntas ionizantes”, entre otros. Esto ha ocasionado un gran debate entre los ingenieros, los especialistas en la materia (fabricantes) y las autoridades correspondientes encargadas de regular dicho sistema.

El fabricante por su parte ofrece información técnica sobre su producto, indica radios de protección que a simple vista son exagerados, pero lo “justifican” con documentos que aprueban su efectividad, mientras los ingenieros proyectistas y/o constructores se refieren a las normatividades que rigen el rubro. Las autoridades restringen ciertas puntas, sin embargo terminan por aceptar la mayoría. Entonces, si el debate continuara y los propietarios de los establecimientos tuvieran una visión diferente sobre el tema, la mayoría de las puntas existentes quedarían inhabilitadas y por lo tanto la protección contra las descargas atmosféricas se enfocaría solo a un método, el de la “esfera rodante”, ya que éste es el único que tiene justificación técnica por una norma mexicana como es la NMX-J-549-ANCE-2005, misma en la que la mayoría de las empresas dedicadas especialmente a estos sistemas (pararrayos) basan su justificación del proyecto, pero modifican el cálculo y selección del tipo de punta.

Sin embargo, por razones de comercialización y/o de menor inversión en el sistema, la instalación de diversas terminales áreas se instalan con frecuencia en los proyectos eléctricos de tiendas de autoservicio.

Regresando al procedimiento de diseño, toda vez obtenido el radio de protección sea por el método que sea, se determina el tipo de punta y la altura de protección. En este punto se debe realizar una proyección del radio de protección de la punta, sobre un plano tanto en vista de planta como en vista de alzado, con el fin de obtener la altura y la ubicación de montaje de la misma.

Se debe especificar el tipo de base de la punta, ya que no todas las techumbres de los establecimientos comerciales son iguales, de la misma manera el tipo y la cantidad de retenidas.

En lo que respecta al mástil de la punta (si es que se instala una punta que requiera mástil), su altura está en función de la altura del sistema de pararrayos completo, se sabe que es de acero y que está adecuado a la base y a la punta captora.

Independientemente del tipo de punta seleccionado debe estar instalado por lo menos 3.00 [m] por encima de cualquier otro elemento que se encuentre dentro del radio de protección.

Posteriormente se requiere saber la cantidad de bajantes (conductores) del sistema, pero desgraciadamente volvemos al punto anterior, ya que dependiendo del método utilizado, la cantidad exacta se ve afectada. Sin embargo, los conductores tienen que cumplir con ciertas características:

- El conductor del sistema de pararrayos debe ser especial y tiene la característica de estar trenzado. Los materiales aceptados para estos conductores son; acero, cobre y aluminio.
- Los cables deben correr libres de daño mecánico; en caso de cambio de dirección las curvas deberán ser suaves y tener radio de curvatura igual o mayor que 0.20 [m] o se equivalente a no menos de 90 °C.
- Se admite una subida de 0.40 [m] máxima para un salto de ornamentos con una pendiente inferior o igual a 45 °C.
- Las bajantes se deben de interconectar al sistema de puesta a tierra.
- El conductor de bajada se instalará de tal forma que su recorrido sea lo más directo posible siguiendo el camino más corto, evitando cualquier acodamiento brusco.
- Las fijaciones de los conductores de bajada se realizarán tomando como referencia tres fijaciones por metro, estas fijaciones deben de ser apropiadas para los soportes y realizadas de forma que no afecten la estructura.
- Este conductor deberá ser continuo, sin uniones ni empalmes desde la punta captora hasta el electrodo de puesta a tierra, salvo cuando se tengan derivaciones de bajantes adicionales, en este caso su usaran conexiones (de preferencia soldables).
- Las bajantes deberán estar separadas por lo menos 3.00 [m] de cualquier instalación de gas. Para protección de las personas y de los conductores mismos, éstos deberán instalarse dentro de un tubo (conduit) rígido no metálico tipo pesado (pvc uso pesado) de 27 mm de  $\phi$ , hasta una altura de 3.00 [m] a partir del suelo.

Toda vez conocida la cantidad y ubicación exacta de los conductores de bajada, se necesita obtener el sistema de puesta a tierra cumpliendo con el valor requerido de resistencia a tierra. En general, este sistema de puesta a tierra tiene las mismas especificaciones de diseño y construcción que los sistemas de puesta a tierra de los otros sistemas, sin embargo el cálculo de la resistencia se obtiene de acuerdo a la distribución de los electrodos, ver tabla 3.9.

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		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{1,85hd} \right)$
Para dos electrodos de puesta a tierra horizontales en "ELE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{1,27hd} \right)$
Para tres electrodos de puesta a tierra horizontales en "YE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{0,767hd} \right)$
Para cuatro electrodos de puesta a tierra horizontales en "CRUZ"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{0,217hd} \right)$
Para seis electrodos de puesta a tierra horizontales		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{9,42hd} \right)$
Para ocho electrodos de puesta a tierra horizontales		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{2,69hd} \right)$
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 3.9 Ecuaciones para obtener la resistencia a tierra del sistema de pararrayos.

Adicionalmente, se requiere que este sistema de puesta a tierra cumpla con las siguientes especificaciones, según el artículo 4.3.4.4 de la norma NMX-J-549-ANCE-2005:

- El sistema de puesta a tierra debe integrarse por un arreglo de tres 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.
- 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 a tierra se mantenga en niveles no mayores que 10 Ω.
- La distancia mínima de separación entre electrodos de puesta a tierra verticales debe ser el doble de su longitud.

- Debe instalarse un registro por cada conductor de bajada para medición, comprobación y mantenimiento del sistema de puesta a tierra con las siguientes dimensiones mínimas de 0.32 [m] x 0.32 [m] x 0.32 [m].
- Los electrodos de puesta a tierra horizontales deben instalarse a una distancia de 1,0 [m] o mayor que la estructura y a profundidades de 0,6 [m] o mayores.
- La resistencia a tierra obtenida en el diseño siempre debe comprobarse por medio de mediciones en campo.
- Se deben instalar los avisos necesarios de precaución con la siguiente leyenda: “PELIGRO: EVENTUAL CORRIENTE DE RAYO”. La canalización debe instalarse a una altura mínima de 2,0 m a partir del nivel de piso terminado y donde la sección transversal del conductor de bajada represente un tercio del área interna de la canalización.

La figura siguiente muestra los arreglos típicos para formar el sistema de puesta a tierra del sistema de pararrayos.

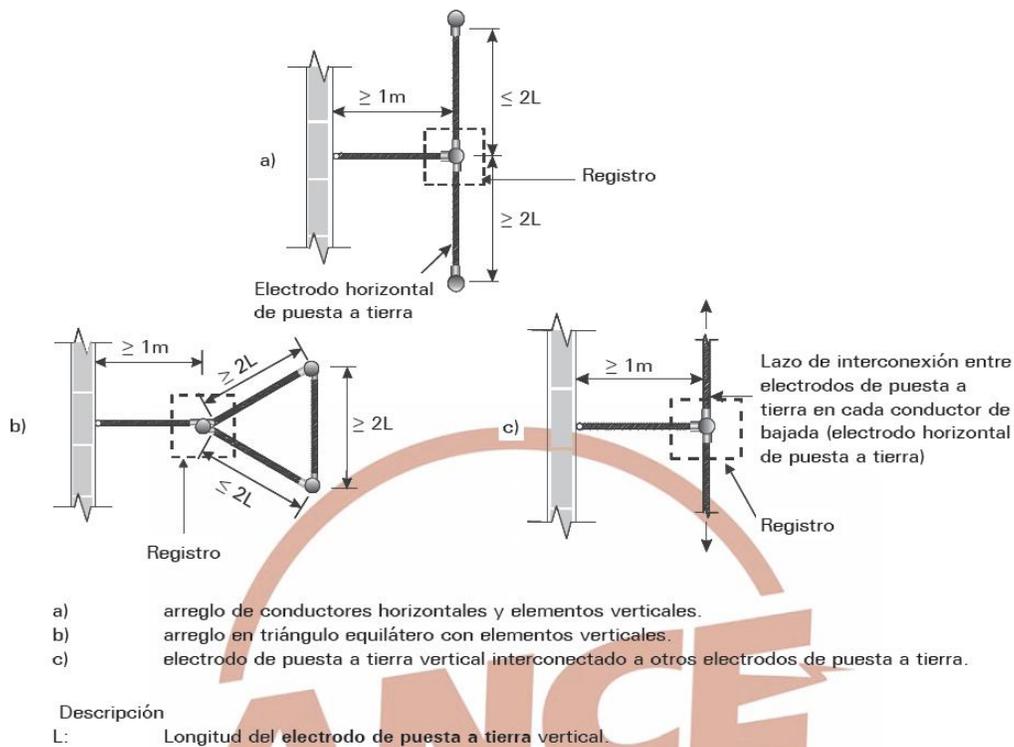


Figura 3.22 Arreglos típicos de electrodos de puesta a tierra.

Amen, de terminar el diseño del sistema de puesta a tierra, se concluye el diseño del sistema de pararrayos o también llamado sistema exterior de protección contra tormentas eléctricas, indicando las especificaciones de los materiales a utilizar sugiriendo marcas y catálogos, ya que muchas veces se cometen errores por mal suministro de los mismos.

A manera ilustrativa se muestra a continuación, dos imágenes en donde se observa la descarga atmosférica sobre una torre de alta tensión, así mismo se muestra en la otra imagen el momento de impacto de una descarga sobre una punta pararrayos.



Figura 3.23 Descarga atmosférica en una torre de alta tensión.



Figura 3.24 Momento de captación de un rayo.

### 3.8 Comparación entre puntas pararrayos.

La diversidad de puntas pararrayos en nuestro país, ha ido en incremento en los últimos años, esto ha ocasionado la incursión de puntas que no tienen justificación técnica y por lo tanto de dudosa calidad o dudoso funcionamiento. Lo que en este apartado se comenta, es solo con el fin de indicar las diferencias existentes de las puntas, se trata de complementar el apartado anterior, ya que conociendo un poco sobre el funcionamiento de los diversos pararrayos, se podrá realizar en un momento dado el diseño correcto del sistema de pararrayos. Nos enfocaremos a estudiar solo a las puntas pararrayos más usadas, tales como la punta Faraday, la punta dipolo corona, la tripolar y la punta ionizante.

### 3.8.1 Punta Faraday

La punta Faraday basa su funcionamiento en la física del rayo, esto quiere decir 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 este mismo, figura 3.25. 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, esto es:

$$r_s = k_s \times I^c \dots\dots\dots (3.36)$$

En donde:

$r_s$  es la distancia o longitud en metros 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].

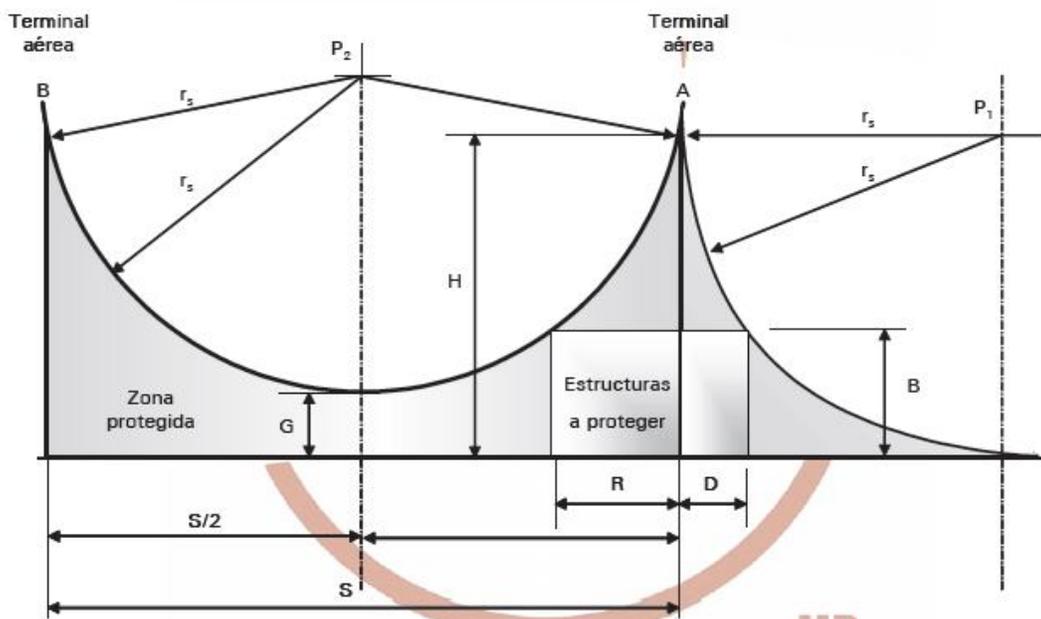


Figura 3.25 Zona de protección del método de la esfera rodante.

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 debe rodarse hacia la estructura a proteger e instalar una terminal aérea en el primer punto de contacto con la estructura.

En la figura 3.26 se muestra un sistema de pararrayos utilizando puntas faraday, se alcanza a observar que el sistema consta de varias puntas y con demasiado conductor, esto representa cierta desventaja en comparación con otras puntas pararrayos, sin embargo en cuanto a funcionamiento este sistema es el único que está reglamentado por una norma mexicana, la NMX-J-549-ANCE-2005, lo que proporciona una mayor “confianza” y tranquilidad, siempre y cuando el sistema este bien diseñado y construido.



Figura 3.26 Sistema de pararrayos tipo jaula de Faraday.

### 3.8.2 Punta dipolo corona.

Su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de la carga electrostática antes de la formación del rayo eliminando el fenómeno de ionización o efecto corona (cuando la intensidad de campo eléctrico es particularmente elevada, en el espacio circunvecino a la punta se presenta la ionización del aire de manera muy intensa, caracterizada por una luminiscencia violeta, a este fenómeno se le llama efecto corona). El cuerpo del pararrayos está construido por dos discos de aluminio separados por un aislante dieléctrico todo ello soportado por un pequeño mástil también de aluminio (ver figura 3.27). Su forma es circular y el sistema está conectado en serie con la propia toma de tierra para transferir la carga electrostática a tierra evitando la excitación e impacto directo del rayo.

La característica principal es la de canalizar por el cable de tierra la diferencia de potencial entre la nube y la parte superior del pararrayos. El sistema conduce primero en sentido hacia arriba, la tensión eléctrica creada por la tormenta al punto más alto del sistema; durante el desarrollo de la tormenta se generan campos de alta tensión que se concentran en el electrodo inferior (cátodo -), a partir de una magnitud del campo eléctrico el electrodo superior (ánodo +) atrae cargas opuestas para compensar la diferencia de potencial interna de la parte superior. Durante el proceso de transferencia, en el interior del pararrayos se produce un flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo, este proceso natural anula el efecto corona en el exterior del pararrayos, no produciendo descargas disruptivas, ni ruido perceptible, ni radiofrecuencia, ni vibraciones del conductor. Durante el proceso, se genera una fuga de corriente a tierra por el cable del sistema, los máximos valores que se generan en el tiempo de la tormenta eléctrica, son cercanos a los 350 [mA]. En este instante el campo eléctrico en el ambiente no es superior a la tensión de ruptura, ya que no tiene la carga suficiente para romper su resistencia eléctrica.

En otras palabras, si en una punta pararrayos se instala un arillo metálico (arillo equipotencial) y más a bajo un disco aislante soportando una bobina en forma de toroide (excitador toroidal) se logra, bajo ciertas condiciones, producir el efecto corona. Así resulta particularmente intensa la descarga no sostenida con lo que se logra una zona de protección de aproximadamente 71° con respecto a la vertical de la terminal, al formarse este ángulo alrededor de la punta se forma un cono ficticio, entonces la protección se reduce de forma que la estructura a proteger esté dentro de un cono con vértice en la punta del captor. Así como se observa en la figura 3.28. La principal función es proteger de los impactos directos el área de cobertura para evitar daños a las personas y estructuras, “el sistema está calculado para conducir la energía durante la formación del rayo desde la parte superior hasta la puesta a tierra”.



Figura 3.27 Punta pararrayos dipolo corona.

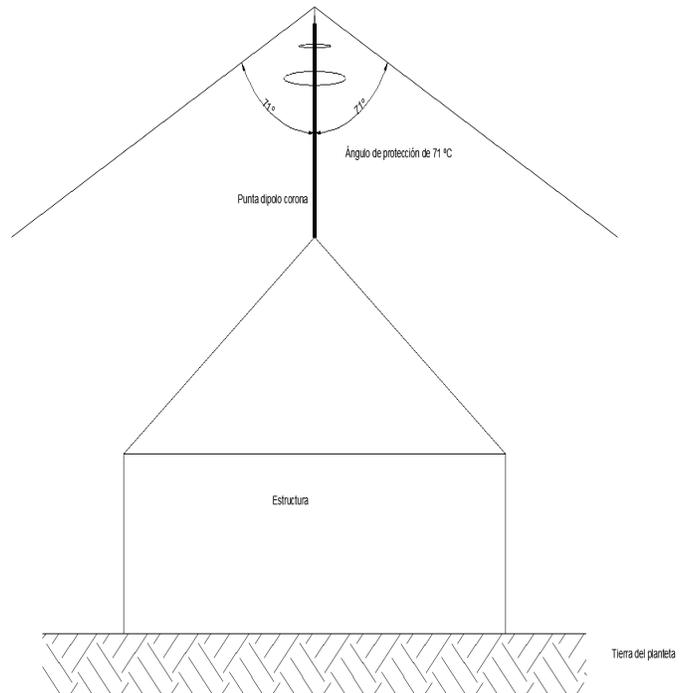


Figura 3.28 Radio de protección del dipolo corona.

En la figura 3.29 muestra el modelo “matemático” de la punta dipolo corona, se aprecia que una forma para obtener el radio de protección es necesario echar mano de identidades trigonométricas, como las siguientes:

$$\begin{aligned} \cos \phi &= \frac{\text{c.a.}}{h}; \\ \text{sen } \phi &= \frac{\text{c.o.}}{h}; \end{aligned} \dots\dots\dots (3.37)$$

Pero también se sabe que:

$$\tan \phi = \frac{\text{sen } \phi}{\cos \phi} = \frac{\frac{\text{c.o.}}{h}}{\frac{\text{c.a.}}{h}} = \frac{\text{c.o.}}{\text{c.a.}} \dots\dots\dots (3.38)$$

Entonces observando la figura:

$$\tan \phi = \frac{\text{R. P.}}{H} \dots\dots\dots (3.39)$$

Despejando al R. P. nos queda:

$$R. P. = (\tan \phi)(H) \dots\dots\dots (3.40)$$

Donde:

R. P. es el radio de protección.

H es la altura de montaje de la punta (conjunto base-mástil-punta).

$\phi$  es el ángulo de protección entre la cabeza captora y la perpendicular de la punta.

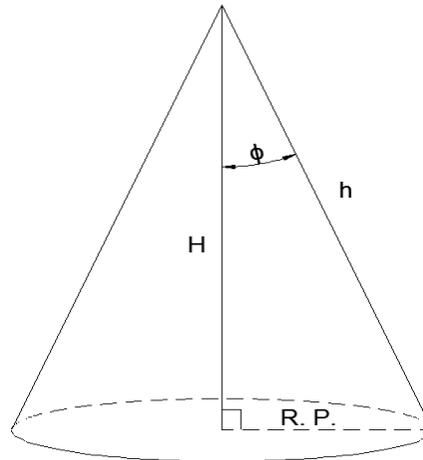


Figura 3.29 Modelo "matemático" de la punta pararrayos dipolo corona.

Toda vez que se obtenga el valor del radio de protección, se debe corroborar que este radio de protección cubre toda la estructura en análisis, si fuese así solo resta indicar el modelo de la punta, en caso contrario es necesario colocar más puntas hasta lograr la cobertura deseada.

En la siguiente imagen se muestra la instalación real de una punta pararrayos dipolo corona en una torre de comunicaciones (instalación muy común), regularmente para este tipo de estructuras no se requiere más que una sola punta, pero para estructuras con longitudes más amplias se requieren de varias puntas.



Figura 3.30 Punta pararrayos dipolo corona en torre de comunicaciones.

### 3.8.3 Punta pararrayos tipo tripolar.

Este sistema de puntas múltiples tiene la ventaja de dividir la corriente que contiene el rayo que generalmente se aparece en forma brusca, disipándose sin peligro alguno hacia el electrodo de puesta a tierra. Además al contar con esta división de descarga, se puede evitar cualquier chispazo de corriente lateral a la construcción o inmueble.

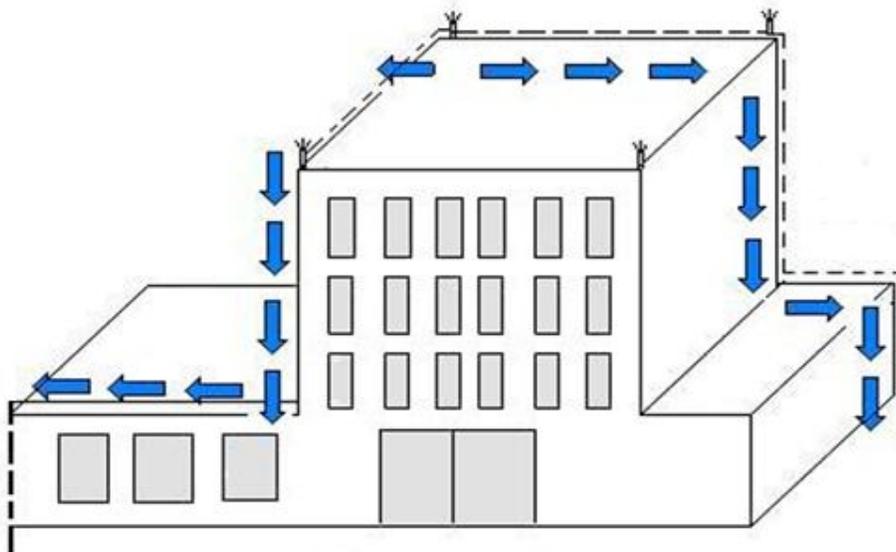


Figura 3.31 Distribución de corriente de descarga.

La punta tripolar tiene un ángulo de protección de  $58^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$ , según la altura de montaje, aunado a esto, la división de corriente que realiza, logra "disipar el rayo sin ningún peligro".



Figura 3.32 Punta pararrayos tripolar.

De esta punta solo se conoce lo que los fabricantes indican, mencionan tablas con rangos de protección exagerados, especificaciones de los materiales de la punta, entre otros aspectos, pero no se hace mención del fundamento matemático o teórico que se tenga. Sin embargo, en función de costo es más accesible a las puntas ionizantes, de ahí su frecuencia de colocación. Esta punta se instala comúnmente en plantas industriales y en ocasiones en centros comerciales.

### 3.8.4 Punta pararrayos tipo ionizante o PDC.

Este tipo de punta se refiere a los pararrayos “activos”, aquéllos que presentan un dispositivo de cebado, de ahí que sea PDC (pararrayos con dispositivo de cebado), estos pararrayos tienen fundamento teórico en normas internacionales, tales como la UNE-21186, NFC-17102 o la NP-4426, pero no son acreditados por la norma mexicana “sistemas de protección contra tormentas eléctricas” la NMX-J-549-ANCE-2005, pero aún así se instala y son las favoritas de muchos ingenieros proyectistas, ya que tienen según los fabricantes y distribuidores una muy buena reputación, sin embargo debido a su alto costo termina por ser reemplazada por otras puntas, regularmente dipolo corona debido a su bajo costo y su mayor presencia en el mercado.

El principio de funcionamiento se basa en el “refuerzo del campo eléctrico local, las calidades de cebado y de inicio del efecto corona y las condiciones favorables para el desarrollo del efluvio”. Un pararrayos con dispositivo de cebado se caracteriza por responder al acercamiento del rayo, adelantándose en su captura a otros elementos dentro de su zona de protección, para conducirlo a tierra de forma segura. Este adelanto se denomina normativamente “tiempo de avance en el cebado y determina el radio de protección del pararrayos.

Cuando se produce la descarga, un líder descendente avanza desde la nube hacia la tierra (como ya se mencionó), originando en la misma tierra, líderes o trazadores ascendente que tratan de alcanzar al líder descendente. El líder o trazador ascendente que alcance al descendente determinará el lugar de impacto.

Los P.D.C. tiene distintos "mecanismos" que logran que el líder ascendente que se origina en ellos lo haga antes que los líderes que se originan en otros puntos de la tierra (por ejemplo puntos de la estructura a proteger) de esta manera se logra que sea más probable que el líder iniciado en el pararrayo alcance primero al líder ascendente y de esta manera capte al rayo.

Durante este proceso se ha logrado medir la distancia que existe desde la parte superior de la estructura o desde el terreno (cuando son lugares abiertos) hasta el momento de unión de los trazadores descendente y ascendente, a esta medición máxima se le conoce como distancia máxima de cebado y al avance en el cebado en el momento de inicio de un trazador ascendente respecto a otro pararrayos de la misma geometría se le llama ganancia de cebado.

Hasta el momento se ha descrito el funcionamiento del PDC, sin embargo surge una pregunta ¿cómo lo hace? Para esto, necesitamos conocer las partes constitutivas del dispositivo. Consta de una cabeza captora, un asta soporte y un transductor. La cabeza está permanentemente conectada al potencial de tierra, el asta (mástil) está protegida contra los impactos directos del rayo y de la intemperie mediante la cabeza captora y por lo tanto también está conectada a tierra; mientras el transductor (estimulador piezoeléctrico) se encuentra incorporado en la parte inferior del mástil y formado de cerámicas piezoeléctricas encerradas en un cárter aislante, asociadas a un sistema solicitador simple y perfectamente fiable. Además consta de un cable de alta de alta tensión que corre por el interior del asta y conecta el estimulador a la punta emisora.

El fenómeno de estimulación piezoeléctrica consiste en aumentar el número de cargas libres (partículas ionizadas o electrones) en el aire cercano del pararrayos y crear, en presencia de un campo eléctrico nube-tierra, un canal de fuerte conductividad relativa constituyendo un camino preferencial para el rayo. La creación de cargas libres se hace por efecto corona aplicando sobre la punta del pararrayos, la tensión proporcionada por las células en cerámica piezoeléctrica es atribuida al fenómeno de producir una tensión muy elevada por un simple cambio en la presión aplicada. El pararrayos está equipado de un dispositivo mecánico que permite convertir el esfuerzo mecánico de la acción del viento sobre el pararrayos, en esfuerzo de presión sobre las células piezoeléctricas.

La tensión así proporcionada esta aplicada, a través del cable de alta tensión que corre por el interior del asta, sobre la punta ionizante para crear, por efecto corona, cargas libres, las cuales después serán expulsadas por efecto venturi, de la cabeza perfilada del pararrayos (circulación forzada del aire). Cuando están al exterior de la cabeza, estas cargas están sometidas al

campo eléctrico nube-tierra. Las cargas que tienen el mismo signo que el de la nube están empujadas hacia la tierra, por lo que el camino que se forma en el prolongamiento del pararrayos esta entonces exclusivamente constituida de cargas opuestas a las de la nube.

El hecho de poder favorecer cebados a valores menores que el campo electrostático, refuerza “la probabilidad de captura” de los pararrayos. Esta facultad les confiere una eficacia mayor como “captadores preferenciales”, que asumen con relación a cualquier otro punto de los edificios que protegen.

La zona de protección de la punta pararrayos se obtiene teóricamente mediante el trazado del modelo electrogeométrico, sin embargo es asimilada a las alturas menores a un cono de revolución cuya cúspide es el extremo del pararrayos, así como se ilustra en la figura 3.33.

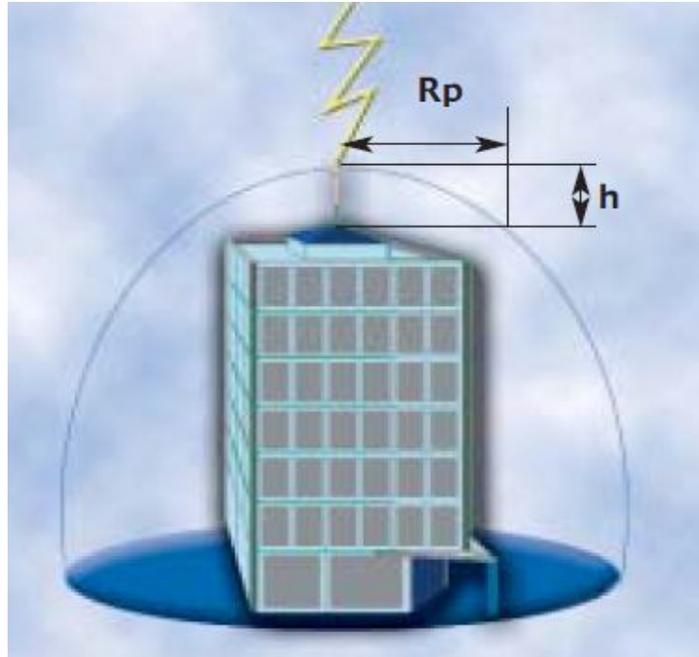


Figura 3.33 Zona de protección del pararrayo tipo PDC.

El radio de protección de estos pararrayos se calcula con la siguiente ecuación según la norma francesa y española en sus artículos 2.2.3.2 denominado “Radio de protección”:

$$R_p = \sqrt{(2Dh - h^2) + [\Delta L(2D + \Delta L)]} \dots\dots\dots (3.40)$$

Donde:

$R_p$  es el radio de protección.

$h$  es la altura tomada desde la superficie horizontal a proteger hasta la punta del pararrayos.

$\Delta L$  es la ganancia en el cebado del trazador ascendente dada en metros (ver tablas de fabricantes).

$D$  es la distancia de impacto (equilibrio iónico nube-tierra) y se puede calcular con la ecuación 3.41, pero para estos pararrayos ya están definidos valores para diferentes niveles de protección, esto es:

$$D = 10 \times I^{2/3} \dots\dots\dots (3.41)$$

Donde:

$I$  es el pico de corriente del primer arco de retorno.

Pero con valores dados:

$D=20$  metros para un nivel de protección “Nivel I”; para protección de inmuebles conteniendo sustancias peligrosas.

$D=45$  metros para un nivel de protección “Nivel II”; para protección de inmuebles conteniendo concentración de personas y equipos electrónicos y eléctricos.

$D=60$  metros para un nivel de protección “Nivel III”; para protección de personas áreas abiertas.

Cabe mencionar que la ecuación 3.40 solo es válida para  $h \geq 5$  [m], por lo que para alturas menores se recomienda obtener el radio de protección mediante el uso de las figuras 2.2.3.3 a) y b) de las normas en cuestión.

Es importante corroborar con estos métodos el valor del radio de protección, ya que la mayoría de los fabricantes entregan tablas en las cuales muestran el valor de  $R_p$  y muchas veces no verifica.

En la siguiente figura, se aprecia la instalación de una punta pararrayos tipo Ionizante sobre la techumbre de un establecimiento comercial.



Figura 3.34 Pararrayos tipo PDC.

### 3.8.5 Conclusiones.

La gama tan extensa de pararrayos nos ha dado efectivamente una diversidad grande para escoger el tipo de acuerdo al costo o beneficio, esto ha ocasionado que la selección de la punta muchas veces sea de manera errónea dando origen a contingencias eléctricas. Lo menos drástico que puede pasar es que se gaste de más, pero si se selecciona incorrectamente una punta la seguridad de las personas y de los equipos está muy a la deriva.

El tema de los pararrayos activos o PDC es un tema muy complejo y no menos polémico. Existe una gran discusión acerca de su efectividad y aplicación entre quienes aseguran un mayor volumen de protección y quienes, argumentando que los ensayos no reproducen las condiciones reales de funcionamiento, se mantienen escépticos. Existen pocas normas que han contemplado a estos pararrayos (como ya vimos anteriormente), pero no se ha sabido de las normas conservadoras alemanas o las normas estadounidenses del IEEE o la NFPA o el ICE, en fin si no ha existido autorización alguna será por algo ¿no creen?

Mi opinión personal es que los P.D.C. son realmente más efectivos que los pasivos pero no sé cuál es la forma correcta de conocer su volumen de protección, es decir no sé cuánto más efectivos son. En general, los fabricantes proveen tablas de cálculo con zonas de protección que me parecen exageradamente grandes y no logro relacionar completamente los resultados de los ensayos con los volúmenes de protección resultantes.

En referente a los dipolo corona, personalmente recomiendo no usar este pararrayos, ya que usando el "método del cono", con este pararrayos es fácil cometer grandes errores, por ejemplo creer que se puede proteger un edificio de gran altura (alrededor de unos 65 metros) solamente con captosres en el techo, cosa que no es posible, ¿en dónde queda la protección contra descargas laterales?

En lo personal opino que las nuevas tecnologías no han demostrado ser superiores que las puntas franklin. Estas tecnologías no disponen de respaldo normativo y consenso a nivel internacional, además de que sus procedimientos detallados de diseño son potestad y propiedad de las empresas que usufructúan la patente.

Desde un punto de vista particular, es necesario que en nuestro país se defina por completo si la gama de pararrayos es la adecuada y los riesgos que se corran sean insignificantes. Es radical que se implemente una norma mexicana en donde se indique el procedimiento a seguir. Respecto a esto, me surge una pregunta, ¿si no está fundamentado teóricamente el funcionamiento de una punta dipolo corona (por mencionar alguna) por qué se vende tanto? ¿O por qué si la punta ionizante no tiene referencia con la norma mexicana y que otros país de Europa ya está siendo prohibida, aquí en México se instala y hasta muchas veces se menciona como la mejor opción de pararrayos?

La verdad es que si la autoridades correspondientes no trabajan respecto a este tema, el mercado de puntas pararrayos seguirá en aumento y con el paso del tiempo la exageración de la protección que ofrecerán las nuevas puntas, será tan grande que se creará que una sola punta cubrirá gran parte de una colonia o tal vez de un municipio. Quizá suene irreverente el comentario, pero lo cierto es que los fabricantes cada vez ofrecen dispositivos con mayor ganancias que gasto invertido.

Finalmente, 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. A la hora de adoptar un sistema de protección contra el rayo es necesario calcular el riesgo que tiene la estructura. Los modelos electrogeométricos son herramientas útiles para determinar la protección contra rayos, siendo importante conocer las intensidades de la zona donde han de colocarse las protecciones.