UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"ANALISIS DE CRITERIOS NORMALIZADOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS Y LA APLICACIÓN DE NUEVAS TECOLOGIAS "

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO- ELECTRÓNICO
AREA: ELÉCTRICA DE POTENCIA.

PRESENTA:

ROBERTO MARIO JIMENEZ SANDOVAL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARTURO GALVAN DIEGO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. NOVIEMBRE ,2006

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias.

A mis padres Mario Jiménez y Enedelia Sandoval, por su amor infinito y apoyo incondicional.

A mis hermanos Guadalupe, Andrea, Martín y Carolina por su cariño y ejemplo que me ha servido como una guía en momentos difíciles.

De manera muy especial al Dr. Arturo Galván Diego, por dirigir esta tesis, y por el apoyo y confianza durante la realización de este trabajo, pero sobre todo por brindarme su amistad.

Al Ing. Guillermo López Monroy, por sus comentarios y sugerencia que me han ayudado en mi formación profesional.

Mi eterna gratitud a mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de la mejor universidad de Iberoamérica, y por brindarme la mejor formación académica que pude haber recibido.

A la facultad de ingeniera donde conocí a muchos de mis mejores amigos, y pase los mejores años de mi vida, y donde tuve la gran oportunidad de aprender de los mejores ingenieros de México.

Con todo mi cariño a Diana Zaragoza por su apoyo en este último esfuerzo, ya que sin su ayuda no hubiera podido dar este paso.

A mis amigos Ulises, Erick Torres, Graciela, Epifanio, Omar, Daniel Zúñiga, Aldo, Octavio, Iván López Pineda, Moisés, Francisco, Uriel, Víctor, Nadia, Martha y Miguel Carranza, por todas las experiencias que hemos compartido.

Con todo mi corazón a Jeanne Munguia por su amistad y cariño, gracias por ser mi amiga.

Seria injusto dejar fuera de mis agradecimientos a muchos amigos y personas importantes en mi vida, esta tesis que es el ultimo esfuerzo de mis estudios de licenciatura, se la dedico a todas aquellas personas que me apoyaron en el transcurso de mi educación, pero también a todas aquellas que me regalaron una sonrisa en un día difícil, a los que me demostraron su simpatía con apretón de manos y a los que me decían con un abrazo que no estaba solo, porque al final del día al sumar todas las emociones que me provocan estas pequeñas cosas me doy cuenta que soy un persona realmente afortunada, y porque las pequeñas cosas han hecho los grandes cambios de mi vida.

Índice

Contenido	Pagina.
Índice	I
Prólogo.	i
Capítulo 1	
Naturaleza de las tormentas eléctricas.	
1.1 Introducción.	1
1.2 Las tormentas eléctricas.	2
1.2.1 Formación de las nubes de tormenta.	2
1.2.2 Formación de las tormentas eléctricas.	6
1.2.3 Distribución de carga en un nubarrón.	8
1.3 Descargas en una tormenta eléctrica.	9
1.3.1 Tipos de rayos involucrados en una tormenta eléctrica.	10
1.4 Otros tipos de rayos poco usuales.	12
1.4.1 Rayo de bola.	12
1.4.2 Rayo de cuenta.	13
1.4.3 Rayos en erupciones volcánicas.	14
1.4.4 Rayos en explosiones nucleares.	15
Capítulo 2	
Fenomenología del rayo y medios de observación.	
2.1 Clasificación del rayo.	17
2.2 Fenomenología del rayo.	19
2.2.1 Rayo a tierra.	19
2.2.1.1 Rompimiento preliminar.	20
2.2.1.2 Líder escalonado descendente.	20

2.2.1.3 Punto de conexión. 22
2.2.1.4 Rayo de retorno. 23
2.2.1.5 Líder directo. 24
2.2.1.6 Rayos de retorno subsecuentes. 25
2.2.1.7 Corrientes intermedias. 25
2.2.1.8 Procesos J y K. 26
2.2.2 Rayos positivos. 29
2.2.3 El rayo ascendente. 30
2.3 Parámetros relacionados con las corrientes del rayo. 31
2.4 Incidencia de los rayos. 34
2.4.1 Día tormenta. 35
2.4.2 Horas tormenta. 37
2.4.3 Contadores de Rayos. 37
2.4.4 Detectores satelitales. 39
2.5 Datos para México. 40
2.5.1 Correlación entre densidad de rayos y nivel ceráunico. 41
2.5.2 Mapa de isodensidad de rayos a tierra. 43

Capítulo 3
Evolución de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas.

3.1 Antecedentes históricos de la investigación de los fenómenos eléctricos. 45
3.2 Experimento de Benjamín Franklin 47
3.3 Desarrollo del sistema de protección convencional. 48
3.4 Desarrollo de la zona protección. 51
3.5 Jaula de Faraday. 54
3.6 Modelo electrogeométrico. 55
3.7 Método de la esfera rodante. 56
3.7.1 Historia de la esfera rodante. 56

3.7.2 Aplicación del método de la esfera rodante. 58
3.7.3 Zona de protección de la esfera rodante. 60
3.8 Nuevos productos. 62

Capítulo 4
Fundamentación técnica y dispositivos no convencionales de los sistemas de protección
4.1 Principios de protección contra tormentas eléctricas. 65
4.1.1 El proceso de conexión. 65
4.1.2 Descargas corona. 65
4.1.3 Ultimo paso de la descarga. 67
4.2 Cono de protección. 71
4.3 Método de la esfera rodante. 73
4.3.1 Las bases físicas de la protección contra rayo directo. 73
4.3.2 Teoría de la esfera rodante. 75
4.4 Sistemas de transferencia de carga. 77
4.4.1 Principio de funcionamiento de los sistemas de transferencia de carga CTS. 77
4.4.2 Tipos existentes de CTS. 83
4.4.3 Controversias acerca del uso de los CTS. 84
4.5 Sistemas de emisión temprana de streamer ESE. 85
4.5.1 Principio de funcionamiento. 85
4.5.2 Discusión de los sistemas ESE. 91
4.5.3Tipos existentes de ESE. 92
4.6 Aplicación de nuevos productos en México. 94

Capítulo 5
Normas internacionales de protección contra rayos.
5.1 Norma para la instalación de sistemas contra rayos NFPA 780. 95
5.1.1 Alcances y definiciones. 95
5.1.2 Métodos de protección utilizados en NFPA 780. 97

5.1.2.1 Cono de protección en NFPA 780. 97
5.1.2.2 Modelo de la esfera rodante en NFPA 780. 98
5.2 Norma de la comisión electrotécnica Internacional IEC 61024 101
5.2.1 Alcances y definiciones. 101
5.2.2 Métodos de protección utilizados en IEC 61024 102
5.2.2.1 Cono de protección en IEC 61024. 103
5.2.2.2 Método de la esfera rodante en IEC 61024 . 104
5.2.2.3 Método de la malla en IEC 61024. 106
5.2.3 Selección de los niveles de protección en IEC 61024. 107
5.3 Norma del instituto americano del petróleo. 110
5.4 Norma Británica, protección de estructuras contra rayo BS 6651. 111
5.4.1 Alcances y definiciones. 111
5.4.2 Métodos de protección utilizados en BSI 6651. 112
5.4.2.1 Método del cono de protección en BSI 6651. 112
5.4.2.2 Método de la esfera rodante en BSI 6651. 115
5.4.3 Análisis de riesgo y necesidad de protección en BSI 6651. 115
5.5 Norma Australiana y Nueva Zelanda NZS/AS 1768-1991. 117
5.5.1. Alcances y definiciones. 117
5.5.2. Métodos de protección utilizados en NZS/AS 1768-1991. 118
5.5.2.1. Método de la esfera rodante en NZS/AS 1768-1991 118
5.5.2.1.1. Zona de protección. 119
5.5.2.2 Volumen de colección. 121
5.5.2.2.1. Bases teóricas del método de volumen de colección. 121
6. Conclusiones. 126
Bibliografía. 133

Prologo.

Debido a la naturaleza estocástica de las tormentas eléctricas, no existe un método preciso que garantice la protección absoluta contra los efectos destructivos del rayo, lo que obliga a utilizar métodos prácticos convencionales consensuados internacionalmente. Esta característica estocástica del rayo ha dado origen a la aparición de diferentes productos para la protección contra tormentas eléctricas. Algunos de estos productos carecen de una justificación técnica o científica, poniendo en riesgo tanto al personal como a las instalaciones que se suponen deben proteger.

Un sistema de protección contra tormentas eléctricas esta compuesto de tres partes; sistema de tierras, conductores de bajada y terminales aéreas. Este trabajo de tesis se concentra en estudiar la eficiencia de las terminales aéreas convencionales y de los nuevos productos disponibles en el mercado, en base a la información documental que existe de los diversos métodos de protección.

La aparición de nuevos productos para incrementar la eficiencia de las terminales aéreas, llamadas dispositivos no convencionales, como lo pueden ser los productos ESE (Early Streamer Emission) y CTS (Charge Transfer System), como sustitutos del método convencional, involucra un estudio mas profundo del fenómeno del rayo para evaluar las justificación técnica de estos nuevos productos para su aplicación.

Actualmente, cuando se desea proteger alguna estructura, nos encontramos ante la problemática de la elección del sistema de protección y la aceptación de riesgo que tolera el criterio a implementar, es decir, utilizar el método convencional de protección aceptado por la comunidad científica internacional o utilizar productos novedosos que aseguran tener una eficiencia mucho mayor en el área de protección sin el consenso internacional. Con el fin de proporcionar al ingeniero de diseño de un sistema de protección contra tormentas eléctricas elementos de apoyo para la selección del método de protección, este trabajo contiene cinco capítulos, los cuales se desarrollan de la siguiente manera.

Capitulo 1. Naturaleza de las tormentas eléctricas. Se analiza el proceso de formación de las nubes de tormentas, su desarrollo y los procesos físicos involucrados que originan una tormenta eléctrica. También se analiza la distribución de carga en un nubarrón, los tipos de rayos involucrados en una tormenta eléctrica y los tipos de rayos poco usuales.

Capitulo 2. Fenomenología del rayo y medios de observación. Estudia las etapas involucradas en la descarga de rayo, así como los parámetros del rayo. Del mismo modo se estudia la frecuencia de incidencia de rayos y los métodos utilizados para estudiar esta incidencia y los datos de la densidad de rayos a tierra para el territorio Mexicano.

Capitulo 3. Evolución de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas. Se repasa la historia de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas, desde sus inicios hasta la aparición de los nuevos productos. Se exponen las ventajas y limitaciones del sistema de protección convencional y la evolución que ha tenido con el tiempo y el desarrollo de mejores equipos de medición y monitoreo del rayo.

Capitulo 4. Fundamentación técnica y dispositivos no convencionales de los sistemas de protección. Se exponen los principios de protección contra tormentas eléctricas y se analiza la justificación técnica de los métodos de protección de esfera rodante y cono de protección. Además, se analizan los principios de protección de las nuevas tecnologías como lo son los sistemas de transferencia de carga y los sistemas de emisión temprana, para exponer la controversia en uso de estos nuevos productos.

Capitulo 5. Normas internacionales de protección contra rayos. En el último capitulo de esta tesis, se analizan algunas normas de protección contra tormentas eléctricas como lo son NFPA 780, IEC 61024, la norma del instituto americano del petróleo, BS 6651 y la NZS/AS 1768-1991. En cada una de estas normas se analizan los métodos y sistemas de protección utilizados en el diseño de un sistema de protección contra tormentas eléctricas.

Conclusiones. Finalmente se dan las conclusiones de este trabajo y conclusiones generales, las cuales estas sustentadas en el desarrollo de cada uno de los capítulos desarrollados en esta tesis.

Capitulo 1
Naturaleza de las tormentas eléctricas.

1.1 Introducción.

El relámpago o rayo en la mitología se consideró por mucho tiempo como una manifestación de origen sobrenatural. Considerado como la gran arma de los dioses, los antiguos griegos se maravillaban y atemorizaban por el rayo lanzado por Zeus. Para los Vikingos, el relámpago era lanzado por Thor al golpear su martillo en un yunque mientras montaba su carro por las nubes. Entre las tribus indias de América del Norte se creía que el relámpago era originado por las plumas brillantes de un pájaro místico, que batiendo las alas producía el sonido de trueno.

Figura 1.1. Representación del dios griego Zeus al lanzar un rayo.

En general el rayo era considerado como una manifestación del gran poder que poseían los dioses, concepción que perduró por muchos siglos, pero fue cambiando conforme crecía y se enriquecía el conocimiento del hombre. El fenómeno del rayo pasó de ser considerado como un ente divino a una preocupación científica, siendo Benjamín Franklin el primer científico que dedicó su esfuerzo a indagar la naturaleza eléctrica del rayo. Actualmente se conoce que el rayo es el mecanismo mediante la cual las nubes descargan su carga acumulada, también conocido como transporte de carga eléctrica, y estrechamente ligado a las tormentas eléctricas.

1.2 Las tormentas eléctricas

Las tormentas eléctricas representan un fenómeno muy extendido y común en todo el planeta. Las tormentas eléctricas producen por medio del rayo efectos destructivos en edificios y es la causa de la mayoría de los incendios forestales. El rayo es causante de muertes, más que cualquier otro fenómeno meteorológico.

1.2.1 Formación de las nubes de tormenta.

Puesto que la fuente principal productora de las tormentas eléctricas son las nubes, es preciso conocer los fenómenos que dan origen a su formación. Son varios los factores que dan origen a una nube, pero los de mayor importancia se deben a 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. La velocidad de caída de temperatura se llama velocidad de caída adiabática y es de casi un grado Celsius por cada 100 metros. Si la masa de aire húmedo continúa elevándose, puede alcanzar su punto de rocío y el vapor de agua se condensa alrededor de diminutas partículas de polvo. Cuando el vapor de agua se condensa libera el calor latente, que es el calor que se desprende cuando el agua cambia de estado de gas a líquido o de líquido a sólido. A su vez la liberación de calor latente hace más lento el enfriamiento del aire. El aire mantiene su poder ascendente que contribuye al crecimiento hacia arriba de la nube. Una vez que se ha alcanzado el punto de saturación puede tener más poder ascendente, lo que también explica por qué las nubes están asociadas con el aire de ascensión lenta en los sistemas de baja presión.

Las nubes también tienen un origen orográfico cuando las corrientes de aire húmedo son forzadas por las montañas que bloquean su camino, lo que da lugar a nubes y fuertes precipitaciones en la ladera expuesta al viento de la montaña,

mientras que la ladera, al abrigo del viento, queda despejada y seca, siendo el lado donde se suelen formar los desiertos.

Como estos factores se dan a diversas alturas existen varios tipos de nube, las cuales se indican en la figura1.2.

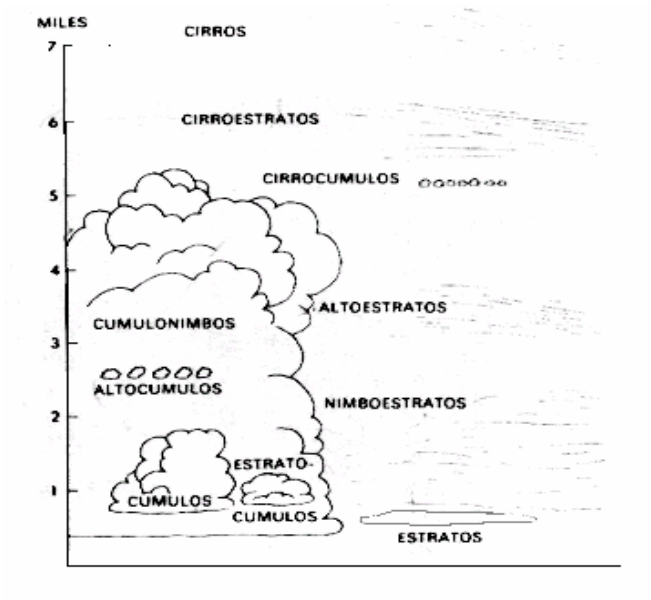


Figura 1.2. Altura de formación de los diferentes tipos de nube

El nombre de cada una de estas nubes se debe al trabajo del ingles Luke Howard [1], quien hizo la primera clasificación de nubes. Howard pensó que las nubes se podrían clasificar de acuerdo con su aspecto y comportamiento. Reconoció tres tipos básicos de nubes y les dio nombres en latín. A las nubes finas más altas las llamó Cirrus, que significa mechón de pelos. Las nubes sueltas y llenas de bultos más próximas al suelo las llamó Cumulos, que en latín significa montón. A las alfombras horizontales de nubes que se extendían sobre grandes zonas les dio el nombre de Stratus, que significa capas. Howard mezcló los nombres para describir varias combinaciones de nubes, como por ejemplo Cirroestratos para designar a una nube en forma de capas a gran altura. La palabra latina Nimbus, que significa chubasco, fue asignada a un tipo de nube que era una nube en el momento de la precipitación. Más tarde los meteorólogos añadieron varios nombres y prefijos para designar ciertos tipos que no coincidían exactamente con el sencillo esquema de clasificación. Debido a que cada una de

estas nubes se forma a diferentes altitudes, cada nube goza de diferentes características que se mencionarán a continuación [2].

Cúmulos.

Nube que en forma individual o separada parece un domo o una torre, que son usualmente densas y bien definidas. Tienen una base plana y una parte alta pandeada, que normalmente se parece a una coliflor.

Estratos.

Nube baja, con capas, más bien con base uniforme, donde las precipitaciones son más comúnmente en forma de brisa.

Estratocúmulos.

Nube baja predominantemente estratiforme, aterronada en la parte baja y alrededor de la masa, frecuentemente con color azul entre ellas.

Comulonimbos.

Nube de desarrollo vertical excepcionalmente densa, normalmente de forma de yunque en la parte superior. La nube es frecuentemente acompañada por fuertes aguaceros, rayos y truenos y algunas veces de granizo. También conocida como nube de tormenta y trueno.

Nimboestratos.

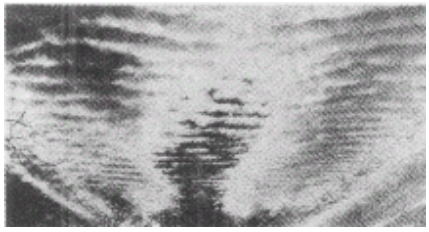
Nube de color gris obscura, caracterizada por más o menos precipitaciones abundantes. Esta no es acompañada por tormentas eléctricas o granizo.

Altoestratos.

Nube de altura media compuesta de láminas grises azulosas o capas de apariencia uniforme. En sus regiones delgadas usualmente expuestas al sol o la luna aparecen obscuramente visibles.

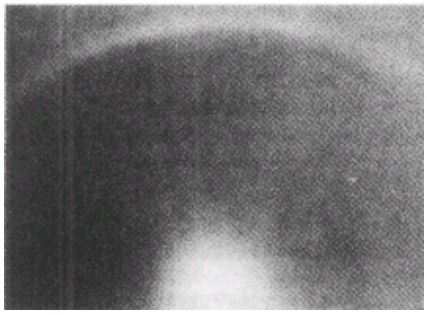
Altocúmulos.

Nube usualmente blanca o gris, frecuentemente aparece en capas o parches con masas redondas onduladas o enrolladas.



Cirroestratos.

Nubes con aspecto de velo, provocan el halo solar y lunar.



Cirrocúmulos.

Nube alta que parece como peluche blanco, con sombras, mismas que consisten en elementos muy pequeños en forma de granos o escarcha.

Cirros.

Nubes altas compuestas de cristales de hielo en forma de plumas blancas y delgadas, filamentosa o bandas angostas.

Como se observa, solo las nubes que favorecen la formación de rayos o tormentas eléctricas son las del tipo llamada Cumulonimbo, normalmente llamado nubarrón. Hablando estrictamente, no todo Cumulonimbo produce el rayo. A veces el término "tormenta" se usa como un sinónimo de nubarrón, aunque una tormenta normalmente es un sistema de nubarrones.

1.2.2 Formación de las tormentas eléctricas.

Las tormentas se pueden dividir en dos clases; tormentas cálidas y frentes de tormentas. Las tormentas cálidas o convectivas predominan en los trópicos pero con frecuencia ocurren en las zonas montañosas.

Las tormentas eléctricas convectivas son generadas por desequilibrios térmicos en la atmósfera, constituyen ejemplos violentos de la transferencia vertical del calor, llamada convección. Bajo ciertas condiciones atmosféricas, capas de aire más frías y densas se colocan sobre otras más cálidas y ligeras. La inestabilidad resultante produce una inversión convectiva, con las capas más

pesadas y densas descendiendo a la parte inferior, mientras el aire más cálido y ligero se eleva rápidamente a la parte superior, como se muestra en la figura 1.3.

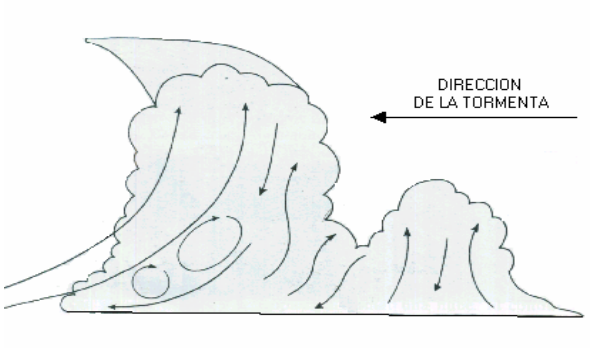


Figura 1.3. Estructura de una nube de tormenta eléctrica.

Los vientos que soplan dentro de un centro de bajas presiones obligan al aire caliente cercano del centro a elevarse, esto hace que el aire se sature de humedad, dando lugar a la condensación, y aparecen gotitas de agua iniciándose así la formación de una nube. El continuo movimiento ascendente del aire produce grandes y elevadas nubes de tipo Cúmulo. Vientos fuertes por encima de las nubes en formación pueden intensificar su crecimiento y a medida que la nube sigue creciendo el vapor de agua se convierte en líquido o partículas congeladas provocando una liberación de calor latente, que se convierte en la principal fuente de energía para el desarrollo de la nube. Las partículas de la nube continúan su crecimiento chocando y combinándose entre sí hasta pesar lo suficiente para vencer la corriente ascendente y caer al suelo como lluvia, nieve o granizo.

Una vez alcanzada su etapa final de crecimiento, el Cumulonimbo puede tener varios kilómetros en su base aplanada y elevarse a más de 12 000 metros. Los vientos de gran altura cortan la parte superior de la nube dándole forma parecida a un yunque. Estas elevadas nubes a veces se presentan como gigantes aislados.

La mayoría de las tormentas eléctricas se componen de varias células, llamadas células de tormenta, cuyo período de vida es de unos 20 ó 30 minutos. Las células viejas se reemplazan por nuevas haciendo posible que algunas tormentas duren varias horas.

Cuando varias células de tormenta se mueven una al lado de la otra, se conocen como *frente de tormenta.* Según se aproxima el final de la etapa de crecimiento, la corriente ascendente que inició el crecimiento de la nube ya no predomina y se une a la descendente generada por la precipitación. Esta combinación de corrientes ascendentes y corrientes descendentes forma una célula aislada de tormenta.

1.2.3 Distribución de carga en un nubarrón.

La razón de la distribución de cargas así como el movimiento de las mismas en una de tormenta eléctrica es un proceso en el cual las corrientes ascendentes en el centro de una célula de tormenta interaccionan con gotas de agua superfrías, partículas de precipitación y cristales de hielo. Las gotas de agua superfrías existen en estado liquido a temperaturas por debajo de los cero grados Celsius gracias a las presiones existentes dentro de la célula de tormenta. Las partículas de la precipitación son generalmente más grandes que los cristales de hielo y que las gotas de agua superfrías.

En el interior del nubarrón, gracias a la ayuda de las corrientes ascendentes, se forman las condiciones para formar el siguiente cuadro:

1. Las partículas de precipitación se encuentran naufragando entre gotas de agua superfrías y los cristales de hielo.
2. Debido al movimiento de todas las partículas existentes se suscitan choques entre ellas.
3. Las gotas de agua superfrías permanecen en un estado líquido hasta que se impactan con la superficie de una partícula de precipitación; a este proceso se le llama escarchamiento.
4. Durante el proceso de escarchamiento las partículas de precipitación ganan peso y volumen.

En este proceso de escarchamiento, cuando las partículas de precipitación chocan contra cristales de hilo adquieren carga negativa. Por acción de la gravedad las

partículas de precipitación más grandes y pesadas se separan de los cristales de hielo, que son más pequeños y ligeros y arrastrados por las corrientes ascendente siguen ganando altura. Los cristales de hielo llegan a alturas donde la temperatura desciende hasta los -40 °C; a esta temperatura se le llama temperatura de inversión, en donde los cristales de hielo adquieren carga positiva.

Es de este modo que la distribución de carga dentro de un nubarrón se reparte con carga positiva en su parte más alta y la carga negativa predominante en las partes más bajas del nubarrón. La distribución de carga se muestra en la figura 1.4

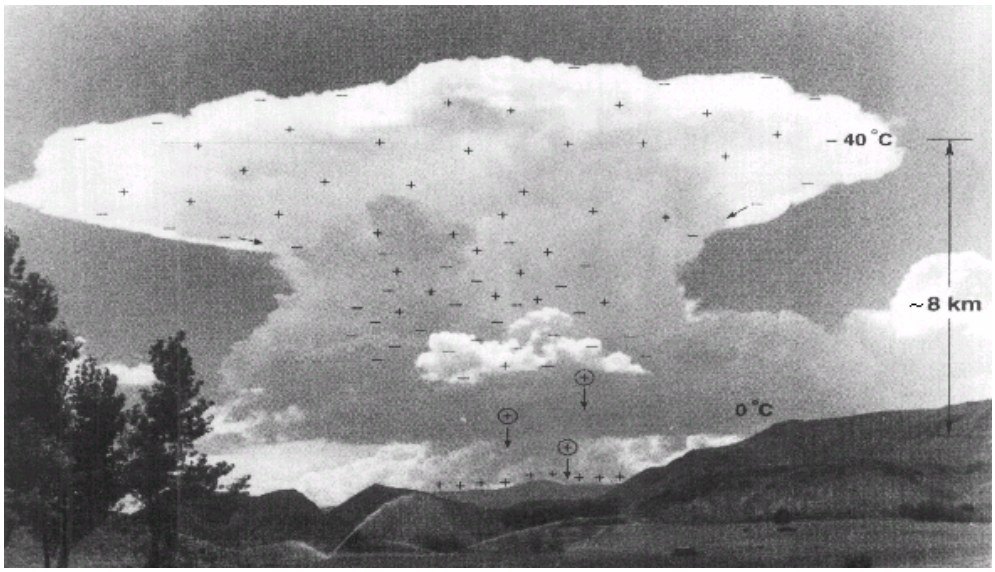


Figura 1.4. Distribución de la carga en un nubarrón.

1.3 Descargas en una tormenta eléctrica.

De toda la violencia de la naturaleza, nada se compara con los rayos desde el punto de vista de una liberación instantánea de energía. El rayo toma el camino de menor resistencia entre dos nubes o una nube y el suelo. Cualquier objeto más alto que el nivel del suelo, tal como un edificio, un árbol, o una persona que permanezca de pie al descubierto o sobre una barca en un lago, puede ser un punto de descarga para el rayo.

1.3.1 Tipos de rayos involucrados en una tormenta eléctrica.

Durante una tormenta eléctrica se pueden encontrar diferentes tipos de rayos, divididos en dos grandes grupos; los rayos de nube a tierra y los rayos dentro de las nubes o nubarrones. Esquemáticamente la clasificación de los rayos la podemos entender por medio de la figura 1.5.

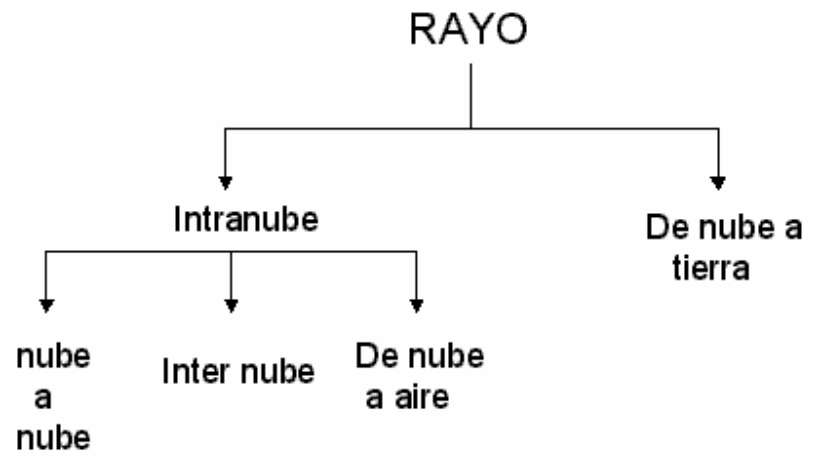


Figura 1.5. Clasificación de los rayos dentro de una tormenta eléctrica

Los rayos que se desarrollan en el interior de la nube de tormenta se llaman rayos de intranube y se subdividen en tres tipos diferentes, todos ellos tienen como principal característica que nunca tocan tierra, ya que su origen y desarrollo se encuentra dentro de la nube tormenta a varios cientos de metros de distancia del nivel del suelo.

El rayo en el interior de la nube, es mejor conocido como rayo de “Intra nube”, y representa el tipo más común de descarga. Estos rayos de intranube ocurren entre los centros de carga de polaridad opuesta dentro de la misma nube. Normalmente el proceso tiene lugar dentro de la nube y se puede observar desde el exterior de la nube como parpadeos difusos. Sin embargo, la descarga puede terminar en el límite de la nube y un cauce luminoso puede ser visible a muchos kilómetros de distancia. Este tipo de descarga se muestra en la figura 1.6.

No sólo dentro de la misma nube se dan descargas, también existen descargas eléctricas de una nube a otra, entre centros de carga de polaridad opuesta, este fenómeno es llamado rayo de nube a nube y su ilustra en la Figura 1.6

Existe otro tipo de rayo que se desarrolla dentro de la nube de tormenta, pero éste termina en el aire, es decir, no termina en los centros de carga de la nube ni tampoco en la tierra, sino que termina en algún punto del espacio libre fuera de la nube, como se ilustra en la figura 1.6.

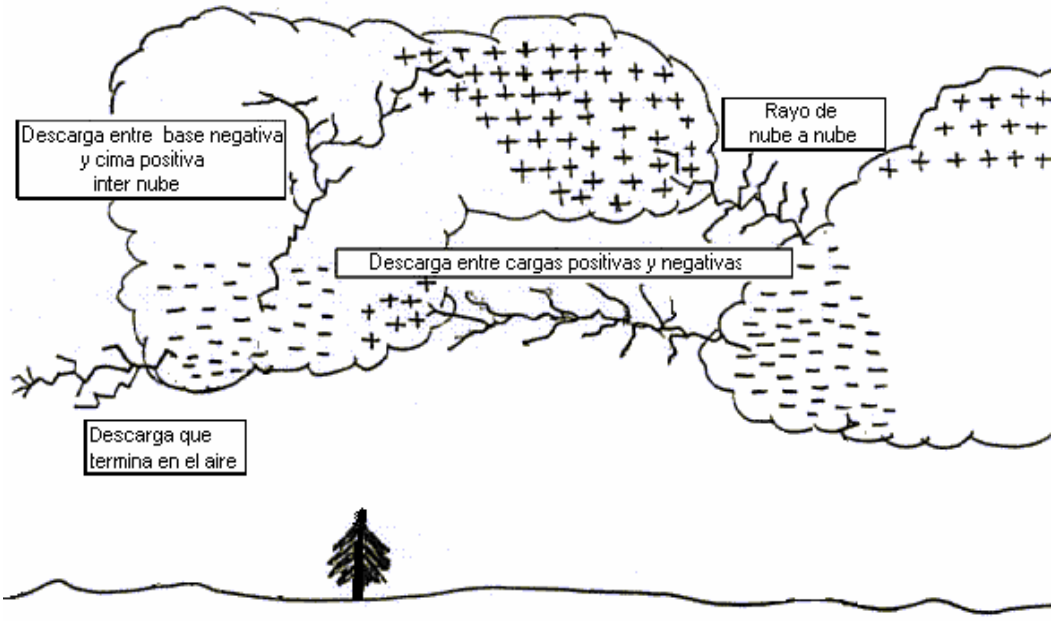


Figura 1.6. Clasificación de los tipos de rayos, según su conexión final.

Sin embargo, el tipo de rayo más estudiado es el rayo de nube a tierra, debido a la importancia que tiene en el diseño de protecciones contra las tormentas eléctricas, pues el rayo de nube a tierra puede causar daños por efecto de un golpe directo.

1.4 Otros tipos de rayos poco usuales.

Estos rayos están poco documentados y por lo tanto la mayoría de ellos no cuentan con una explicación científica. Dichas descargas son poco frecuentes, por lo que su estudio ha sido escaso, dada la rareza de los eventos en los que se presentan, como lo pueden ser las explosiones nucleares, erupciones volcánicas, rayos de bola o rayos de cuenta.

1.4.1 Rayo de bola.

El rayo de bola es un fenómeno para el que existen numerosos informes de testigos presénciales, pero carece de documentación científica como lo son fotografías, vídeos u otras grabaciones para uso científico.

Figura 1.7. Una reproducción de un leñador que describe un rayo de bola que "cruza una cocina y un granero"

Puede haber más de un tipo de rayo de bola y más de un mecanismo por el cual el rayo de bola se genera, pero la observación informa que tiene las siguientes características:

- Tamaño de una pelota de golf o un balón de baloncesto.
- Tiene un color normalmente rojo o naranja.

- Es tan luminoso como un foco de 60 watts y es casi constante hasta que se extingue.
- Su duración es cuando menos de unos segundos, después esto se deteriora silenciosamente y abruptamente, después de una explosión desaparece.

El rayo de bola se ve más a menudo cerca de lugares donde previamente ha ocurrido una descarga de nube a tierra. Parece poder atravesar las ventanas. Hay un número significativo de informes confiables que indican que el rayo de bola ha ocurrido dentro de aviones, cuando el fuselaje es de aluminio. En ocasiones se ha informado que el rayo de bola tiene un olor y puede dejar marcas de quemaduras, pero no se tienen informes confiables de que seres humanos sean alcanzados por este inusual fenómeno.

1.4.2 Rayo de cuenta.

El rayo de cuenta es un fenómeno óptico bien documentado en que el canal del rayo que conecta con tierra al parecer se separa en fragmentos luminosos generalmente de algunos metros de longitud. Estas cuentas parecen persistir durante un tiempo más largo en comparación con el canal de la descarga de nube a tierra usual.

Figura 1.8. Fotografía de un rayo de cuenta, en él se observa la distorsión del canal mediante pequeñas esferas en forma de cuenta.

El rayo de cuenta se debe a la vida larga de las secciones luminosas del canal del rayo con radios excepcionalmente grandes. Los canales que tienen un radio más grande toman un tiempo mayor en extinguirse en relación con un radio pequeño. El tiempo que tarda en extinguirse es proporcional al cuadrado del tamaño del radio. Conforme la luminosidad del canal del rayo se deteriora, éste toma la forma de un cordón de cuentas, parecido a un rosario, como se muestra en la figura 1.8. La forma que toma el canal consiste en un número grande de anillos o curvaturas.

1.4.3 Rayos en erupciones volcánicas.

Se ha observado que los rayos como descarga no asociadas con las tormentas, son originados en el material arrojado por algunos volcanes activos. Este material es principalmente la ceniza, que cuando es arrojada por el volcán se concentra en grandes nubes negras que reciben el nombre de nubes de ceniza. Se ha informado de aproximadamente 60 volcanes que han producido rayos durante la erupción. Estas descargas tienen una longitud de cuando menos cien metros y ocurren dentro de la nube de ceniza y de la nube de ceniza a tierra.

Figura 1.10. Fotografía de rayos durante una erupción volcánica en Islandia

De una serie de registros realizados en volcanes en erupción se han observado comportamientos similares en cada uno de los eventos de los cuales podemos destacar lo siguientes:

- El rayo sólo se observó durante las erupciones.
- El campo eléctrico medido se intensificó rápidamente cerca del volcán durante las vigorosas erupciones de nubes negras.
- La mayoría de las descargas que conectaron con tierra lo hicieron cerca de la fuente de las erupciones.

En lo que respecta a la polaridad de estas descargas, aún se discute si predominan las descargas positivas o negativas, esto se debe a que el número de estas descargas varía significativamente según la erupción en estudio. Una de las razones de este suceso esta relacionado con la distribución de la carga en la nube de ceniza o nubes de vapor de agua, dependiendo de la localización geográfica del volcán en erupción. Cuando el volcán esta situado en la costa o en una isla, la formación de las nubes que originan la descarga eléctrica es la evaporación del agua cuando se pone en contacto con la lava expulsada durante la erupción volcánica. Como la nube que da origen al rayo esta conformada de diferente material, esto ocasiona que la intensidad del campo eléctrico sea diferente en cada caso y por la tanto también la distribución de la carga de la nube.

Un efecto similar se presenta durante las tormentas de arena. La generación de carga y campo eléctrico para el desarrollo de los rayos en tormentas de arena, se debe a la fricción y choque entre partículas de arena. El continuo movimiento de las partículas de arena distribuye la carga dentro de la nube de polvo para que se lleve a cabo una descarga eléctrica. Es poco conocido este fenómeno y no en todas las tormentas de arena se presentan rayos.

1.4.4 Rayos en explosiones nucleares.

Cuando se lleva a cabo una detonación a nivel de tierra de dispositivos termonucleares como lo son las bombas H, la carga negativa se deposita en la atmósfera, lo que genera descargas de varios kilómetros de longitud.

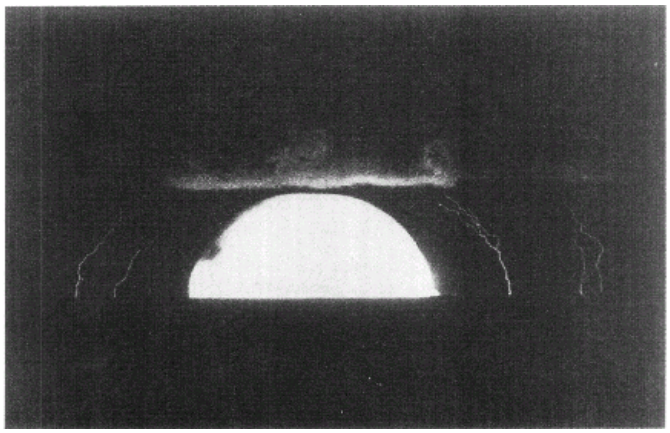


Figura 1.10. Fotografía tomada durante una explosión termonuclear, donde se observan descargas eléctricas.

El mecanismo probable para la carga necesaria y generación del campo eléctrico, se relaciona con los electrones de Compton[1] producidos por los rayos gamma de la detonación. La intensidad de campo eléctrico en la superficie se calculó en 30 kV/m, sin embargo este valor parece no ser suficiente para originar el rayo. Esta observación llevó a realizar nuevos estudios, en los que se comparó la intensidad luminosa de los canales del rayo registrada en fotografías tomadas durante una explosión nuclear y los arcos eléctricos generados en el laboratorio, concluyéndose que estos rayos probablemente tienen corrientes de alrededor de 250 kA, con una fluctuación de 50 kA.

[1] Efecto Compton, difusión de fotones debido a las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia.

Capitulo 2
Fenomenología del rayo y medios de observación.

La fenomenología del rayo comprende el estudio del fenómeno del rayo dentro de un marco científico para la clasificación y cuantificación de sus parámetros presentes en el proceso de descarga, así como también la ocurrencia de este fenómeno en diferentes puntos geográficos.

A finales del siglo XIX se pusieron disponibles para la investigación del rayo las herramientas de la fotografía y del espectroscopio que representó un importante avance tecnológico. En el periodo de 1897 a 1900 el alemán Pockels midió las corrientes del rayo mediante el análisis del campo magnético inducido por las corrientes del rayo. La fotografía de rápida resolución se usó en muchos experimentos en la última parte del siglo XIX para identificar impactos de rayo individuales que constituyen una descarga eléctrica a tierra.

En la era moderna C.T.R. Wilson fue el primero en usar la medida del campo eléctrico para estimar la estructura de cargas de la tormenta involucradas en las descargas eléctricas atmosféricas. Wilson ganó el Premio Nóbel por la invención de la Cámara de Nube, que significó una gran contribución para el entendimiento del rayo.

La investigación continuó a un paso firme hasta finales de 1960, año en el que aumentó el interés de proteger a los vehículos aerospaciales y la electrónica utilizada en las computadoras y otros dispositivos contra los efectos del rayo.

2.1 Clasificación del rayo.

El rayo se pude clasificar de varias maneras, especialmente el rayo de nube a tierra, ya que presenta diferentes características según la polaridad de la carga que transporta y la dirección en la cual es transportada dicha carga. Dicha clasificación se puede esquematizar como se muestra en la figura 2.1

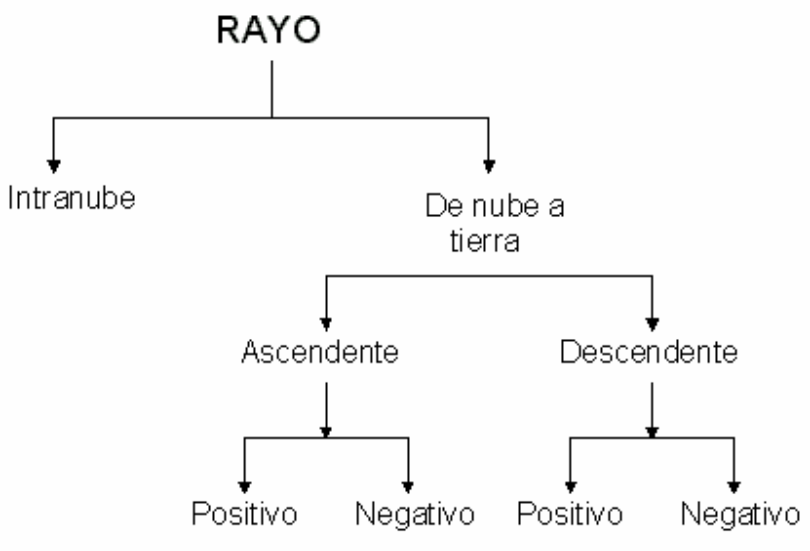


Figura 2.1. Clasificación del rayo según la carga que transporta y su dirección

La clasificación según la dirección en la que el rayo transporta la carga, es de la siguiente manera; si la carga es llevada de la nube a tierra es llamado rayo descendente, pero si la carga es transportada de la tierra hacia la nube es llamado rayo ascendente. Completa la clasificación del rayo la polaridad de la carga que trasporta, cuando el rayo transporta carga positiva es llamado rayo positivo, de la misma manera cuando transporta carga negativa es llamado rayo negativo.

El rayo se puede presentar de diversas maneras, pero siempre dentro de la clasificación antes mencionada. De esta manera podemos combinar las clasificaciones para dar nombre a los diferentes tipos de rayo que se presentan durante una tormenta eléctrica. Así se obtiene la siguiente clasificación; rayo negativo descendente, rayo negativo ascendente, rayo positivo descendente y rayo positivo ascendente, como se muestra en la figura 2.2.

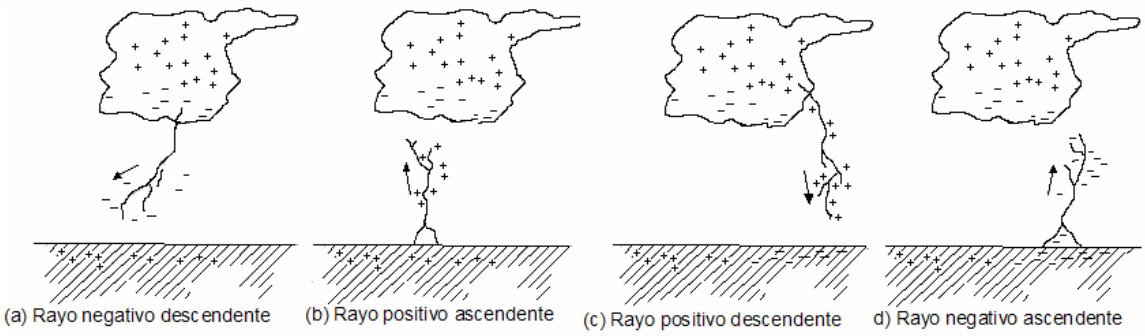


Figura 2.2. Representación de la clasificación de los rayos según la carga que transportan y su dirección

Se estima que el rayo negativo descendente representa aproximadamente el 90% o más del total de rayos nube a tierra que descargan a nivel mundial, y que el 10% o menos de las descargas de nube a tierra son de carácter positivo descendente. En el caso de los rayos del tipo negativo ascendente y positivo ascendente solo se presentan en los objetos que sobrepasen los 100 m de altura o en su defecto en objetos de altura moderada que se encuentren en la cima de las montañas.

2.2 Fenomenología del rayo

2.2.1 Rayo a tierra.

Es conocido como rayo a tierra aquella descarga que tiene su origen en la nube y tiene un recorrido descendente hasta golpear con tierra o un objeto aterrizado. El rayo negativo descendente, el cual transporta carga negativa, es el tipo de descarga más común y por lo tanto los sistemas de protección se ocupan más del estudio de este tipo de rayo.

El rayo a tierra esta compuesto de varios procesos, que en su conjunto consuman lo que coloquialmente conocemos como rayo, estos procesos son lo siguientes:

- Rompimiento preliminar.
- Líder escalonado descendente
- Punto de conexión.
- Rayo de retorno.
- Líder directo.
- Rayos de retorno subsecuentes.
- Corrientes intermedias.
- Procesos J y K

2.2.1.1 Rompimiento preliminar.

Con una distribución de carga como la del nubarrón, las condiciones están puestas para que se origine un fenómeno llamado rompimiento preliminar, este rompimiento es una descarga que enlaza la principal carga negativa con las regiones más bajas de carga positiva.

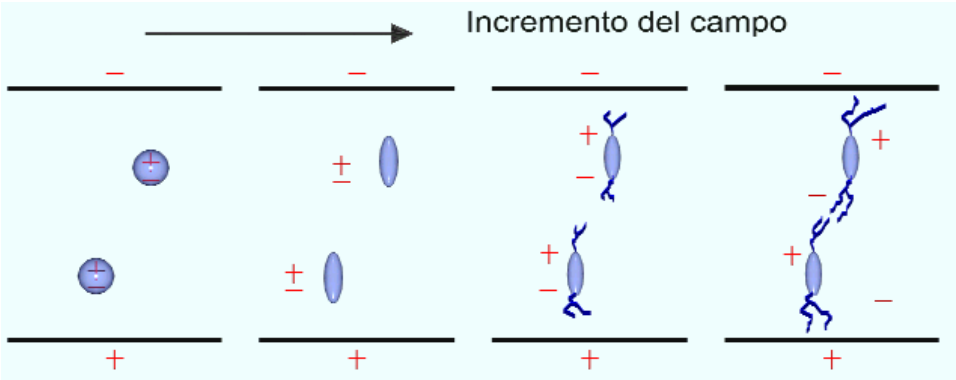


Figura 2.3. Representación de la distribución de la carga en el nubarrón y el rompimiento preliminar.

El modo mediante el cual se lleva a cabo el rompimiento preliminar es a través del principio de inducción electroestática. Siguiendo este principio grupos de gotas de agua son expuestas a un intenso campo eléctrico que las conglomera en dirección del campo, como se muestra en la figura 2.3. Millones de gotas de agua son involucradas en este proceso, acumulando pequeñas cargas de igual u opuesta polaridad y formando un canal que une los principales centros de carga del nubarrón.

2.2.1.2 Líder escalonado descendente

Después del rompimiento preliminar, la descarga abre salidas a tierra desde la nube, que se vuelven visibles al penetrar en el limite de la cima de la nube y en este progreso hacia la tierra se forma una descarga luminosa llamada “líder escalonado descendente”, como se muestra en la figura 2.4.

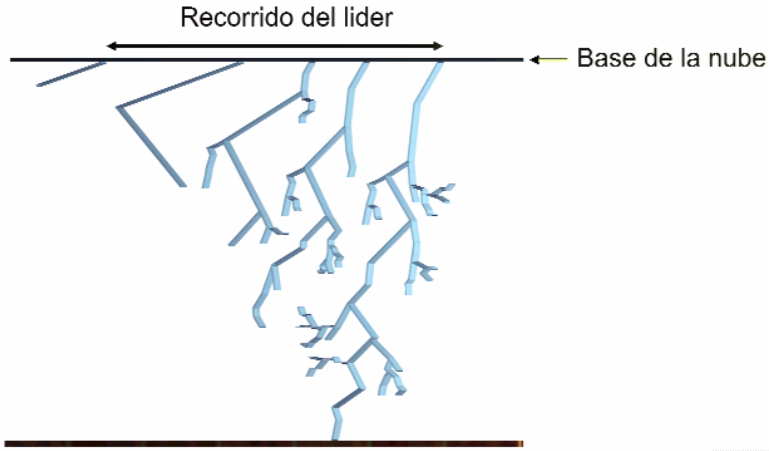


Figura 2.4. Recorrido del líder donde se observan los pasos discretos y las ramificaciones del líder:

El líder escalonado descendente es un canal de plasma negativamente cargado, que desciende en una serie de pasos discretos que encauzan la carga de la nube hacia la tierra, el líder escalonado descendente es atraído por bolsas de carga positiva que flotan en el aire. Las ramificaciones son usuales en la gran mayoría de los líderes, algunas de estas ramificaciones se alargan hacia el líder que se aproxima a tierra. Algunas características que presenta este líder escalonado son:

- Los pasos del líder escalonado miden aproximadamente 20 m.
- La duración de cada paso es típicamente de 1 μs y el intervalo de tiempo entre pasos es de 20 a 50 μs
- El valor máximo del pulso de corriente asociado con un paso individual se ha inferido que puede ser de 1 kA o mayor.
- La carga depositada a lo largo del canal puede ser de solo una fracción hasta 10 Coulombs.

El líder escalonado descendente pude clasificarse con base en las longitudes de los pasos y la velocidad del movimiento hacia tierra en dos categorías; alfa y beta [5].

El líder escalonado descendente alfa tiene una velocidad hacia tierra uniforme del orden de 10^5 m/s con escalones cortos y luminosos que no varían en cuanto a longitud y brillantez.

El líder escalonado descendente beta, tiene escalones largos y brillantes y su velocidad hacia tierra promedio es del orden de 10^6 m/s, presenta grandes ramificaciones cerca de la base de la nube, y conforme se acerca a la tierra presenta características similares al líder escalonado descendente alfa.

Dado que la mayoría de la evidencia fotográfica del líder escalonado descendente es del tipo alfa, y la mayor parte de las mediciones de campo eléctrico son del tipo beta, se deduce que los procesos beta se asocian a la parte final del rompimiento preliminar. Para fines prácticos se considera que todos los líderes escalonados son del tipo alfa.

Las mediciones de campo eléctrico en la trayectoria del líder escalonado descendente indican un cambio muy liso, lo cual implica que el líder escalonado descendente transporta la carga hacia tierra en forma continua entre los escalones, dicho en otras palabras la carga se mantiene constante de un escalón a otro.

2.2.1.3 Punto de conexión.

Conforme el líder escalonado descendente se aproxima a nivel de tierra se induce carga positiva en objetos aterrizados, debido a la gran cantidad de carga contenida a lo largo del canal del líder, especialmente en la punta que contiene carga negativa. Cuando ocurre esto se tiene un cuadro en el cual, el líder descendente contiene carga negativa a lo largo del canal del líder y una concentración de carga positiva a nivel de tierra o en cualquier otro objeto aterrizado, así pues, es bien sabido que las cargas de polaridad opuesta se atraen, de esta forma la carga positiva intentará unirse al líder descendente escalonado a través de un proceso conocido como líder ascendente o líder de conexión, que llevará a conectarse a ambos lideres, el ascendente y el descendente como se muestra en la figura 2.5.

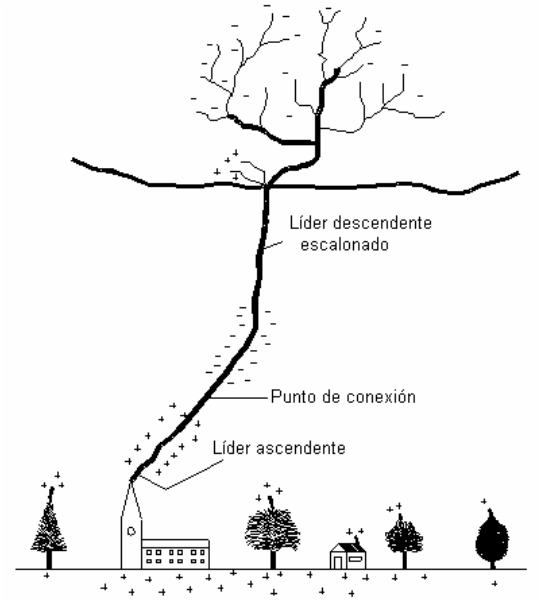


Figura 2.5. Ilustración del proceso de conexión entre líderes.

El proceso del líder ascendente es similar en su desarrollo al líder escalonado descendente. A la longitud entre el objeto a ser golpeado y el punto de conexión entre el líder descendente y el líder ascendente se le conoce como último paso de la descarga o distancia crítica de rompimiento.

2.2.1.4 Rayo de retorno.

Cuando el líder escalonado hace contacto con tierra o algún objeto sobre tierra se produce la neutralización de la carga del líder mediante un proceso conocido como rayo de retorno. El rayo de retorno es la parte brillante que puede apreciarse cuando vemos el rayo, algunas de sus características son:

- El rayo de retorno transporta a tierra varios Coulombs de carga depositada en el canal del líder
- La velocidad del rayo de retorno varía entre un tercio y un medio de la velocidad de la luz, ésta velocidad decrece conforme se incrementa la altura, cayendo abruptamente después de pasar cada ramificación mayor.

- El primer rayo de retorno ha registrado picos de corriente alrededor de los 30 kA en unos cuantos microsegundos y decae a la mitad del pico en unas cuantas decenas de microsegundos. Esta componente impulsiva de corriente puede ser seguida por corrientes de algunos cientos de amperes.

Es durante el proceso del rayo de retorno cuando ocurre el fenómeno que comúnmente llamamos trueno, sonido que asociamos con el rayo. Este estridente sonido es debido a que en el canal del rayo de retorno se alcanzan temperaturas muy altas de aproximadamente 30,000 °C en un intervalo de tiempo muy corto. Estas altas temperaturas hacen que el gas dentro del canal del rayo retorno se expanda a velocidades supersónicas, lo que ocasiona que se forme una onda de choque que usualmente reconocemos como el trueno.

Puede ocurrir que después de un cierto tiempo un segundo recorrido de líder siga por el recorrido de retorno inicial.

2.2.1.5 Líder directo.

En un rayo a tierra los rayos de retorno subsecuentes son iniciados por lideres directos, se les llama líder directo porque en las fotografías aparecen como una línea recta de aproximadamente 50 m de longitud que se propaga hacia tierra. El líder directo transporta potencial de nube a tierra. Cuando el líder escalonado hace contacto con tierra o algún objeto sobre tierra se produce la neutralización de la carga por medio de una onda ionizante de gradiente de potencial y tiene las siguientes características:

- Transporta carga negativa de 1 a 2 Coulombs.
- Tiene una corriente aproximadamente de 500 A.
- La velocidad del rayo de retorno varía entre 1 y 27 X 10^7 m/s.

La velocidad del líder directo está relacionada con el tamaño de los intervalos de tiempo entre descargas, para intervalos grandes se presentan velocidades bajas y para intervalos cortos velocidades altas. Cuando el intervalo de tiempo entre descargas es largo el líder directo sufre un cambio y puede observarse como

un líder escalonado, también llamado líder directo escalonado. Este líder directo escalonado presenta características diferentes como lo son:

- Una velocidad relativamente alta 10^6 m/s.
- Escalones cortos de aproximadamente 10 m cada uno.
- Intervalos de tiempo entre escalones de aproximadamente 10 µs.

2.2.1.6 Rayos de retorno subsecuentes.

Los rayos de retorno subsiguientes siguen el camino tomado por el primer regreso, con la excepción que no presenta ramificaciones. Es una regla que el siguiente rayo de retorno siga el camino luminoso del primer recorrido pero el viento alto de entrada puede soplar en el canal de manera lateral, así se presentan varios listones luminosos, llamados “listones de rayo”. Particularmente después de un largo intervalo de tiempo, un recorrido puede desviarse del camino original cerca de la tierra, entonces la misma descarga golpea a más de un punto. Los subsecuentes rayos de retorno incluyendo el líder directo se ilustran en la figura 2.6.

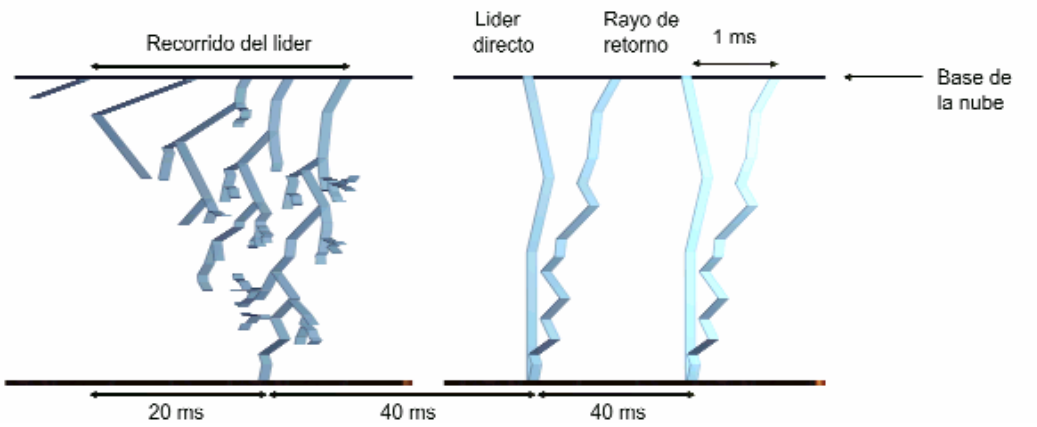


Figura 2.6. Rayo negativo a tierra, con sus intervalos de tiempo entre cada etapa.

2.2.1.7 Corrientes intermedias.

Después de que la carga de la nube se neutraliza por medio de la corriente del rayo de retorno, pueden originarse corrientes intermedias de bajo nivel a tierra.

La fuente de dichas corrientes intermedias se encuentra distribuida horizontalmente en la tierra. Existen dos tipos; corrientes intermedias cortas y corrientes intermedias largas.

Se llaman corrientes intermedias largas las que se presentan en intervalos de tiempo entre descargas mayores o iguales a 40 ms y cuya duración promedio es de 150 μs; transportan carga en un rango entre 2.9 y 3.4 Coulombs. La magnitud de las corrientes intermedias largas está entre 38 y 130 A. Aparentemente las corrientes intermedias largas son la causa de los efectos destructivos en los que interviene el fuego. Cuando las corrientes intermedias se presentan en intervalos de tiempo entre descargas menores a 40 ms se les da el nombre de corrientes intermedias cortas.

2.2.1.8 Procesos J y K.

Entre los rayos de retorno subsecuentes, el campo eléctrico sufre cambios sustanciales. Dichos cambios en el campo eléctrico se producen gracias al movimiento y reacomodo de las cargas dentro de la nube. Estos cambios son llamados procesos J y K. Estos cambios son observados como variaciones en la luminosidad del canal de la descarga.

El proceso K es asociado con corrientes de varios miles de amperes, esto es debido que en el proceso K tiene una velocidad de propagación inferior a la velocidad del rayo de retorno.

Si al mismo tiempo se presenta un proceso K y una corriente intermedia, se producirá una luminosidad bajo al canal de la nube llamado componente M. La corriente que transportan los componentes M se propaga desde la parte alta del canal del rayo de retorno, y cuando hace contacto con una región que contiene carga negativa la luminosidad se propaga hacia tierra como en forma similar a un líder directo.

Los componentes M transportan niveles de carga con valores típicos de 0.1 a 0.2 C, el tiempo de levantamiento de estos transitorios es del orden de 300 a 500 μs y la corriente continua entre la cresta máxima y los componentes M es de 100A

a 1 kA como valor máximo. La gráfica que representa este comportamiento se observa el la figura 2.7.

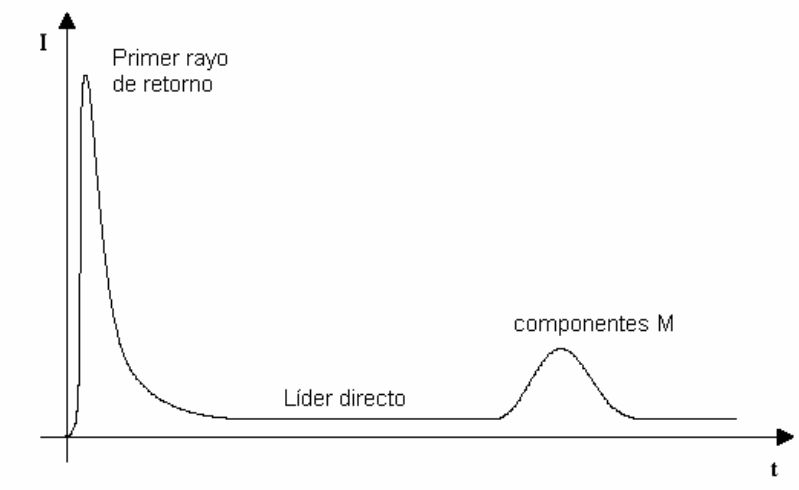
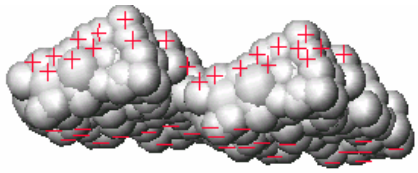


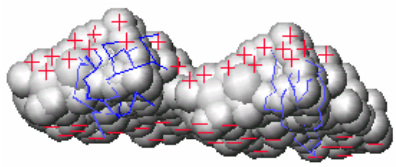
Figura 2.7.Grafica representativa del comportamiento de la corriente en un rayo.

El proceso completo de un rayo a tierra se puede ver de forma cronológica de la siguiente manera.

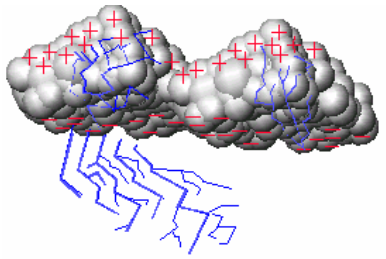
La parte más baja de un nubarrón se carga negativamente, el área superior se carga positivamente.



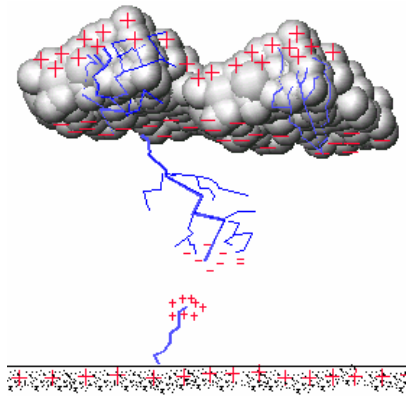
El rompimiento preliminar enlaza la principal carga negativa con las regiones más bajas de carga positiva.



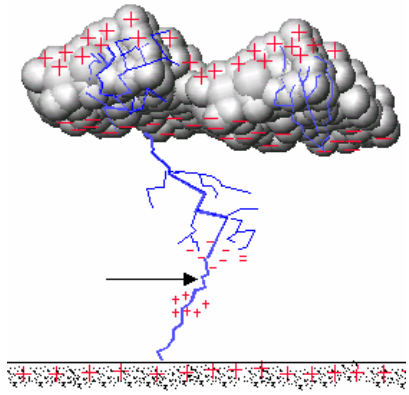
El rayo abre salidas a tierra desde la nube, en una serie de pasos discretos que encauzan la carga de la nube hacia la tierra.



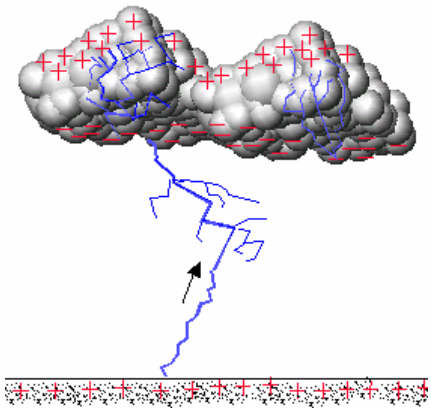
El líder descendente contiene carga negativa a lo largo del canal del líder y una concentración de carga positiva a nivel de tierra o cualquier otro objeto aterrizado, así pues, es bien sabido que las cargas de polaridad opuesta se atraen.



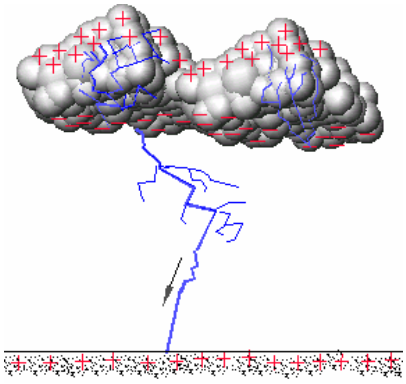
El líder ascendente y descendente se unirán, en un punto llamado “punto de conexión “.



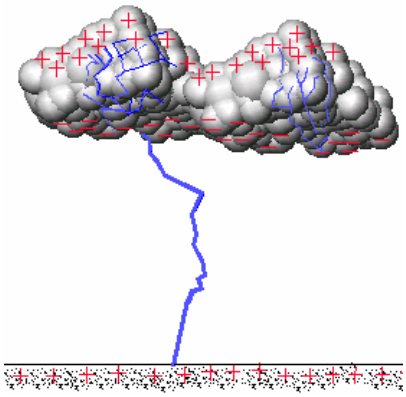
Cuando el líder escalonado hace contacto con tierra o algún objeto sobre tierra se produce la neutralización de la carga.



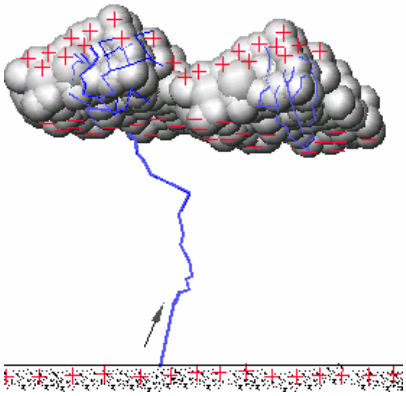
El líder directo aparece en las fotografías como una línea recta de aproximadamente 50 m de longitud que se propaga hacia tierra. Transporta potencial de nube a tierra.



Los procesos J, K son observados como cambios o variaciones en la luminosidad de canal de la descarga.



Los subsiguientes rayos de retorno siguen el camino tomado por el primer regreso, con la excepción que no presenta ramificaciones. Un recorrido puede desviarse del camino original cerca de la tierra, entonces la misma descarga golpea a más de un punto.



2.2.2 Rayos positivos.

Hasta el momento se han analizado únicamente los rayos de nube a tierra que llevan carga negativa. Esto representa la mayor parte de las descargas que se presentan durante una tormenta eléctrica, y principalmente en las tormentas tropicales.

Los rayos positivos son aquellos que transportan carga positiva de la nube a la tierra. Se piensa que menos del 10 por ciento de los rayos de nube a tierra son

positivos. El primer estudio bien documentado de rayos positivos es debido a K. Berger y sus colaboradores que presentaron las características estadísticas detalladas de 26 descargas de rayo positivos observados en Monte San Salvatore en Suiza.

A pesar de las diferencias en el desarrollo del golpe del líder inicial y el proceso del rayo de retorno, el proceso es el mismo para las descargas positivas y las descargas negativas para abrir caminos a tierra, con una diferencia importante: que los rayos positivos normalmente consisten en un solo golpe y parecen ocurrir hacia el fin de una tormenta.

Las descargas positivas han llamado la atención por las siguientes razones:

(i) Las corrientes del rayo generalmente son más altas (hasta 300 kA) y la carga que trasporta a tierra es más grande, cientos de Culombios o más.

(ii) El rayo positivo puede ser la descarga dominante de nube a tierra durante la estación fría, durante la fase de disipación de cualquier tormenta.

(iii) El rayo positivo se ha relacionado preferentemente con los fenómenos luminosos en la atmósfera media.

2.2.3 El rayo ascendente.

Los rayos ascendentes son generalmente más escasos, dado que se presentan a alturas que sobrepasan los 100 m. Los rayos ascendentes ocurren la mayoría de las veces durante las fases finales de una tormenta y frecuentemente coinciden con las descargas dentro de la nube.

El rayo ascendente puede presentar durante su desarrollo una disminución gradual de la luminosidad y puede contener rayos de retorno subsecuentes. Si tales rayos de retorno subsecuentes ocurren, se presenta un recorrido de retorno ascendente, la inversión de la dirección del líder se debe a la elevada concentración de campo eléctrico en lo alto de la punta de una estructura muy alta.

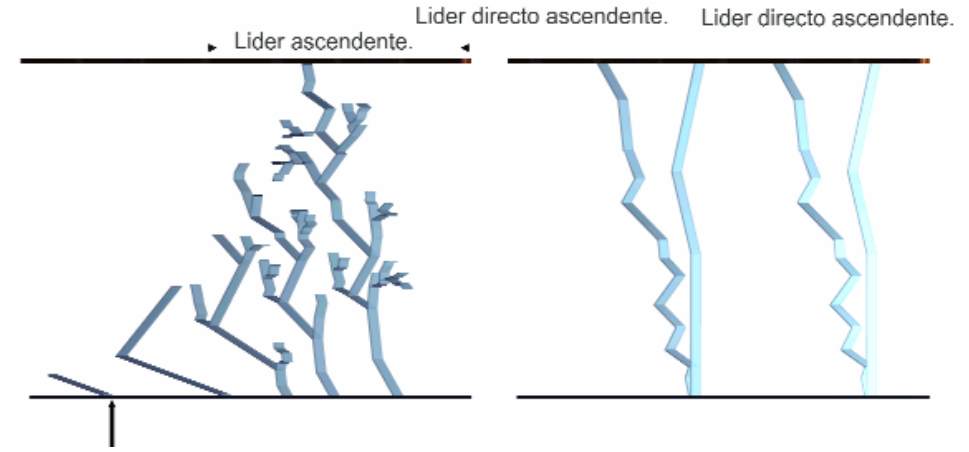


Figura 2.8. Esquematización del proceso de la descarga ascendente.

Sin embargo, debido a la baja probabilidad de ocurrencia de este tipo de descargas, no se incluyen en ningún procedimiento de diseño de protección contra tormentas eléctricas.

2.3 Parámetros relacionados con las corrientes del rayo.

La información más completa sobre la forma de onda de corrientes del rayo es debido al trabajo de K. Berger en la Montaña San Salvatore, en la que se emplearon varios oscilogramas con velocidades de barrido diferentes. Debe enfatizarse que la forma de onda de ninguna de estas corrientes del rayo es precisamente igual, sin embargo, se han establecido ciertos parámetros de característica comunes.

Los resultados de sus observaciones los podemos graficar con una distribución logarítmica indicada en la grafica 2.9.

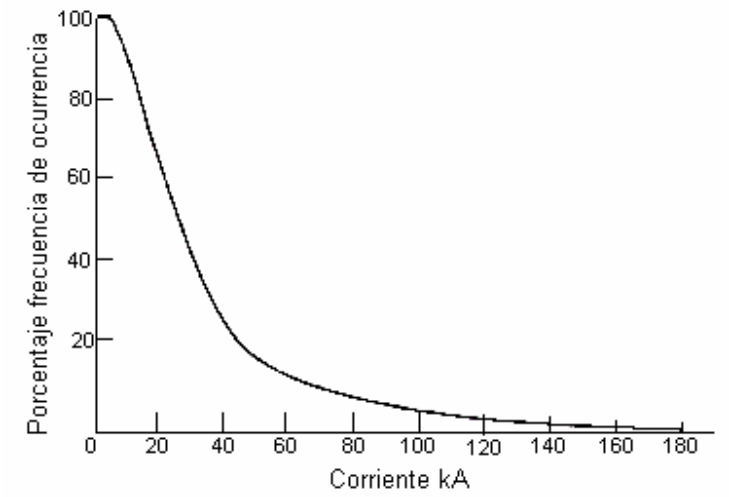


Figura 2.9. Distribución de frecuencia de las corrientes del rayo.

En la gráfica se omiten las corrientes menores de 2 kA, se observa que la media del relámpago es aproximadamente de 25 kA, mientras que las que exceden los 80 kA se consideran raras.

Una distribución global del rayo — de todos los tipos — es usada por la IEC (International Electrotechnical Commission); los parámetros típicos de las corrientes del rayo a tierra fueron resumidos por CIGRE (por sus siglas en francés Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques á Haute Tensión, o en español, la Conferencia Internacional Sistemas Eléctricos en Alto Voltaje), de los datos de K. Berger en la tabla 2.1 se dan tres porcentajes (95%, 50%, 5%) de casos que exceden los valores clasificados basados en una distribuciones de logaritmo natural.

Parámetro	Unidad	Valores en porcentaje que sobrepasan los valores clasificados		
		95%	50%	5%
Corrientes pico				
Primer rayo de retorno y rayos negativos	kA	14	30	80
Rayos subsecuentes negativos	kA	4.6	12	30
Rayos positivos	kA	4.6	35	250
Carga				
Primer rayo de retorno negativo	C	1.1	5.2	24
Rayos negativos	C	0.2	1.4	11
Rayos subsecuentes negativos	C	1.3	7.5	40
Rayo positivo	C	20	80	350
Duración del frente				
Primer rayo de retorno negativo	μs	1.8	5.5	18
Rayos de retorno subsecuentes negativos	μs	0.22	1.1	4.5
Rayos positivos	μs	3.5	22	200
Máximo cambio de flujo				
Primer rayo de retorno negativos	kA/μs	5.5	12	32
Rayos de retorno subsecuentes negativos	kA/μs	12	40	120
Rayos positivos	kA/μs	0.2	2.4	32
Duración del pulso				
Primer rayo de retorno negativo	μs	30	75	200
Rayos de retorno subsecuentes negativos	μs	6.5	32	140
Rayos positivos	μs	25	230	2000
Tiempo entre intervalos				
Rayos de retorno negativos	ms	7	33	150
Duración del rayo				
Negativo (simple o y múltiple)	ms	0.15	13	1100
Negativo (solo múltiple)	ms	31	180	900
Positivo	ms	14	85	500
$\int i^2 dt$				
Primer rayo de retorno negativo y rayos positivos	$A^2 s$	$6.0 10^3$	$5.5 10^4$	$5.5 10^5$
Rayos de retorno negativo	$A^2 s$	$5.5 10^2$	$6.0 10^3$	$5.2 10^4$
Rayos positivos	$A^2 s$	$2.2 10^5$	$6.5 10^5$	$1.5 10^7$

Tabla 2.1 Parámetros típicos relacionados con las corrientes del rayo

El calor disipado en un conductor que lleva una corriente de i amperios es proporcional al término $\int i^2 dt$ Los valores más altos registrados hasta ahora son 10^7 A^2s para las descargas positivas y 10^6 A^2s para las descargas negativas.

Para las descargas positivas se tiene una tabla similar a la 2.1, en donde están contenidos los valores más representativos de los rayos positivos.

Parámetro	Unidad	Tamaño simple	Porcentaje de valores excedidos en la tabla		
			95%	50%	5%
Corriente pico (máximo 2 kA)	kA	26	4.6	35	250
Carga (carga total)	C	26	20	80	350
Impulso de carga (excluyendo la corriente continua)	C	25	2.0	16	150
Duración de frente (2 kA de pico)	μs	19	3.5	22	200
di/dt Máximo	kA/μs	21	0.20	24	32
Duración del regreso (2 kA para pico alto en la cola)	μs	16	25	230	2000
Acción integral $\int i^2 dt$	$A^2 s$	26	$2.5x10^4$	$6.5x10^5$	$1.5x10^7$
Duración del rayo	ms	24	14	85	500

Tabla 1.2. Parámetros de la corriente de rayo para descargas positivas

2.4 Incidencia de los rayos.

Hace más de 75 años se realizó una estimación del total de rayos a nivel global, este total intentaba abarcar el total de descargas tanto las de intranube como las que descargan a tierra. Esta frecuencia resultó ser un promedio estimado de 100 por segundo. Para obtener este dato se combinó la información siguiente:

(i) Un promedio estimado de 16 tormentas por año sobre el área de observación supuesta, 512 km^2, de una estación climatológica individual que se extrapoló a la superficie de la Tierra entera aproximadamente de $5.1x10^8 Km^2$ (los datos del mar están incluidos).

(ii) Una duración media de la tormenta supuesta de 1 hora.

(iii) La proporción de descargas observada durante un período de 28 minutos de tormenta en Inglaterra.

El número de descargas a tierra por área por unidad tiempo, normalmente por kilómetro cuadrado por año, se le conoce comúnmente como densidad de rayos a tierra.

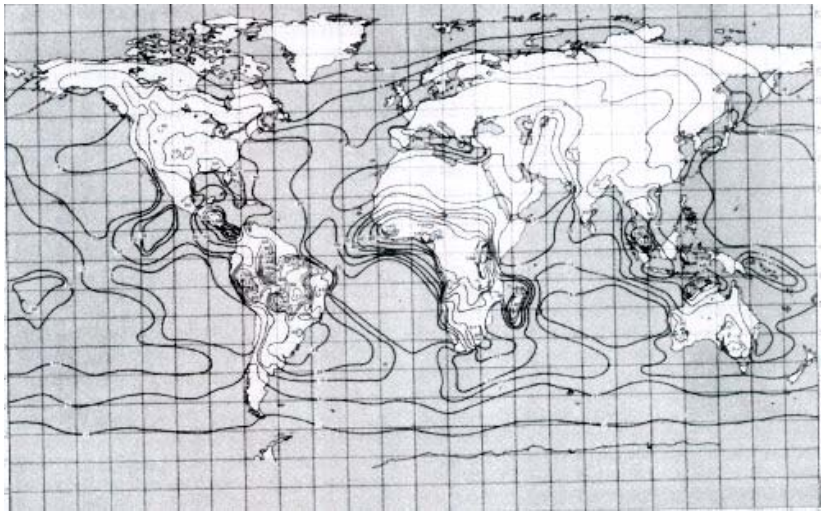
La densidad de rayos a tierra N_g es la información básica necesaria para la estimación de la incidencia de rayos en tierra. Otras medidas de la incidencia del rayo en un área incluyen el número anual de días tormenta T_D y el número anual de horas tormenta T_H. Las características del rayo de nube a tierra, así como el número y polaridad de la carga que conectara con tierra al parecer dependen de la estación, situación y tipo de tormenta.

Claramente, T_D, T_H, y N_g varía según la situación geográfica y la estación del año. Hay dos formas diferentes en que estas cantidades se presentan, de acuerdo al énfasis que se le de a la variabilidad: espacial o temporal. La variabilidad espacial normalmente se presenta en la forma de un mapa, y en la mayoría de los casos la variabilidad temporal se representa típicamente por el uso de valores de un promedio a largo plazo en forma de una serie de datos de tiempo para una sola situación.

2.4.1 Día tormenta.

El número anual de días tormenta T_D, también es llamado nivel ceráunico, es el único parámetro relacionado a la incidencia del rayo para el cual los datos mundiales son amplios y disponibles para muchas décadas. De hecho, en algunas situaciones específicas, tales datos están disponibles para más de un siglo. Un día tormenta se define como un día civil local durante el cual el trueno se oye por lo menos una vez. El rango práctico de capacidad audible del trueno es de aproximadamente 15 km, el rango máximo de capacidad audible típicamente es de 25 km aproximadamente. Se registran los datos del día tormenta en las estaciones climatológicas por los observadores, y al parecer el primer estudio

climatológico global de ocurrencia de la tormenta basado en los datos de T_D se publicó por Klossovsky en 1892 para 439 estaciones climatológicas. La distribución espacial para un periodo largo se presenta a menudo en valores medios de T_D en forma de mapas isoceráunicos.



2.10 Mapa que muestra el número anual de días tormenta, publicado en 1956

Se ha hecho un esfuerzo considerable para relacionar el número anual de días tormenta T_D, a la densidad de rayos a tierra en kilómetros cuadrados por año, N_g $[1/(km^2 yr)]$. La mayoría de las relaciones es de la forma,

$$N_g = aT_D^b \qquad 2.1$$

Donde a y b son las constantes empíricas. Al parecer, la expresión más fiable es la propuesta por Anderson presentada en 1984

$$N_g = 1.04T_D^{1.25} \qquad 2.2$$

La ecuación 2.2 se ha adoptado por el Instituto de Ingenieros en Eléctrica y Electrónica (IEEE) y por CIGRE para estimar la incidencia del rayo en las líneas de transmisión. Es importante notar que hay una considerable dispersión de los

puntos en los datos sobre la regresión lineal correspondiente a la ecuación 2.2. También vale la pena mencionar que la aplicación de la ecuación 2.2 para otras áreas del mundo requiere de cautela, pues la relación entre N_g y T_D puede variar de una región a otra.

2.4.2 Horas tormenta.

El número anual de horas tormenta T_H es un parámetro que se relaciona más estrechamente a la incidencia del rayo con los días tormenta. T_D no distingue entre una tormenta pequeña que produce rayos en unos cuantos minutos y una tormenta grande que dura varias horas y produce centenares de rayos, mientras que T_H sí lo hace. Los parámetros T_D y T_H se registran rutinariamente por los observadores en las estaciones climatológicas, aunque algunas estaciones sólo registran T_D.

Estudios posteriores mostraron que existían errores al tomar los parámetros de T_D y T_H para la determinación de descargas a tierra, estos es debido a que el observador debe grabar el principio y el fin de la tormenta. El fin de la tormenta normalmente se define como el tiempo después de que el trueno no se oye hasta un lapso de 15 minutos. Pero si el trueno se oye de nuevo después de 20 minutos, un nuevo principio se graba. Es posible que un observador pueda ser vacilante al considerar un trueno como el último cuando no es audible, pero la actividad del rayo visible está presente, esta situación es más probable que ocurra por la noche.

2.4.3 Contadores de Rayos

El contador de descargas atmosféricas o contador de rayos es un dispositivo que detecta la variación del campo eléctrico asociados a una descarga. La detección se realiza por medio de antenas a través de un circuito electrónico y un contador mecánico de alta impedancia. El principio de funcionamiento de los contadores de rayos a tierra esta basado en las variaciones del campo

electromagnético generado como consecuencia de la variación del campo eléctrico asociado a un rayo.

Los contadores de rayos se han utilizado desde 1960 y se han ido modernizando incrementado su rango de operación. Inicialmente operaban en un ancho de banda de 1 Hz a 50 kHz.

Son varios los modelos que existen y cada uno de ellos tiene diferentes características que se mencionan a continuación.

Modelo	**Características**
CIGRE 10kHz	Rango efectivo de 20 km. Buena discriminación de rayos entre nubes. Respuesta de frecuencia de 10 kHz. Respuesta gobernada por los campos de radiación de rayos a tierra. Radio de respuesta de rayos a tierra de 0.93.
CIGRE 500 Hz.	Rango efectivo aproximadamente de 30 km. Discriminación no muy buena, aproximadamente el 30% del total de los conteos son debido a rayos entre nubes. Respuesta de frecuencia de 500 Hz. Sensible a los campos electrostáticos del rayo.
RSA-5	Inadecuada discriminación de rayos entre nubes. Muy sensitivos a rayos entre nubes.
CCIR	Rango efectivo de aproximadamente 144 km. Respuesta similar al CIGRE 10 kHz. Sensibilidad aproximadamente de ocho veces mayor a la del CIGRE 10 kHz. Reacciona fácilmente a los pulsos de los campos de radiación de ambas polaridades.

Tabla 6.3. Características de los diferentes modelos de contadores de rayos a tierra.

2.4.4 Detectores satelitales.

Las descargas entre nubes son considerablemente más frecuentes que las descargas de nube a tierra. La proporción de rayos de nube a nube y de nube a tierra, varía considerablemente con la topografía de la tierra. Otro rasgo notable es un aumento en el porcentaje de rayos a tierra conforme aumenta la latitud geográfica. Así, los rayos a tierra son relativamente más frecuentes en lugares templados que en áreas tropicales.

Los últimos estudios realizados por la NASA han permitido por primera vez trazar la distribución global de rayo, siendo notable la variación en función de la latitud, longitud y estación del año. Esta nueva perspectiva del rayo es posible gracias a dos descubrimientos basados en tecnología satelital. El detector óptico de oscilación (OTD) y el sensor de imagen de relámpago (LIS). El OTD y el LIS son dos sensores ópticos que se han puesto en satélites que se encuentran en órbita terrestre.

Básicamente, estos sensores ópticos usan cámaras de gran velocidad para buscar cambios en las cimas de nubes, cambios que a simple vista no se pueden ver, pero utilizando los sensores ópticos es posible observar dichos cambios. Gracias al análisis que realizan los sensores ópticos de la región del espectro infrarrojo es posible observar el rayo durante un breve tiempo y cuantificarlo.

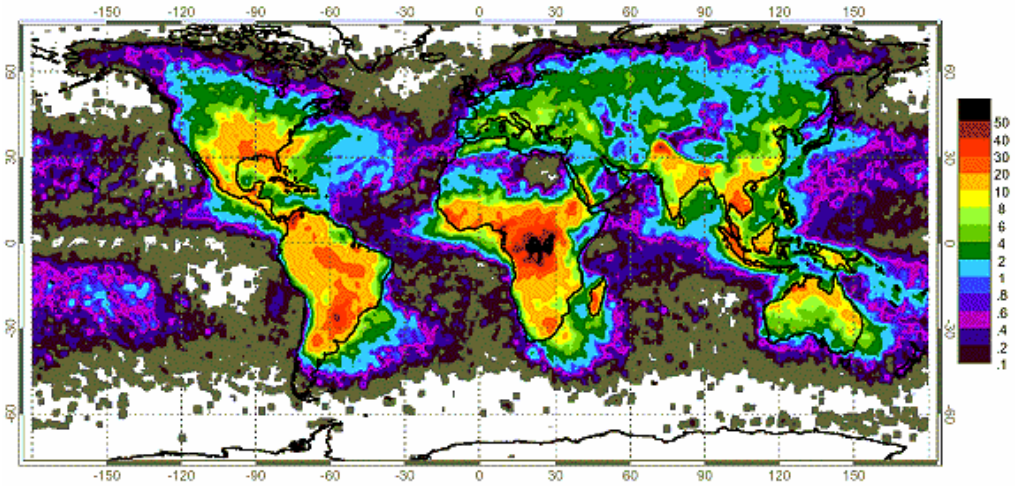


Figura 2.11. Los datos de los detectores satelitales revelan una distribución desigual en la incidencia de los rayos a nivel mundial

La utilización de los detectores satelitales ha permitido conocer la influencia que tiene la topografía, las corrientes marinas y las masas de aire provenientes de los Océanos. Los datos del satélite también rastrean modelos de intensidad del rayo. Por ejemplo en el hemisferio norte, se presentan más rayos durante los meses de verano, pero en las regiones ecuatoriales, el rayo aparece más a menudo durante el otoño y primavera. Esta variación en función de la estación del año contribuye a una asimetría norte-sur. La diferencia es porque el rayo en América del Sur ocurre durante una estación cuando la tierra está húmeda y en América del Norte pasa cuando la tierra está seca.

En el Ártico y Antártico hay muy pocas tormentas eléctricas y por consiguiente, casi ningún rayo en absoluto. Las áreas oceánicas también experimentan una baja incidencia de rayos, debido a que no se presentan tormentas sobre la superficie de los océanos, ya que la elevada capacidad calorífica del agua evita el calentamiento del aire en las zonas bajas y por lo tanto es imposible formar una tormenta.

2.5 Datos para México

En México se ha realizado un esfuerzo para conocer la densidad de rayos a tierra N_g, ya que los estudios realizados a nivel internacional no corresponden a la topografía de nuestro país. Con el propósito de obtener la relación de densidad de rayos a tierra (DRT) contra días tormenta para el territorio Mexicano, y para lograr tal objetivo como un proyecto de utilidad nacional, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en participación con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), instalaron 120 contadores de rayos, del tipo CIGRE 10 kHz, a lo largo de la Republica Mexicana [13]. La información proporcionada por la red es básica para el diseño de los Sistemas de Protección contra Tormentas Eléctricas.

La variedad topográfica del territorio Mexicano, implicó que los contadores debieran ser evaluados considerando sus sensibilidades para cada región según las condiciones geográficas. De este modo se utilizó el siguiente criterio para la selección de los lugares para la instalación de los contadores de rayos:

a) Seleccionar regiones donde se encontraran líneas de transmisión,
b) Seleccionar regiones donde el nivel ceráunico fuera alto,
c) Garantizar que la lectura fuera tomada diariamente.

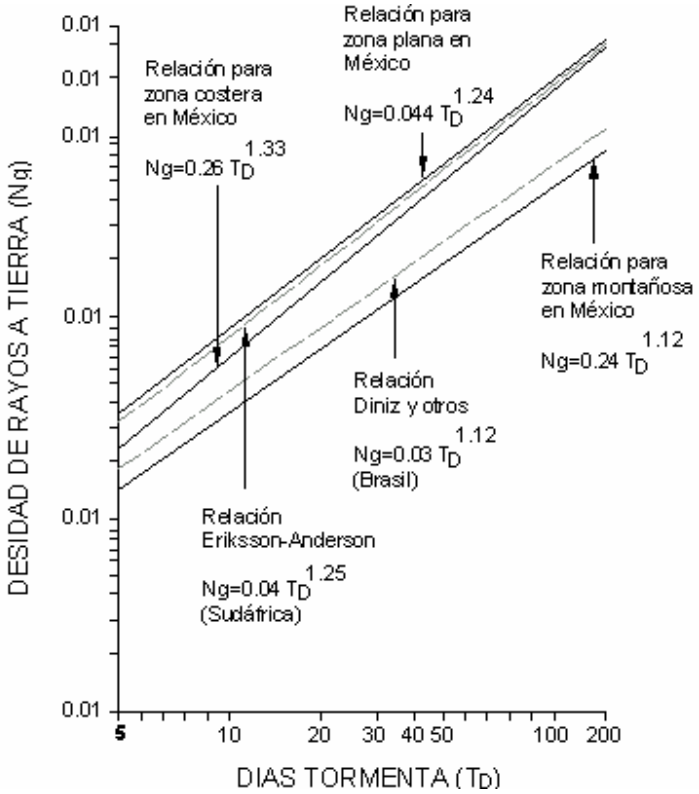
Los datos obtenidos de la red de contadores de rayos fueron almacenados en una base de datos para generar estadísticas mensuales y anuales.

Para la realización del estudio llevado a cabo en México fue necesario considerar diversas regiones, según el lugar de operación de los contadores. La clasificación de las áreas de operación se hizo de la siguiente manera:

- Si el contador es situado en una región montañosa, a menos de 20 km, la referencia es una región montañosa
- Si el contador es situado cerca del mar, a menos de 5km, se le llama región costera.
- Si el contador es situado lejos de las montañas, a más de 25 km, se le llama región plana.

2.5.1 Correlación entre densidad de rayos y nivel ceráunico.

El número medio de días tormenta, es una valoración subjetiva del riesgo por rayo. La información que arroja un día tormenta es ambigua, porque proporciona el número total de rayos durante una tormenta, contabilizando tanto los rayos de nube a tierra como los de intranube. Por esta razón es de gran importancia aplicar un criterio más discriminante para la valoración del número de rayos que implican un riesgo durante un día tormenta. De esta manera la relación de densidad de rayos a tierra contra días tormenta, se obtuvo para el territorio Mexicano tomando en cuenta los datos proporcionados oportunamente, para examinar la relación entre observaciones regionales de N_g y T_D a lo largo del extenso rango de variaciones en el nivel ceráunico. Los resultados de las relaciones para la media de los registros de N_g y T_D — graficado de 64 estaciones y 640 registros anuales a lo largo de territorio Mexicano — están indicados en la figura 2.12.



2.12 Relaciones entre densidad de rayos a tierra (Ng) y días tormenta (TD) en el territorio Mexicano y otras regiones.

Las relaciones obtenidas, una para cada región dominante en el país, se compararon con las obtenidas por estudios previos del mismo tipo en otros países, arrojando las siguientes observaciones:

- T_D contra N_g obtenidas para regiones planas es similar a la relación obtenida por el sistema instalado en el sur de África (relación Anderson-Eriksson).
- La relación T_D contra N_g obtenida para regiones montañosas es similar a la relación obtenida por el sistema instalado en las mismas regiones de Brasil (relación Diniz y otros)
- La relación T_D contra N_g obtenida para regiones costeras en México muestra valores de N_g ligeramente más pequeños que la relación en regiones planas.

En las relaciones obtenidas para México se puede observar un vacío entre las regiones planas y montañosas, éste espacio es de importancia en un intervalo completo de un día tormenta. Esto significa que puede producirse una larga atenuación de las señales del campo eléctrico de un rayo de nube a tierra. Esta atenuación se cree que es debida a:

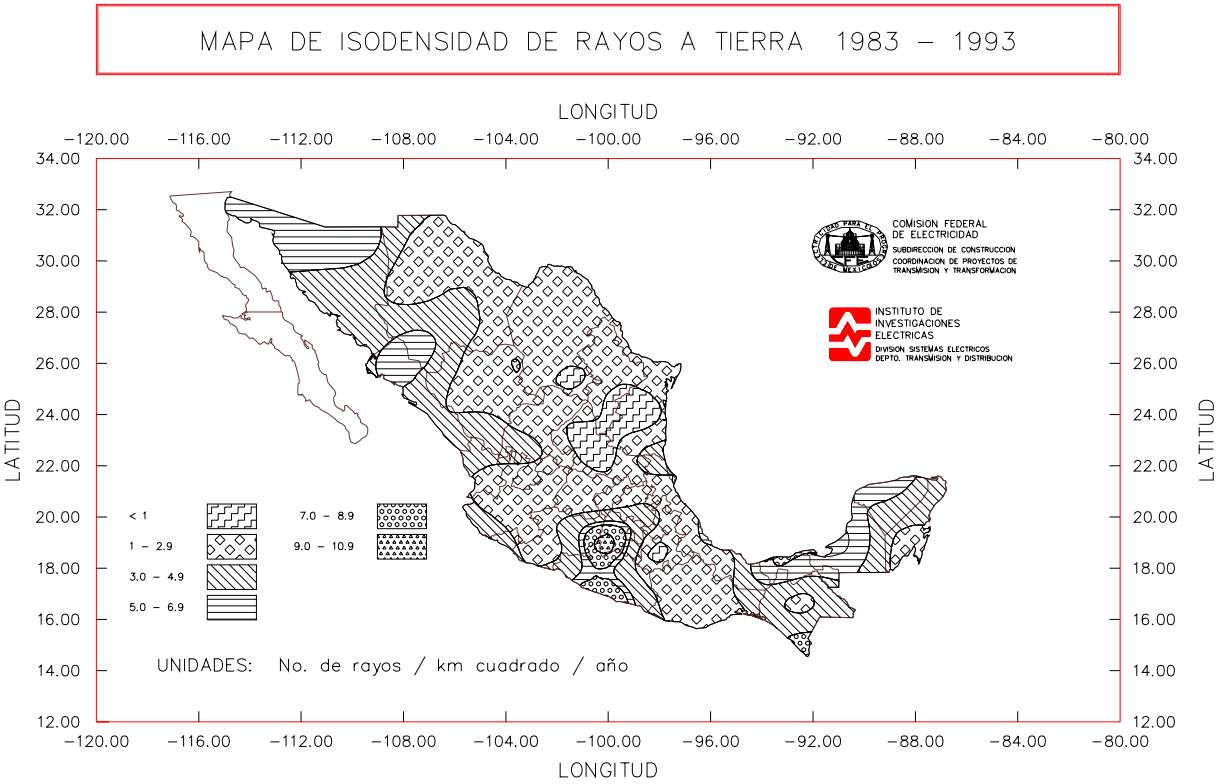
- El escudo natural que forman las montañas.
- A la alta resistividad del terreno.

Ambos factores pueden producir un pobre registro en el funcionamiento del contador, causando que el circuito electrónico del contador no funcione en algunos casos. De hecho el rango efectivo de un contador tiene que ser determinado en regiones planas, el cual es tomado como referencia para tomar en cuenta los efectos de la montaña cuando el contador es instalado en regiones montañosas.

2.5.2 Mapa de isodensidad de rayos a tierra.

Es de gran importancia conocer la distribución de descargas a tierra por unidad de área en el territorio nacional. De acuerdo a la información obtenida por la red de contadores ubicada en toda la Republica Mexicana, es posible conocer esta distribución de descargas a tierra por unidad de área de una forma adecuada y precisa. El objetivo final de tener la información de DRT anual o promedio es obtener un mapa de densidad de rayos a tierra confiable, el cual servirá para diseñar en forma óptima y eficiente sistemas de protección contra el efecto de las descargas atmosféricas.

Para la generación de este mapa se utiliza la DRT anual o promedio y las coordenadas de localización de cada contador. Aplicando métodos no lineales de interpolación se obtuvo el mapa de isodensidad de rayos a tierra como se muestra en la figura 2.13, en dicha figura cada área sombreada cubre una región de igual valor y representa la DRT de esa área.



2.13 Mapa de Densidad de Rayos a Tierra promedio 1983-1993

Capitulo 3
Evolución de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas.

Los sistemas de protección contra tormentas eléctricas tienen su origen en los estudios realizados por Benjamín Franklin, quién determinó experimentalmente la naturaleza eléctrica del rayo. Para llegar a esta conclusión fue necesario que los conocimientos científicos de la época tuvieran la suficiente madurez, pues Franklin necesitó de bases sólidas sobre el comportamiento de la electricidad.

3.1 Antecedentes históricos de la investigación de los fenómenos eléctricos.

Debido a que la electricidad es un fenómeno físico con el cual no se tiene un contacto u observación de forma inmediata, pues no se percibe de forma evidente a excepción de los rayos como el fenómeno meteorológico más próximo, su estudio fue tardío en la historia de la física. El orden cronológico en el cual fueron hechos los descubrimientos eléctricos se presenta a continuación.

Fecha	Personaje	Aportación.
Siglo V antes de Cristo.	Tales de Mileto	Este estudioso griego observó que un trozo de ámbar después de ser frotado con una piel de animal adquiría la propiedad de atraer cuerpos ligeros, como trozos de paja y pequeñas semillas.
1269	Pedro Peregrino	Explicó cómo determinar los polos de la piedra de imán mediante una aguja imantada, dio los nombres de polo Norte y Sur a los del imán y describió la ley de atracción de los polos opuestos y de repulsión a los polos iguales.
1600	William Gilbert	A Gilbert se le atribuye realmente el descubrimiento de la electricidad. Fue el primero en realizar experimentos de electrostática y magnetismo, y quizás su aportación más importante a la ciencia fue la demostración experimental del magnetismo terrestre. También fue el primero en emplear los términos "energía eléctrica", "atracción eléctrica" o "polo magnético".

1663	Otto Von Guericke	Inventó la primera máquina electrostática capaz de producir una descarga eléctrica. Esta máquina fue formada por una esfera de azufre montada sobre un eje y era movida por una manivela sobre la que se inducía una carga cuando se apoyaba la mano sobre ella.
Principios del siglo XVIII	Francis Hauksbee	Diseñó un aparato consistente en un globo de vidrio que podía ser girado rápidamente mediante un sistema móvil, de modo que resultaba posible cargarlo eléctricamente mediante rozamiento con un paño de algodón o la mano
1745	Pieter van Musschenbroek Ewald Georg von Kleist	Inventaron un condensador al que llamaron botella de Leyden que era una botella de cristal llena de agua y cerrada, un alambre o una aguja traspasaba el tapón y estaba en contacto con el agua. La botella se cargaba sujetándola con una mano y poniendo la parte saliente del alambre en contacto con un dispositivo eléctrico.
Entre 1729 y 1736	Stephen Gray y Jean Desaguliers	Demostraron que la electricidad era como un fluido que podía viajar a través de un conductor. Establecieron la diferencia entre materiales conductores y no aisladores.
1733	Charles Dufay	Estableció que existe dos tipos de electricidad, la vitrosa que se produce al frotar una barra de vidrio con seda y la resinosa que se produce frotando una piel en una barra de goma, Benjamín Franklin las llamaría luego electricidad positiva y negativa respectivamente.

Tabla 3.1. Cronología de los descubrimientos de los fenómenos eléctricos.

La investigación científica de la época había proporcionado conocimientos suficientes sobre la electricidad estática, aunque en ese entonces no se tenía un entendimiento de todos los fenómenos eléctricos como lo tenemos hoy en día. Podemos listar el conocimiento de la electricidad estática de la época de la siguiente forma:

- La electricidad puede ser transportada por materiales llamados conductores.
- Objetos terminados en punta atraen la electricidad.
- Cuando se tienen diferentes caminos, la electricidad se libera por el camino de menor resistencia.
- La electricidad genera fuego en materiales combustibles.
- La electricidad puede llegar a fundir metales.
- La electricidad pude destruir materiales poco conductores.
- En la electricidad intervienen dos polos magnéticos.

Estos conceptos ayudaron a Benjamín Franklin a investigar la naturaleza eléctrica del rayo y proporcionaron la principal herramienta para su investigación y posteriores conclusiones.

3.2 Experimento de Benjamín Franklin

Benjamín Franklin realizó el primer estudio sistemático y científico del rayo durante 1752. Mientras otros investigadores previamente habían notado la similitud en el laboratorio entre la chispa eléctrica y rayo, Franklin fue el primero en diseñar un experimento que demostró la naturaleza eléctrica del rayo. Franklin observó que una descarga producida en la botella de Leyden generaba una chispa acompañada de un chasquido con una increíble semejanza al rayo y al trueno, solo que a menor escala, de esta semejanza nació la interrogante. ¿Podía el cielo y la tierra comportarse como una botella de Lyden que se descarga a través de los rayos?

Figura 3.1.Experimento de Benjamín Franklin para demostrar la naturaleza eléctrica del rayo.

En su experimento, Franklin supuso que las nubes se cargan eléctricamente, por lo tanto el rayo también debía ser de naturaleza eléctrica. Utilizando una cometa elevó una vara metálica durante una tormenta, empleó un hilo mojado para conducir la electricidad, una vara metálica y una llave cerca del extremo que sostenía Franklin, él sujetaba el arreglo del cometa con un tramo de hilo seco. La llave se cargó eléctricamente produciendo chispas con la proximidad de otro objeto, las fibras del hilo se erizaban por la estática, y hasta fue posible cargar una

botella de Lyden. La cometa no fue impactada por un rayo, pero el experimento indicaba una corriente, producto de la diferencia de tensión entre las nubes y la tierra. Franklin demostró que tanto las descargas que se producían en una botella de Lyden como las de una tormenta eran fenómenos de la misma naturaleza. En 1752 Benjamín Franklin publicó en su famoso Almanaque del Pobre Richard (Poor Richard's Alamac), una aplicación interesante para la protección contra el rayo. Propuso la idea de utilizar el efecto punta para protegerse del impacto del rayo; de esta forma nace el concepto de pararrayos.

Al año siguiente (1753) el Ruso Georg Wilhem Richmann, trabajó sobre la idea de Franklin disponiendo una varilla para la captura de rayos, pero no fue tan afortunado como su colega norteamericano y murió al recibir una descarga.

Los trabajos de Franklin fueron el punto de partida para el desarrollo de la protección contra tormentas eléctricas. Los nuevos conocimientos obra de sus investigaciones se difundieron rápidamente por Estados Unidos y Europa y el sistema de protección desarrollado por Franklin fue utilizado principalmente en iglesias, edificios públicos y construcciones agrícolas en donde el daño a causa de un impacto directo de rayo era frecuente y en ocasiones con consecuencias catastróficas.

3.3 Desarrollo del sistema de protección convencional.

El éxito del sistema de protección desarrollado por Franklin mostró resultados favorables muy pronto y numerosas construcciones fueron protegidas con el “sistema de protección convencional o SPC.”, así llamado en este trabajo. El sistema de protección convencional en sus inicios era muy sencillo y era implementado de la siguiente manera:

Una vara metálica con punta, en la parte mas alta de la estructura, 6 a 8 pies por encima del punto mas alto, esta vara usualmente era construida de varillas metálicas usadas por los fabricantes de clavos. La vara metálica era sujetada a la parte más alta con ayuda de una estructura de latón. Si la casa era demasiado grande se podía poner una vara en cada esquina con un alambre delgado a lo

largo de la orquilla de la casa. Los cables conductores y la vara puntiaguda se sujetaban al edificio con grapas. Complementaba el sistema de protección una conexión a tierra, conformado de una vara metálica enterrada en el suelo húmedo a una profundidad de 3 o 4 pies. Cuando una casa o cualquier otra estructura eran protegidas de esta manera, se aseguraba que no podía ser dañada por efectos de un rayo. A las varas metálicas con punta afilada utilizadas para conducir la energía del rayo a tierra se le conoce como electrodos Franklin.

El sistema de protección convencional fue instalado por primera vez en 1752, en una casa de Filadelfia propiedad de Franklin, la próxima estructura en utilizar el SPC fue la casa de William West comerciante de Filadelfia en 1760. En el mismo año fue protegido con el SPC el faro de madera de Eddystone, cerca de Plymouth Inglaterra, ésta fue la primera instalación inglesa en utilizar el SPC. Del mismo modo Louis Guilleaume Le Monnier utilizo SPC en Francia y Giovani Babtiste en Italia. Los sistemas de protección convencionales mas viejos instalados en Europa son; La iglesia de San Marco en Venecia, la casa del físico Johann Reimarus en 1768 y la iglesia de San Jacobi en 1769 ambas construcciones en Hamburgo y la iglesia Agustina de Sagan en Silesia en 1769. Este método fue aceptado rápidamente, no solo en Estados Unidos, sino también en Europa; aproximadamente 24 iglesias fueron protegidas con el SPC.

Sin embargo el SPC no funcionó siempre como se esperaba y hubo casos que mostraron sus deficiencias. Algunos de los casos más importantes en los cuales fueron dañados edificios provistos con el SPC se mencionan a continuación:

Un caso catastrófico en el cual estaba involucrada pólvora fue en 1769 cuando la iglesia de San Nazaire en Brescia fue golpeada por un rayo, en dicha iglesia se habían almacenado cerca de 100 toneladas de pólvora. Las consecuencias fueron trágicas ya que murieron mas de 3000 personas y un sexto de la ciudad fue destruida.

Uno de los casos que acaparó la atención fue el daño causado en la Casa del Consejo de Artillería, en Purfleet, Essex, Inglaterra, equipada con el SPC. El rayo penetró la protección, incidiendo en una pieza de unión de acero embebida

en concreto cerca de uno de los Electrodos Franklin, cuyo extremo inferior conectaba a las canaletas que eran las piezas metálicas principales del edificio, y no contaban con una conexión a tierra. Este incidente, debido a la presencia de objetos metálicos adicionales al sistema de protección convencional, originó la primera recomendación sobre la unión equipotencial y el concepto de distancia de protección de los electrodos de Franklin. [3]

En 1773, Franklin señaló que "edificios que tienen sus tejados cubiertos con plomo u otro metal, y picos de metal continuos desde el tejado hasta el piso y enterrados, nunca serian dañados por impacto de un rayo; siempre que el rayo impacte sobre la construcción y la corriente se transporte por el metal y no por las paredes del edificio”.

En Polonia en el año de 1784, Józef Herman Osinski publicó un libro en cuyo contenido de cincuenta hojas y 18 dibujos se describen en primer término el pararrayos, electrodo de Franklin como se conoce comúnmente, y en su parte complementaria da ejemplos de la eficiencia de las instalaciones que contaban con el SPC. Los dibujos contenidos en el libro de Osinski se muestran en la figura 3.2.

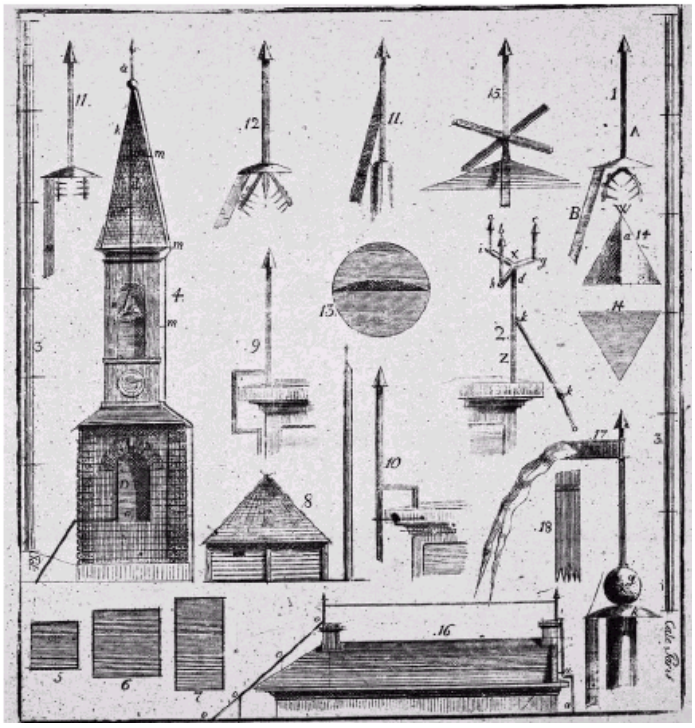


Figura 3.2. Dibujos publicados en le libro de Józef Herman Osinski

En capítulos posteriores Osinski aborda los temas de cómo instalar los SPC además de dar una estimación de los costos de los mismos. Trabajos similares se publicaron en otras partes del mundo pero en todos ellos encontramos el rasgo característico de tener como base las investigaciones hechas por Benjamín Franklin.

3.4 Desarrollo de la zona protección.

A raíz de las fallas de los SPC nació la necesidad de hacer una mayor investigación en cuanto a la zona de protección de los electrodos Franklin. La zona de protección se define como la distancia inmune a un golpe directo de un rayo debido a la ubicación de los electrodos Franklin. La distancia de protección es un concepto que aun en nuestros días se sigue discutiendo y desarrollando con la aparición de nuevos conocimientos en la protección contra tormentas eléctricas.

Aunque se le atribuye a Franklin el haber propuesto el concepto del cono de protección, no desarrolló el rango de efectividad de los electrodos Franklin, éste conocimiento tuvo que esperar hasta 1823, cuando Gay Lussac junto con otros investigadores renombrados en el campo de los fenómenos eléctricos como lo fueron; M.M. Poisson, Lefevre-Gineau, Girard, Dulong y Fresnel trabajaron en un informe encargado por el ministro del interior de Francia por medio de la Academia de Ciencias. El informe tuvo como propósito la evaluación de los modelos de protección contra tormentas eléctricas disponibles, pues se requería proteger los edificios públicos de la gran actividad de tormentas eléctricas acontecida en la mayor parte de Europa. En dicho informe se propuso un cono de protección con un radio de dos veces la altura de la terminal aérea, como se muestra en la figura 3.3

El documento elaborado por Lussac cobro tal importancia, que el gobierno francés ordenó su distribución con el propósito de hacerlo del conocimiento general, llegó a ser la primera guía de una zona de protección específica para su aplicación a las terminales aéreas de un SPC.

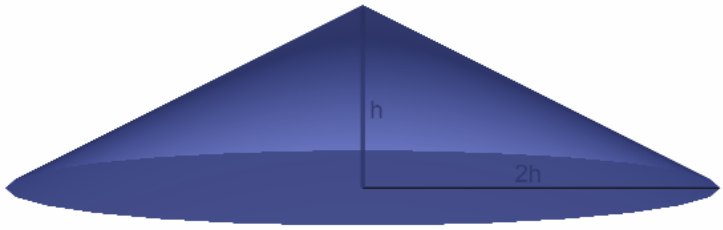


Figura 3.3. Zona de protección propuesta por Gay Lussac.

Para 1840 Sir William Snow Harris, preocupado por la protección de embarcaciones, examinó los eventos en los cuales se habían presentado golpes de rayo. Como resultado de sus observaciones llegó a la conclusión que el cono de protección de 2:1 propuesto por Gay Lussac no era eficaz para todos los casos, pero la elevación que ofrecían las naves mar adentro sin ningún objeto que influyera alrededor de la embarcación ofrecía un muy buen modelo de protección. Sir William Snow publicó un documento en el cual ofrecía un método para la protección de embarcaciones marítimas. Dicho documento fue adoptado en 1847 por la Marina Real. El éxito del cono de protección quedó probado, ya que durante los siguientes 12 años se protegieron 30 buques de la Marina Real, los cuales estuvieron expuestos a severas tormentas eléctricas y ninguna de las embarcaciones fue dañada por el impacto de un rayo.

En 1880, Preece dirigió una serie de experimentos con el objetivo de medir el campo eléctrico real sobre una terminal aérea vertical. De dichos experimentos concibió las siguientes conclusiones [3] “una terminal aérea vertical ofrece una zona de protección por medio de un espacio cónico, cuya altura es la longitud de la terminal aérea y su base corresponde a un círculo con un radio igual a la altura de la terminal aérea, cuyos lados corresponden al cuadrante de un círculo con radio igual a la altura de la terminal aérea”.

Dicho en otras palabras; la relación de radio-altura 1:1 del volumen cónico es la zona de protección eficaz, equivalente a 45° de ángulo de protección. Este concepto prevaleció durante muchos años en las normas de protección.

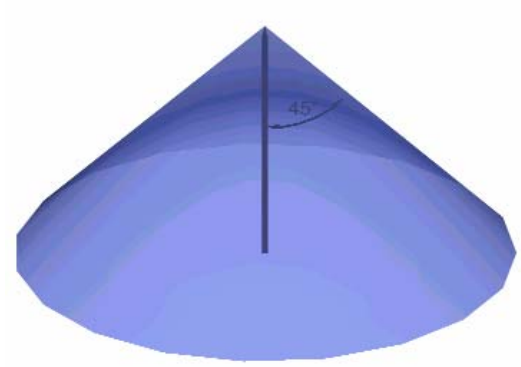


Figura 3.6. Zona de protección propuesta por Preece

Sir Oliver Lodge, en 1892 publicó una revisión de los conceptos de las zonas de protección existentes hasta la fecha. En dicha revisión Sir Oliver encontró que los ángulos de protección variaban desde 30° hasta 90°, esta variación es muy grande. Las observaciones de la época llevaron a modificar nuevamente el ángulo de protección de 45° hasta 64°.

Sir Oliver dibujó las grandes diferencias que existían entre los modelos de protección existentes en la época, como se indica en la figura 3.7.

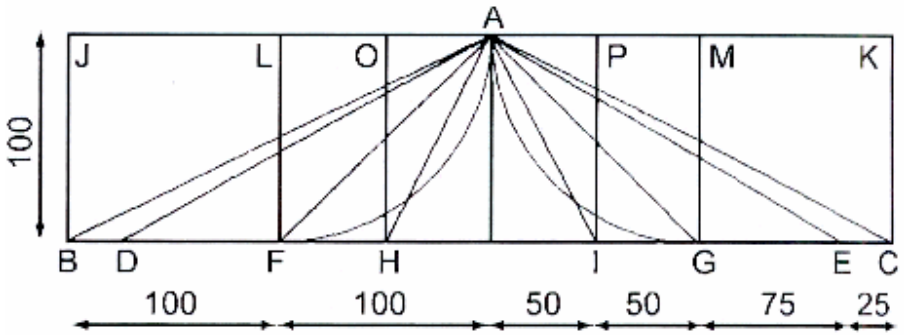


Figura 3.7. Zonas de protección de una terminal aérea vertical

En la figura 3.7 están representados los siguientes modelos de protección;

JBCK cilindro de Gay Lussac 1823.

BAC cono de DeFonville 1874

DAE cono de la comisión de Paris 1875.

LFGM cilindro de Chapman 1875.

FAG cono de Adams 1881.

OHIP cilindro hipotético.

FAG cono especial de Preece 1881.

HAI cono de Melsens

Fue en 1914 cuando la investigaciones de Larmor &Larmor, utilizando la teoría electromagnética de Maxwel, analizaron las líneas de campo eléctrico. Esta publicación relacionó la zona de protección con las líneas del campo eléctrico. Además tomó en cuenta la posibilidad de los rayos oblicuos o inclinados. Es importante señalar la trascendencia de este trabajo ya que fue el primero en utilizar la teoría electromagnética, lo que le permitió ilustrar las campos electromagnéticos en presencia de terminales aéreas, asimismo correlacionó el mecanismo de ionización de los gases y propagación del rayo.

3.5 Jaula de Faraday.

En 1876 James Clerk Maxwell, alumno de Michael Faraday, sugirió que los sistemas que utilizaban electrodos Franklin, atraían más rayos al golpear el área circundante al electrodo de Franklin. Maxwell propuso que se protegiera un polvorín encerrándolo completamente con un metal de espesor suficiente, para formar lo que hoy conocemos como una jaula de Faraday. De este modo si un rayo llegase a golpear un edificio encerrado en el metal, la corriente se reprimiría en el exterior de la jaula de metal, y ni siquiera sería necesario llevar a tierra esta jaula. En el caso de que la jaula de Faraday no estuviera conectada a tierra se produciría un arco eléctrico, en caso de ser alcanzada por un rayo, en el punto más próximo a la tierra.

El efecto de la jaula de Faraday esta presente en los automóviles de carrocería totalmente metálica y los aviones. Los edificios de marco de acero con refuerzo de barras de metal en la unión, y esta a su vez conectada al acero del edificio proporcionan una buena aproximación a la jaula de Faraday.

Actualmente en la práctica se utiliza una combinación del concepto del SPC y la jaula de Faraday, esto con el propósito de brindar una mayor protección a las

construcciones que contienen equipo electrónico sensible o cómputo. Una representación típica de jaula de Faraday se ilustra en la figura 3.8

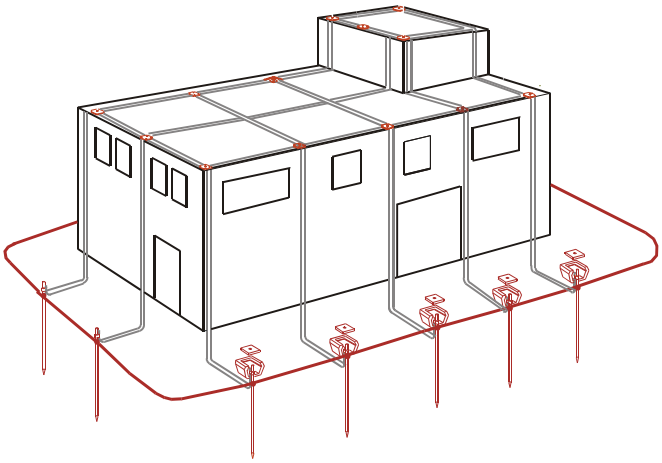


Figura 3.8. Edificio protegido utilizando el concepto de jaula Faraday y SPC.

El sistema consiste en un conjunto de puntas pararrayos — terminales áreas llamadas así en este trabajo — unidas entre sí por cables conductores, para formar una malla y derivar la corriente del rayo a tierra mediante una red de conductores de bajada. La malla formada por los cables conductores que unen las puntas pararrayo son los que forman la jaula de Faraday. Este método ofrece la ventaja que se tiene una muy buena protección contra impacto directo, pero también ofrece protección contra inducción electromagnética.

3.6 Modelo electrogeométrico.

En el periodo comprendido entre 1950 y 1970 se intensificó la investigación con el propósito de proteger las líneas de transmisión de los efectos directos del rayo, la mayor parte de la investigación se lleva cabo en Estados Unidos. La solución encontrada para proteger las líneas de transmisión y disminuir los índices de fallas por causa de las tormentas eléctricas, fue la utilización de un método con una base científica, así se llegó a la determinación de utilizar el modelo electrogeométrico. El éxito obtenido por el modelo electrogeométrico fue tal que rápidamente se popularizó su uso para la protección de líneas de transmisión y

para 1978 Lee [7] publicó un articulo en el que detalla las características de la protección de edificios contra tormentas eléctricas con base en el modelo electrogeométrico. Es importante hacer notar que el modelo electrogeométrico esta incorporado en la normas Húngaras desde 1962.

El modelo electrogeométrico se conceptualizó a partir de la observación de los líderes para:

- Intentar explicar por qué el rayo golpea el punto más alto.
- Evaluar el área alrededor del sitio donde no debe de golpear el rayo.

3.7 Método de la esfera rodante.

El método de la esfera rodante, es la aplicación práctica mas sencilla del modelo electrogeométrico, este método es utilizado principalmente en la protección de edificios contra tormentas eléctricas.

3.7.1 Historia de la esfera rodante.

Aproximadamente en 1935 Schwaiger, profesor universitario en Karlsruhe, en Munich, introdujo un espacio protegido orillado con el arco redondo en lugar de la línea recta. En la Universidad Técnica de Budapest el profesor Verebély realizó modelos experimentales y en 1948 los centros de los círculos bajaron. Estos métodos eran principalmente usados para la construcción de líneas de alto voltaje. Estos modelos no pueden tomarse como el método de la esfera rodante, porque el radio aplicado no era una constante como se muestra en la figura 3.9.

Los bordes redondos dieron la idea para aplicar una esfera para la construcción de protección contra rayos basado en terminales aéreas. Este método fue descrito primero por Horváth en 1962 e introducido en el código húngaro de protección contra el rayo en el mismo año. Este código hizo obligatoria la aplicación de la esfera, en el caso de estructuras que involucran peligro de fuego y explosión. Se establecieron dos niveles, con el radio de la esfera de 15 m y 50 m.

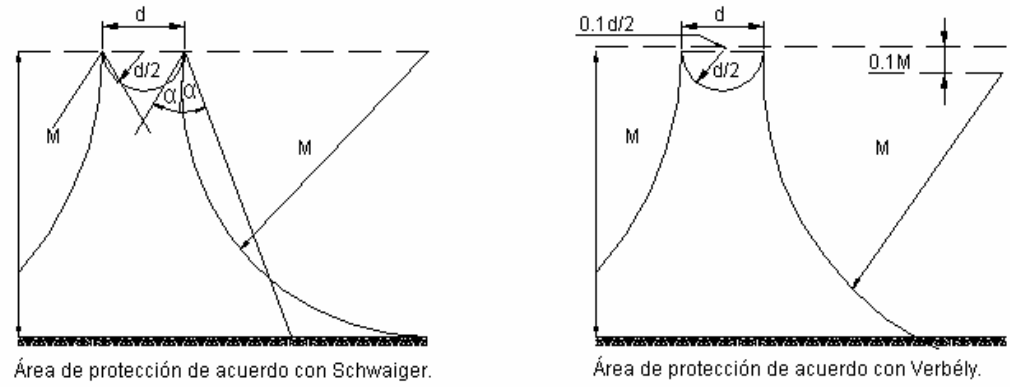


Figura 3.9. Espacios de protección que antecedieron el método de la esfera rodante.

El ICLP (conferencia internacional de protección contra rayo) repasó por primera vez el método de la esfera. Se presentó un estudio en la conferencia de protección contra rayo, (Munich, 1971) que dio un resumen de las normas nacionales en la protección contra el rayo. Este papel describe el método de la esfera rodante, también aplicado en Hungría. En Alemania Hasse y Wiesinger usaron una esfera para la construcción de terminales aéreas a finales de la década de 1970. Ellos llamaron el procedimiento como,"Blitzkugel", bola de rayo en Alemán, el método es conocido bajo este nombre en los países de habla Alemana. Al principio los precedentes húngaros escaparon a su atención, pero después ellos se refirieron correctamente a la primera aplicación en Hungría. En ese momento el método de la esfera rodante no era más que una idea, ya que ninguna información estaba disponible acerca del radio de protección.

En Estados Unidos y en Australia el método de la esfera rodante se estandarizó antes de 1980. El radio supuesto era aproximadamente entre 30 y 45m. Durante las discusiones de IEC TC 81 existió una fuerte aversión contra el método por parte de muchos países, pero al final el método de la esfera rodante se aceptó como el método equivalente al ángulo de protección. La propuesta húngara contaba con el apoyo de Australia, Alemania y Estados Unidos, pero los radios aplicables era determinados con gran precaución. A pesar de que el método de la esfera rodante es aceptado internacionalmente e incluido en las normas europeas, aun cuenta con detractores.

3.7.2 Aplicación del método de la esfera rodante.

La aplicación del método de la esfera rodante obedece los requisitos de una esfera imaginaria de radio dado, que no puede cortarse sobre el objeto a ser protegido sin tocar a los elementos de la termina aérea o la tierra como se muestra la figura 3.10.

La zona de protección que se obtiene utilizando el método de la esfera rodante se logra haciendo rodar una esfera imaginaria a lo largo de la tierra y por encima de los objetos que se desean proteger, cada punto tocado por la esfera es susceptible de ser golpeado por un rayo, pero el área debajo de la esfera, entre la esfera y la estructura o entre la esfera y tierra, se consideran como áreas protegidas.

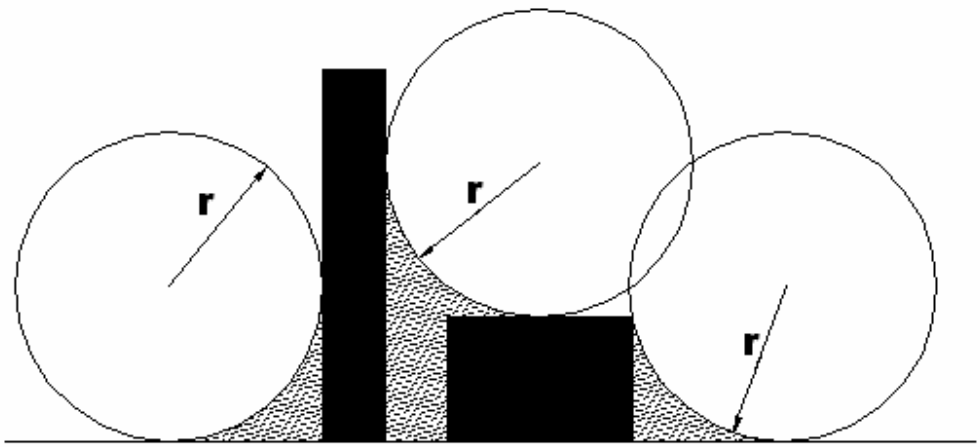


Figura 3.10. Ilustración del método de la esfera rodante

En la figura 3.10 se puede observar cómo se aplica el método de la esfera rodante, en donde la zonas sombreadas representan los lugares que están protegidos contra en impacto directo de un rayo.

El método de la esfera rodante esta basado en el proceso de descarga del rayo y por lo tanto en la competición de lideres ascendentes generados por todo cuerpo aterrizado, siendo o no parte del sistema de protección. El líder escalonado descendente realiza su viaje desde la nube hasta tierra en forma aleatoria sin considerar la tierra, ya que únicamente cuando el líder descendente esta cercano

al objeto a ser golpeado (la distancia pude variar de unos cuantas decenas de metros hasta 200 m) es cuando el líder ascendente se mueve hacia el objeto.

La principal hipótesis de este método de protección es que la cantidad de carga contenida en el líder escalonado descendente, la cual precede al rayo de retorno, está íntimamente relacionada con la amplitud de la corriente del rayo de retorno. En otras palabras, el último paso de la descarga está relacionado al potencial de la descarga del rayo, el cual a su vez, está directamente relacionado con la carga en la nube. Como el pico de la corriente del rayo de retorno está también relacionado con la carga en la nube, puede decirse que el último paso de la descarga depende del valor pico de la corriente del rayo de retorno. Utilizando este concepto, se ha encontrado una expresión analítica con la cual es posible evaluar la longitud del último paso de la descarga [6]:

$$r_s = k_s \cdot I^c \qquad 3.1$$

Donde:

r_s , es la distancia o longitud del último paso de la descarga, [m],

I, es el valor pico de la corriente del rayo de retorno, [kA]

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

Existen diferentes valores para las constantes k_s y c, pero el resultado es aproximadamente el mismo. Por lo tanto, usando una expresión como la indicada en la ecuación (3.2), es posible determinar la distancia del último paso de la descarga en función del valor pico de la corriente del rayo.

$$r_s = 9.4 \cdot I^{2/3} \text{ para } I < 30\text{kA} \qquad 3.2$$

La ecuación indica que la longitud del último paso de la descarga involucrado en el proceso de conexión entre el líder escalonado descendente y el líder ascendente será mayor a mayores valores pico de la corriente de rayo. Por lo

tanto, puede establecerse que la corriente de rayo representa el parámetro más importante en la definición de la protección contra tormentas eléctricas.

3.7.3 Zona de protección de la esfera rodante.

El método de la esfera rodante se puede aplicar sin restricciones sobre cualquier estructura o sobre terminales aéreas utilizadas en la protección contra tormentas eléctricas.

Como se muestra en la figura 3.11, la aplicación de la esfera rodante ofrece protección contra rayos que podrían golpear la estructura a proteger desde distintos ángulos como se explica a continuación [6].

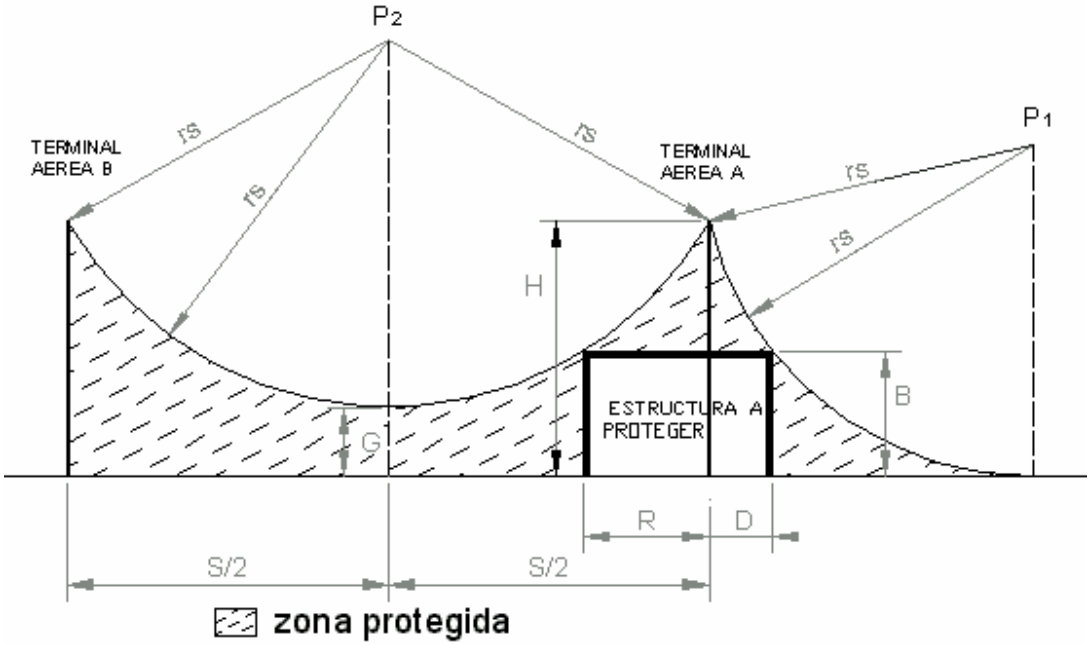


Figura 3.11. Concepto del método de protección basado en la esfera rodante.

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

el segmento de arco proyectado por el radio r_s a partir del punto P1 será golpeado por el rayo.

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

El espacio entre las terminales aéreas estará protegido únicamente si dichas terminales están lo suficientemente cerca para que la altura G sea mayor o igual que cero. Si los arcos generados por las terminales aéreas A y B se unen al nivel cero (G=0 a ese punto), la superficie correspondiente al nivel cero (tierra o cualquier otra superficie sobre el nivel de tierra) estará completamente protegida.

Ahora bien, si una estructura está localizada entre las dos terminales aéreas, la altura G debe ser mayor que la altura de la estructura para ofrecer una adecuada protección. Un valor negativo de la altura G indicaría una zona no protegida entre las dos terminales aéreas. Las ecuaciones con las cuales puede realizarse la evaluación de la protección son las siguientes:

Cuando H< r_s

$$D = H\sqrt{\frac{2r_s}{H} - 1} - B\sqrt{\frac{2r_s}{B} - 1} \qquad 3.3$$

$$R = (H - G)\sqrt{\frac{2r_s}{(H - G)} - 1} - (B - G)\sqrt{\frac{2r_s}{(B - G)} - 1} \qquad 3.4$$

Cuando S<2 r_s

$$G = H - r_s + \sqrt{r_s^{\,2} - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \qquad 3.5$$

Cuando H> r_s

$$D = r_s - B\sqrt{\frac{2r_s}{B} - 1} \qquad 3.6$$

Los puntos P_1 y P_2 son los últimos puntos en los cuales el líder escalonado descendente viaja hacia la tierra o hacia la estructura y se produce el punto de conexión o contacto entre el líder descendente y el líder ascendente. El último paso de la descarga está definido por r_s, las distancias horizontales de protección están definidas por R y D, y G es la mínima elevación totalmente protegida.

3.8 Nuevos productos.

La investigación en cuanto a la formación de las tormentas eléctricas y la forma en la cual descargan las nubes ha ofrecido un mayor entendimiento de fenómeno de las descargas atmosféricas, esto nuevos conocimientos han servido para la aparición de nuevos productos y modelos de protección contra descargas tormentas eléctricas.

Son varios los productos propuestos para la protección contra tormentas eléctricas, pero todas tienen en común el propósito de reducir el número de terminales áreas en un sistema de protección. Para lograr este propósito los fabricantes de dispositivos no convencionales se han empeñado en obtener un supuesto aumento en la eficiencia de las terminales aéreas, es decir, la capacidad que tiene la terminal aérea de interponerse en la trayectoria del rayo bajo una situación definida.

Cabe señalar que también han surgido ideas poco realistas para la protección del impacto directo de un rayo como lo pueden ser:

- Desviar las nubes de tormenta.
- Crear un punto de golpeo favorable para el rayo, y encauzar la corriente eléctrica fuera del área que necesita protección.

En la búsqueda de incrementar la eficiencia de las terminales aéreas han surgido productos con las siguientes características.

I. Reducir la resistencia a la circulación de corriente en la terminal aérea proporcionándole un baño de oro.

II. Incrementar la distancia da protección del electrodo, modificando la punta del pararrayos utilizando formas diversas con puntas, como erizos.
III. Utilización de electrodos radioactivos.
IV. Eliminar la posibilidad de recibir un golpe directo de un rayo descargado los nubarrones
V. Eliminar la formación de un líder descendente.

Como consecuencia de que los electrodos radiactivos se han prohibido, por ser considerados un peligro potencial para las personas, se han desarrollado otros productos como son las terminares aéreas de Emisión Temprana, ESE por sus siglas en ingles (Early Streamer Emisión). Los ESE basan su funcionamiento en la creación de un líder ascendente que intercepte al líder descendente, en un tiempo inferior comparado con un electrodo Franklin.

Otro de los nuevos productos que se han desarrollado son los llamados CTS, por sus siglas en Ingles (Charge Transfer System) o Sistema de Transferencia de Carga. Las terminales aéreas CTS trabajan bajo el principio de neutralizar la acumulación de carga en las celdas correspondientes de la nube, a través de corrientes iónicas que se propagan de terminal aérea hacia la nube.

El primer antecedente que se tiene de los CTS data de 1754 cuando el científico Checo Prokov Divish, sugirió que la carga de la nube podía ser neutralizada utilizando puntos de descarga, pero no fue hasta 1971 cuando inicio su comercialización. La aplicación principal de los CTS era la protección de torres de telecomunicaciones, pero al pasar de los años, el uso de estos dispositivos se ha ampliado y ahora se aplican para proteger instalaciones de almacenamiento y distribución de hidrocarburos, también los fabricantes de CTS han promovido su uso en subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica.

También se están desarrollando nuevos métodos de protección como lo es Volumen de Colección, este método tiene como sus orígenes los trabajos de Ericksson de 1979, 1980 y 1987, el método de Volumen de Colección considera que todos los puntos en una estructura puede lanzar a un líder ascendente, pero para diferenciar los puntos que pueden iniciar un líder ascendente que llegue a

interceptar el líder descendente se utiliza el factor de intensificación de campo local. El factor de intensificación de campo usa técnicas numéricas como el método del elemento finito. Como resultado de aplicar este método se obtiene un cono parabólico que representa el área de captura, donde se espera que el rayo llegue para poder ser capturado por la terminal aérea y ser llevado a tierra.

Capitulo 4
Fundamentación técnica y dispositivos no convencionales de los sistemas de protección

A pesar de tener conocimientos fundamentales de la fenomenología del rayo, el lugar en donde puede golpear durante una tormenta eléctrica no se puede predecir, ya que el rayo es de naturaleza estocástica. Este hecho es aprovechado por diversos fabricantes en el mercado que ofrecen protección contra los efectos del rayo, basado en conceptos erróneos de la física del rayo. Pero antes de revisar los sistemas de protección, se deben tener claros los siguientes conceptos de protección.

4.1 Principios de protección contra tormentas eléctricas.

4.1.1 El proceso de conexión.

El proceso de conexión es la serie de etapas que hacen posible que un rayo golpee una estructura o cualquier otro objeto que se encuentre aterrizado o en contacto con la tierra. Para entender el proceso de conexión es necesario primero comprender cómo se forman las condiciones que originan dicho proceso.

4.1.2 Descargas corona.

En un clima tranquilo la tierra es considerada un conductor eléctrico que lleva carga negativa. La correspondiente carga positiva reside en la atmósfera, ésta carga y la tierra representa un conductor esférico muy largo, la atmósfera intermedia esta sujeta a un campo eléctrico que es perpendicular a la superficie de la tierra. De acuerdo a las condiciones del clima, éste campo eléctrico tiene polaridad positiva y su magnitud es de 100V/m.

Como ya se ha mencionado, un nubarrón lleva carga negativa en su parte baja. Cuando el nubarrón se aproxima a un punto de la superficie de la tierra la polaridad del campo eléctrico es revertida y sus rasgos característicos indican la proximidad del nubarrón. Bajo el centro de carga de este nubarrón el campo eléctrico es grande, alcanzando valores de 20,000 V/m, este campo eléctrico decrece rápidamente conforme se incrementa la distancia en forma vertical, pero a distancias de hasta 5 km desde el centro de carga de la nube el campo eléctrico todavía puede alcanzar 5000V/m.

Un conductor vertical como una vara o un pararrayos crean cortos circuitos en este campo eléctrico, esto produce una intensa concentración de campo en la punta del conductor, como se nuestra en la figura 4.1. Si el campo es lo suficientemente intenso, ocurre la ionizacion del aire por colisión, ocasionando con esto, que los iones positivos sean trasportados de la tierra a la atmósfera a través del conductor. La corriente resultante es llamada corrientes de punto de descarga o descarga corona, así llamadas en este trabajo.

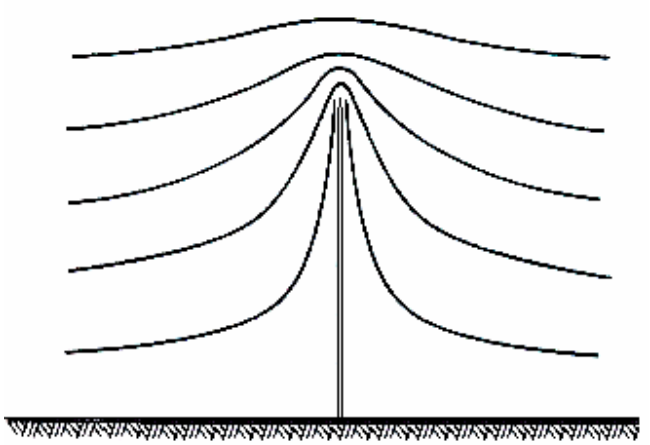


Figura 4.1. Campo eléctrico distribuido sobre un pararrayos vertical

Los iones producidos en las cercanías de la punta del conductor aterrizado se mueven hacia arriba en el prevaleciente campo eléctrico. Sin embargo, a poca distancia sobre el la punta del pararrayos, sus velocidades se vuelven pequeñas comparadas con la alta velocidad del viento bajo el nubarrón. Así pues el movimiento del ión es gobernado por la dirección del viento, para formar bolsas de

carga espacial positiva en la atmósfera. Las descargas corona y la resultante carga espacial juegan un papel importante en el desarrollo de la descarga del rayo y la acción del pararrayos. Las descargas corona también son producidas por árboles, hojas de césped, incluso rocas afiladas y piedras.

La amplitud de la corriente de punto de descarga es función del campo eléctrico, la altura del conductor sobre el nivel de tierra a la que es producida la corriente y la velocidad del viento. Para un conductor estático de algunas decenas de metros de altura, en una región abierta la corriente es la suma de unos cuantos microamperes.

La descarga corona generará microdescargas que se convertirán en lideres ascendentes; en la ausencia de objetos puntiagudos, algunos lideres ascendentes pueden ser creados desde la tierra llana. El líder ascendente continúa su propagación sobre la condición de un valor mínimo de un campo eléctrico mantenido.

4.1.3 Ultimo paso de la descarga.

El líder negativo normalmente se mueve de los centros de la nube hacia la tierra en pasos discretos, inclinado hacia los espacios de carga positiva flotando en la atmósfera. Este proceso sigue hasta que se inicia una microdescarga generando corriente corona en el objeto aterrizado. Por consiguiente, la posición particular del punto de impacto es determinado por la distancia entre el objeto a ser golpeado y la punta del líder ascendente en el instante cuando el punto de impacto es determinado, y el líder ascendente es iniciado desde el objeto; a esta distancia se le llama último paso de la descarga, y se nuestra en la figura 6.2.

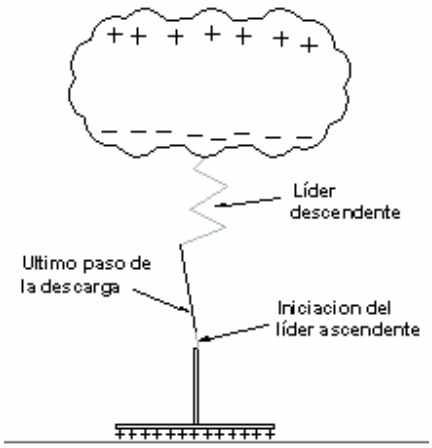


Figura 4. 2. Distancia de golpeo.

En aproximación de cálculo simple, el canal del líder puede ser representado por un conductor vertical que se estira desde el centro de la nube a una altura h_2 a un punto h_1 sobre la tierra, como se muestra en la figura 4.3.

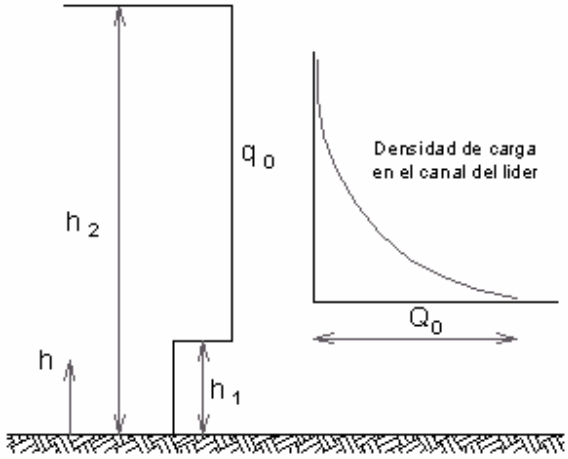


Figura 4.3

La carga q_0 es depositada a lo largo del conductor, y de consideración electrostática, la densidad de carga Q es la carga por unidad de distancia que puede decrecer exponencialmente a lo largo del conductor de acuerdo a la relación 6.1.

$$Q = Q_0 \int_{h_1}^{h_2} \varepsilon^{-\beta h} dh \,. \qquad 6.1$$

Donde Q_0 es la densidad de carga en la punta del líder y β es la constante de valor aproximado a 10^{-5}. La carga total sobre el conductor es así:

$$q_0 = Q_0 \int_{h_1}^{h_2} \varepsilon^{-\beta h} dh = \frac{Q_0}{\beta} (\varepsilon^{-\beta h_1} - \varepsilon^{-\beta h_2}) \qquad 6.2$$

Se puede ver que h_1 es mucho más pequeño comparado con h_2, así tenemos aproximadamente:

$$q_0 \approx \frac{Q_0}{\beta}. \qquad 6.3$$

De acuerdo con las leyes de la electrostática, la intensidad del campo eléctrico, debido al punto de carga q a una altura h sobre la tierra plana es:

$$e = \frac{2q}{h^2}. \qquad 6.4$$

La intensidad del campo eléctrico arriba del nivel de tierra debido a una carga distribuida a lo largo del canal del líder así se vuelve:

$$e = 1 \cdot 8 \times 10^{12} Q_0 \int_{h_1}^{h_2} \frac{\varepsilon^{-\beta h}}{h^2} dh \text{ en V/cm} \qquad 6.5$$

y con (6.2)

$$e = 1 \cdot 8 \times 10^{-7} q_0 \int_{h_1}^{h_2} \frac{\varepsilon^{-\beta h}}{h^2} dh \text{ en V/cm.} \qquad 6.6$$

La evaluación numérica de la expresión 6.6 produce la gráfica de la figura 6.4, de intensidad de campo eléctrico sobre la superficie de la tierra que es trazada en función de la altura de la punta del canal del líder que lleva una carga de 0.3 a 8 Coulomb. Esta carga se neutraliza durante el proceso de rayo de

retorno y por consiguiente también la amplitud de la corriente del rayo. De la integración del oscilograma de la corriente representativa se concluye que el promedio de las corrientes del rayo de 25 kA corresponde a descargas de 1 Coulomb, así de la información graficada en la figura 4.4 puede también ser expresado en términos de la corriente del rayo o de la severidad de la descarga del rayo.

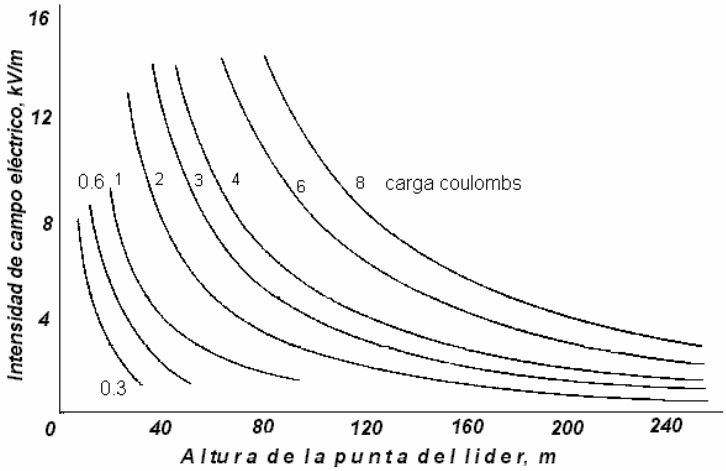


Figura 4.4.

Una intensidad de campo crítico ha sido adoptada por pasos anteriores al golpe del líder del rayo, la figura 4.4 habilita la altura sobre la tierra de la punta del canal del líder en donde puede ser esperado un líder ascendente para ser iniciado y esta por definición refiere al último paso de la descarga.

Hasta ahora la protección contra rayo es de interés práctico y se limita a las estructuras de hasta 60 m de altura, estructuras de mayor altura requieren, en su caso, una consideración especial. El promedio de longitud de un paso del líder descendente escalonado se ha visto que es de 20 m, el gradiente de rompimiento critico arriba del espacio entre la punta del canal del líder y la tierra es del orden de 5 kV/cm para el caso normal de un rayo negativo y de 3 kV/cm para un rayo positivo. De la figura 6.4 podemos tomar datos del gradiente de rompimiento crítico para 5 kV/cm y 3 kV/cm donde cruzan la curva de la carga, indica la altura crítica de la punta del líder cuando se acerca al punto donde golpeara. El resultado

mostrado en la figura 6.5 muestra las distancias del último paso de la descarga, para descargas positivas y negativas según la corriente del rayo esperada.

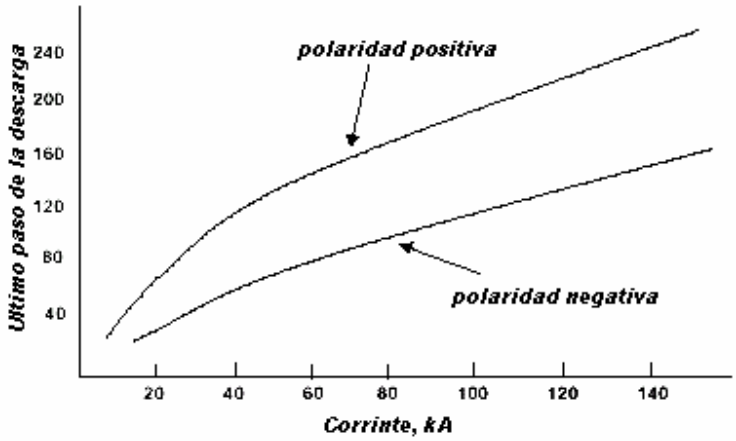


Figura 4.5

Una vez dada la información concerniente a los principios básicos de la protección contra descargas atmosféricas, la parte complementaria de este capitulo analizará la justificación técnica de los diferentes métodos de protección como lo es el cono de protección, el método de la esfera rodante y los dispositivos no convencionales que se utilizan actualmente en la protección contra descargas atmosféricas.

4.2 Cono de protección.

El cono de protección también es conocido como zona de inmunidad a la incidencia del rayo. El concepto de cono de protección se ha manejado y ha evolucionado desde los inicios de los sistemas de protección. El cono de protección se define de la siguiente manera: la región protegida es formada por un cono imaginario que se genera al hacer girar, sobre el eje de la punta una recta que intersecta al pararrayo en su parte más alta formando un ángulo Φ como se muestra en la figura 4.6

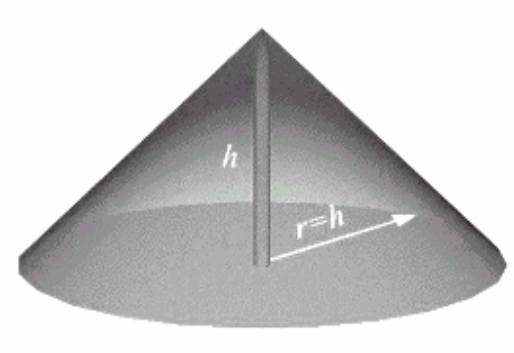


Figura 4.6 Cono de protección.

Este modelo fue propuesto por Franklin y fue modificado sucesivamente, primero por Gay Lussac, quien proporciona la conocida relación de 2:1 que brinda un ángulo de protección Φ=63°.

Hasta entonces el cono de protección era estudiado mediante un enfoque geométrico basado en la suposición de que un rayo incidirá en una terminal aérea convencional o electrodo Franklin con preferencia sobre la tierra, si este representa la trayectoria más corta. No fue hasta que Preece en 1880 examinó la distribución de campo eléctrico alrededor de una punta vertical. Preece concluyó que "Una punta vertical ofrece una zona de protección delimitada por un cono, cuya altura es la longitud de la terminal aérea y la base corresponde a un círculo con un radio igual a la altura de la punta; los lados corresponden al cuadrante de un círculo cuyo radio también es igual a la altura de la punta". Con este modelo se adopta la relación 1:1 que permanecería por muchos años. En 1914, se publicaron los resultados de las investigaciones realizadas por Larmor & Larmor. Estos resultados relacionaban la zona de protección con las líneas de campo eléctrico.

Aunque los estudios realizados en torno al cono de protección han sido cada vez con un mayor ingrediente científico, este método tiene varias limitaciones, como son:

- El ángulo del cono de protección se ha tenido que modificar cuando se aplica a líneas de transmisión, ya que la altura de esta ha ido en aumento.
- No puede ser aplicado en todas las estructuras del mismo modo.
- El método del ángulo de protección involucra problemas en la aplicación de azoteas planas.

- Cuando se aplica a estructuras altas, el cono de protección presenta problemas en su aplicación.

El cono de protección esta presente en normas como lo son la NFPA 780 y la IEC 61024, y dichas normas dan recomendaciones especificas acerca de la aplicación de dicho método.

4.3 Método de la esfera rodante.

El método de la esfera rodante cuenta con la mayor aceptación a nivel internacional, y éste se presenta en la mayoría de las normas de protección contra rayos. Además de ser parte importante en el diseño del SPC, este método es el más utilizado y del que se tienen más datos estadísticos a lo largo de la historia de la proyección contra tormentas atmosféricas. La justificación del método se presenta a continuación.

4.3.1 Las bases físicas de la protección contra rayo directo.

Tomado como punto de partida el trabajo de T. Horváth [8] sobre la teoría y aplicación del método de la esfera rodante se presentan las bases físicas de la protección contra rayo directo utilizadas para justificar el método de la esfera rodante.

El punto en el camino del rayo donde el líder se vuelve hacia el punto donde golpeara se llama punto de orientación. Normalmente este punto no se encuentra lejos de la tierra y por lo tanto la distancia del punto de orientación al objeto a ser golpeado no es grande, esta distancia también es definida como ultimo paso de la descarga. La distancia del último paso de la descarga es influenciada por el valor máximo de corriente del rayo y la altura del objeto aterrizado. Para relacionar estos dos elementos se acepta comúnmente una fórmula — aunque matemáticamente la formula es incorrecta — como sigue:

$$\frac{r}{r_m} = \left(\frac{I}{I_m}\right)^{\frac{I}{p}} \qquad 6.7$$

Donde *r* es el tamaño del último paso de la descarga relacionada a la corriente del rayo I, I_m es el valor medio de la distribución de corriente del rayo que ocurre con una frecuencia del 50%, y r_m es el ultimo paso de la descarga relacionado a esta corriente, el exponente *p* es asumido diferentemente — entre 1-2…20 — en la literatura o en bases teóricas o por la extrapolación de datos del laboratorio. El valor usado recientemente es de *p*=5.

La altura h del objeto de tierra también influye en tamaño del ultimo paso de la descarga que puede tomarse en cuenta por la función r_m=f(I_m,h). Esta función no puede expresarse con una fórmula simple. Hay datos suficientes disponibles sobre la distribución del valor máximo de corriente del rayo que puede representarse con la distribución logarítmico natural. La probabilidad que la corriente i de rayo no sea más alta que I puede expresarse por la fórmula siguiente:

$$P(i \le I) = \Phi\left(\frac{1}{s}\ln\frac{I}{I_m}\right) \qquad 6.8$$

Donde Φ representa la función Gaussiana de error, *s* relaciona la desviación de la distribución, pero no es idéntico con la desviación normal matemáticamente definida por la distribución logaritmo natural.

Con la substitución de la relación (6.8) la función de la distribución de ocurrencia del último paso de la descarga puede producirse. El resultado expresa la probabilidad que el valor real x no exceda un radio r dado como sigue:

$$P(x \le r) = \Phi\left(\frac{p}{s}\ln\frac{r}{r_m}\right) \qquad 6.9$$

La función de densidad de dP/dr de la distribución puede producirse derivando 6.9 y esto da la probabilidad que la dimensión del ultimo paso de la descarga está cerca de un valor dado.

Independientemente de las relaciones anteriores, la función de protección de un sistema de terminales aéreas depende del espacio atractivo del objeto a ser protegido. Este es el conjunto de puntos que están más cercanos que cualquier otro al objeto a ser protegido objeto, ya sea de la tierra o del sistema de la protección contra el rayo. Esto es conocido como el principio de las distancias mínimas, pero es sólo la primera aproximación, porque la polaridad del rayo causa alguna modificación, pero este cálculo no es usado con frecuencia.

Teniendo en cuenta el espacio atractivo del objeto a ser protegido y dentro de la distribución estadística del último paso de la descarga, la frecuencia esperada de impacto sobre un objeto puede ser calculada por la relación siguiente:

$$N_F = N_G \oint_{V_a} \frac{dp}{dr} dv \qquad 6.10$$

Donde N_G es la densidad de rayos a tierra anual por kilómetro cuadrado; la región del volumen integral Va es idéntico con el espacio atractivo del objeto a ser protegido.

Según esta fórmula, la función de protección de un sistema de terminales aéreas es expresada por la frecuencia esperada del rayo que puede golpear el objeto a ser protegido.

4.3.2 Teoría de la esfera rodante.

La teoría de la esfera rodante principalmente esta basada en dos conceptos: el último paso de la descarga y el punto de orientación. De este modo, si r se toma como el ultimo paso de la descarga, entonces los objetos sólo pueden ser golpeados desde el punto de orientación que está dentro de una esfera de radio *R=r* o contacta su superficie. Cuando la esfera toca la terminal aérea o la tierra,

pero no toca el objeto a proteger, entonces el rayo teóricamente no puede golpear este objeto desde el punto de orientación en el centro de la esfera. Por lo tanto, un sistema de terminales aéreas es adecuado si rodando una esfera de radio imaginario R no corta en ninguna parte el objeto a ser protegido a menos que toque los elementos de las terminales aéreas o la tierra. Esto significa que el objeto es protegido contra golpes de rayo cuyo último paso de la descarga es más grande que el radio de la esfera. Consecuentemente el objeto o estructura es protegido contra rayos cuya corriente es más alta que I determinada por el radio R como el último paso de la descarga según la relación 6.7.

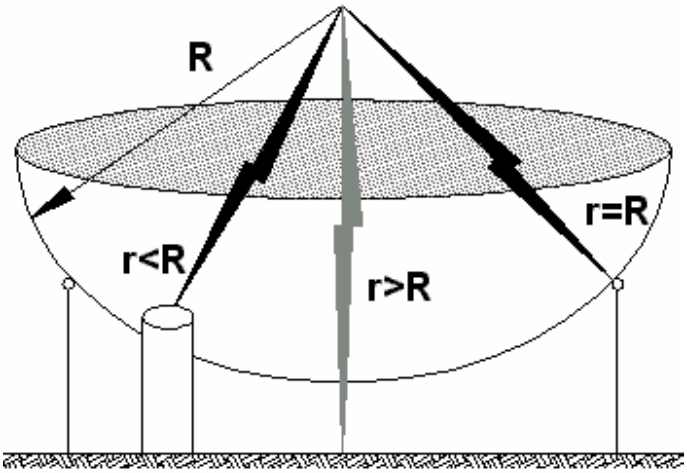


Figura 4.7 Ilustración de la teoría de la esfera rodante.

Al comparar la protección brindada por el sistema de terminales aéreas contra rayo directo construidas con el método de la esfera rodante podemos obtener las siguientes conclusiones:

- La eficiencia de un sistema está determinado por el valor límite de la corriente de rayo que pueda generar falla de blindaje. Sin embargo, la protección contra la probabilidad de ocurrencia de la corriente de rayo determina prácticamente la eficiencia del sistema de terminales aéreas, mediante el radio de la esfera rodante.
- En el caso del mismo arreglo de terminales aérea, un radio grande para la esfera rodante se traduce en un nivel de protección más bajo. Para aumentar el nivel de protección los radios de la esfera tienen que ser disminuidos.

4.4 Sistemas de transferencia de carga.

Durante los últimos treinta años han aparecido sistemas que ofrecen producir las condiciones bajo la cuales el rayo no ocurre o no puede golpear la estructura protegida, a diferencia del sistema convencional de protección que procura ofrecer puntos preferentes para el impacto directo del rayo. Entre esos sistemas de protección encontramos el Sistema de Serie de Dispersión (DAS), el Spline Ball Ionizer (Ionizador de Bola Ranurada) y Spline Ball (Bola Ranurada), el Generador de Plasma de Ion (IPG), entre otros, todos estos sistemas pueden llamarse en común Sistemas de Traslado de Carga, CTS llamados así en este trabajo .

4.4.1 Principio de funcionamiento de los CTS.

Según los fabricantes de los CTS el principio de funcionamiento es el siguiente; liberar carga vía descarga corona mediante múltiples puntos afilados llamados series de dispersión, con el propósito de lograr descargar el nubarrón y elimina cualquier posibilidad de relámpago inhibiendo al líder descendente, también ofrecen reducir el campo eléctrico en el objeto a proteger intentando con esto evitar la creación de un líder ascendente y así impedir el proceso de contacto para evitar que el rayo golpee la estructura protegida o cualquier otro punto.

Los sistemas de eliminación de relámpago están formados por un elevado número de puntos afilados (serie de dispersión), a menudo similar a un alambre de púas, que se instala cerca de la estructura a proteger. Estas series se conectan a electrodos conectados a tierra a través conductores de bajada como en el caso de los sistemas de protección convencionales. La mayor parte de los CTS están compuestos de los mismos elementos básicos;

- Un ionizador con centenares de puntos afilados (serie de dispersión).
- Un sistema de conexión a tierra.
- Conductores de bajada conectados al ionizador.

Como rasgo peculiar y distintivo de los CTS los fabricantes afirman que el colector de carga (sistema de tierra) tiene la función de neutralizar la carga

positiva en la tierra; de este modo se tiene una nube de carga positiva en la parte superior del ionizador y una zona de carga neutral encerrada por el sistema de tierras, además de la sombra del nubarrón en la tierra que es cargada positivamente.

Los fabricantes de CTS aseguran que pueden eliminar el rayo creando una nube de carga positiva que actuará como escudo protector y así impedir un impacto directo del rayo, además aseguran que la nube de iones cargados positivamente, reduce el potencial entre el área protegida y el nubarrón, de esta manera prevenir el impacto directo de un rayo en una área determinada. Basados en dichas afirmaciones los CTS ofrecen una protección basada en el dispositivo llamado ionizador y todo el sistema funciona de la siguiente manera:

1. En primer lugar el colector de carga (sistema de tierra) neutraliza la carga a nivel de tierra contenida en el área a proteger.
2. El ionizador o serie de dispersión emite millones de moléculas aéreas ionizadas a su alrededor.
3. Las moléculas aéreas ionizadas formadas por la descarga corona son arrastradas sobre el ionizador dónde éstas reducen la velocidad
4. A una determinada altura las moléculas áreas ionizadas tienden a concentrarse y formar nubes de moléculas aéreas ionizadas que impedirá que el rayo golpee en el área protegida.

La presencia de carga espacial desarrollada entre el sitio protegido y la célula de tormenta es considerada como un escudo de Faraday que impedirá el impacto directo del rayo en la zona protegida. El funcionamiento antes mencionado se ilustra en la figura 4.8.

El principio de funcionamiento de los CTS ha sido analizado a nivel internacional por muchos investigadores, encontrado incongruencias en sus bases físicas que ponen en entredicho la veracidad de su principio de funcionamiento. Por ejemplo, los fabricantes afirman que las descargas corona son creadas por cualquier objeto aterrizado o en contacto con la tierra como lo son las rocas y los árboles (hasta aquí la afirmación es verdad), pero también aseveran que en los bosques se da de forma natural un efecto como el que ofrecen los CTS y que el

ionizador solo simula este efecto de una forma artificial y más eficaz [4]. Si la tesis anterior fuera cierta, la probabilidad de que un árbol dentro de un bosque fuera impactado directamente por un rayo seria muy baja, casi nula, pero las estadísticas de árboles alcanzados por un rayo indican lo contrario.

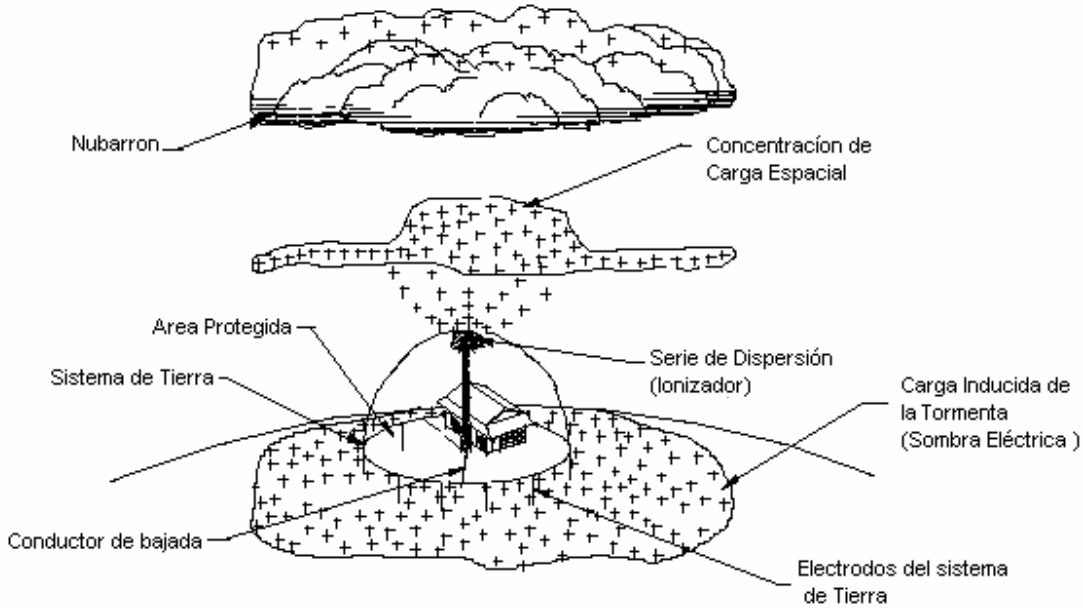


Figura 4.8 Esquematización del principio de funcionamiento del CTS.

Otro punto incongruente de los CTS es el referente a la cantidad de carga espacial que se requeriría para lograr el escudo Faraday que ofrecen estos sistemas. Los fabricantes de los CTS afirman que el disipador inyectará varios Coulombs de carga positiva en el aire sobre la estructura protegida, y que esta carga neutralizará a un líder del rayo próximo, para calcular dicha carga utilizan la siguiente formula:

$$N = \frac{Q}{(I_p)(t)} = \frac{2.5}{(10)17 \times 10^{-5}} = 1.5kpt \qquad 6.11$$

Donde Q es que la cantidad de carga necesaria para neutralizar al líder, I_p es la cantidad de corriente para generar las descargas corona emitidas por un solo punto bajo una tormenta, y t es la cantidad de tiempo necesaria para aumentar la carga Q. Los números en la fórmula implica que para proporcionar 2.5 Coulombs

suficientes para neutralizar a un líder, el sistema necesita 1,500 puntos que emite cada uno 170 μA de corriente durante 10 segundos. Esto es imposible, como se explica a continuación.

La ecuación 6.11 indica que un solo punto emitirá 170uA de corriente bajo una tormenta. Muchas medidas han sido hechas en las descargas corona bajo las tormentas, y éstas muestran que las corrientes típicas alcanzan a lo mucho valores de 10uA, cambiando 10uA en lugar de 170uA en la ecuación 6.11 el numero de puntos cambiaria de 1,500 a 25,000 puntos, esto significa que el disipador debería tener cuando menos 25,000 puntos en su serie de dispersión [9].

En el supuesto caso que se pudiera construir una serie de dispersión con 25,000 puntos esto no garantiza tener la cantidad de corriente requerida para generar la descarga corona, dado que la corriente de una serie de puntos no equivale a la corriente de un solo punto aislado multiplicado por el número de puntos en la serie. Esto quiere decir que la carga inducida por los 1,500 o 25,000 puntos del disipador no sería mayor que el de un solo punto que es capaz de inhibir un líder descendente. Por la tanto no es posible formar una capa estacionaria de carga espacial directamente sobre el disipador [10].

Cuando los CTS aparecieron en el marcado, ofrecían eliminar toda posibilidad de que la zona protegida recibiera un impacto de rayo, pero ante la oposición de varios investigadores y por otra parte los casos que se registraron en los cuales los CTS no tuvieron el funcionamiento ofrecido, los fabricantes cambiaron sus argumentos acerca del funcionamiento de sus dispositivos y ahora afirman que existe la posibilidad de que un rayo pueda formarse, pero en este caso los fabricantes de CTS afirma que crean puntos preferenciales para que el rayo golpee [10].

Podemos notar una incongruencia más en la teoría acerca del funcionamiento y diseño de los CTS. Cuando se calcula la zona de protección de un CTS los diseñadores efectúan el siguiente análisis [11]: calculan primero la zona de protección de un SPC, para este propósito recomiendan utilizar el método de la esfera rodante. Ya calculada la zona de protección para un SPC, calculan la carga espacial producida por el CTS mediante la siguiente formula:

$$q_{CTS} = q_r Nk \qquad 6.12$$

Donde

q_r , es la carga espacial producida por el SPC, [C]

q_{CTS} , es la carga espacial producida por el CTS, [C]

N es el número de puntos del disipador.

k es un valor variable entre 1/N y 1 dependiendo de la configuración geométrica del CTS.

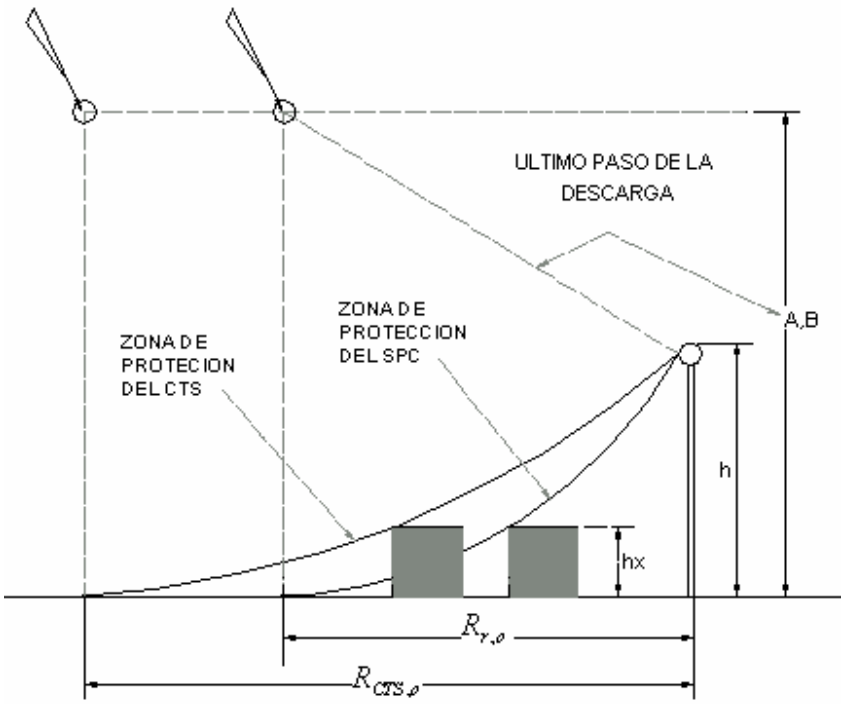


Figura 4.9. Calculo de la zona de protección del CTS

Después de igualar los campos eléctricos del SPC y del CTS en el mismo punto y altura despejan la variable correspondiente al radio de la zona de la protección del CTS de la siguiente manera:

$$E_A = E_B \frac{2q_r h}{4\pi\varepsilon_0 (h^2 + R_{r,o}^2)^{3/2}} = \frac{2q_r Nkh}{4\pi\varepsilon_0 (h^2 + R_{r,o}^2)^{3/2}} \qquad 6.13$$

Donde.

E_A es el campo eléctrico en el punto A

E_B es el campo eléctrico en el punto B

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\times10^9 [V/m]$$

h, es la altura del CTS o SPC, [m]

$R_{r,o}$, es el radio de la zona de la protección del SPC, [m]

$R_{CTS,o}$, es el radio de la zona de la protección del CTS, [m]

Despejando $R_{CTS,o}$, radio de la zona de la protección del CTS

$$R_{CTS.0} = \sqrt{((Nk)^{2/3}(h^2 + R_{r.0}^2) - h^2)}, [m] \qquad 6.14$$

El radio $R_{r,o}$ lo calculan de la siguiente manera:

$$R_{r.0} = \sqrt{(h(2r_s - h))}, [m] \qquad 6.15$$

Donde

r_s es la longitud del último paso de la descarga determinada por la magnitud crítica del rayo.

Una observación mas detallada en el análisis seguido para obtener la zona de protección de un CTS nos lleva a las siguientes observaciones.

Si la característica principal de un CTS es la eliminación del rayo mediante la formación de una nube de carga que tendrá la función de inhibir la formación de un líder ascendente y así evitar el proceso de contacto, no es lógico utilizar un método como lo es la esfera rodante (ya que este tiene sus bases físicas en el ultimo paso de la descarga y el punto de orientación) para diseñar un sistema de protección que ofrece puntos preferentes para un impacto directo de un rayo.

En al análisis hecho para calcular la zona de protección de un CTS, en las fórmulas para el cálculo de campo eléctrico, se analiza la terminal aérea de un SPC como si fuera un disipador (CTS) de un solo punto, esta comparación no es

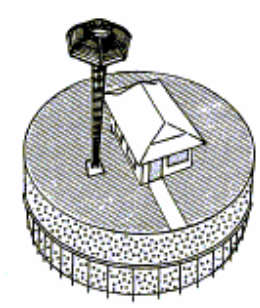
valida ya que la teoría de protección en que está basado el método de la esfera rodante, las descargas corona son parte del proceso de formación de uno o más líderes ascendentes cuando un rayo está cercano y no la formación de carga espacial para formar una nube de carga.

Por otro lado y como corolario, es técnicamente inválido aumentar el radio de protección de los dispositivos CTS tomando como base el método de la esfera rodante, ya que eso implica “amplificar” las posibles limitaciones que ofrece el método de la esfera rodante, método que ha sido duramente cuestionado por los fabricantes de los CTS.

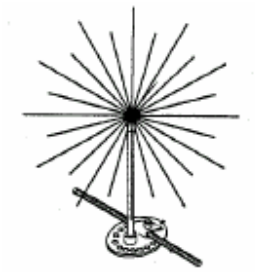
4.4.2 Tipos existentes de CTS.

Cada fabricante tiene sus propio diseño de CTS, estos diferentes diseños cambian entre si específicamente en la forma de sus disipador, como se muestra a continuación;

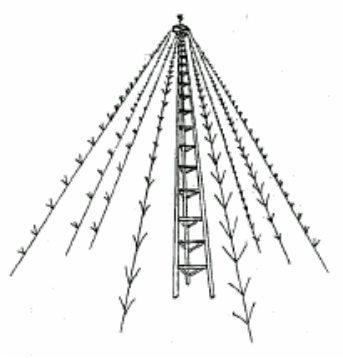
Disipador tipo sombrilla.
Está hecho con hilos de acero y protuberancias puntiagudas. Contiene aproximadamente 300 alambres dispuestos en hilos radiales con una separación de 7 centímetros que dan forma a una “sombrilla” de 6 metros de radio y 2 metros de alto.



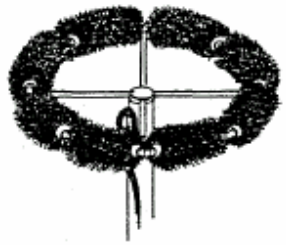
Disipadores híbridos.
Estos tienen la forma de un erizo y suponen la eliminación de la mayor parte de los rayos que se presentan en la naturaleza. Para aquellos que no son eliminados, el dispositivo actuaría como una punta común.



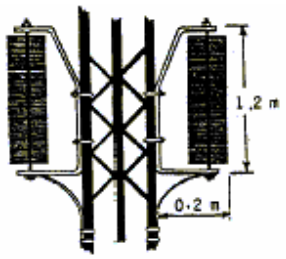
Disipadores cónicos.
Estos constan de hilos de acero con protuberancias puntiagudas dispuestos en forma cónica y se utilizan para la protección de torres de gran altura.



Disipadores de dona.
Como su nombre lo indica, estos tienen forma de dona, donde el núcleo circular está hecho de acero, sobre éste se tiene una gran cantidad de "agujas" que van desde los 7.5 hasta los 35 centímetros de largo.



Disipadores cilíndricos.
Constan de tres unidades con aproximadamente 14000 "agujas" cada una. Se ubican cerca de la punta de la estructura con un espaciamiento de 120º.



4.4.3 Controversias acerca del uso de los CTS.

Desde la aparición de los CTS los fabricantes de estos dispositivos han hecho grandes esfuerzos por que sus productos sean incluidos dentro de las normas de IEEE y NFPA, incluso han llegado a presionar al comité de cada una de estas instituciones. Como un claro ejemplo de esta presión ejercida por estas empresas la junta de estandarización de la IEEE autorizo la iniciación del proyecto P1576 referente a los CTS. La explicación era que la Junta tiene que aceptar cualquier aplicación que reúne los requisitos administrativos del proceso de sometimiento, y las objeciones técnicas serán dirigidas en el momento de votar en el proyecto de norma. Este hecho empañó la reputación de IEEE. Del mismo modo intentaron que sus productos fueran incluidos en la norma IEEE St.998-1996 referente a la protección en subestaciones y la norma IEEE St.1243-1997

referente a mejorar la actuación de las protecciones contra rayos en líneas de la transmisión. Han sido frecuentes las presiones de los fabricantes de los CTS, pero hasta la fecha ninguna norma internacional ha aceptado o recomendado los sistemas de transferencia de carga.

4.5 Sistemas de emisión temprana de streamer.

Los sistemas de emisión temprana de streamer, o ESE por sus siglas en ingles (Early Streamer Emisión), son dispositivos no convencionales que basan su funcionamiento en aumentar la eficiencia de las terminales aéreas, en lo que se refiere a su capacidad de generar más rápido un streamer o líder ascendente y así colectar con mayor eficiencia el rayo. Son muchas las tecnologías que han aparecido de los sistemas ESE, pero todas ellas tienen el mismo principio de funcionamiento.

4.5.1 Principio de funcionamiento.

Antes de que se presente una descarga de nube a tierra se anticipan algunos eventos indicativos que anuncian que dicha descarga es eminente. Estos eventos son;

- Un aumento súbito en el campo eléctrico,
- La creación de lideres ascendentes en las protuberancias aterrizadas,
- La competición de los líderes ascendentes por todo objeto aterrizado o en contacto con la tierra.

De este modo los fabricantes de los ESE justifican el funcionamiento de su producto del siguiente modo:

Si un sistema de protección crea un líder ascendente cuando el líder escalonado descendente se encuentra cercano a un objeto delgado y puntiagudo, este líder ascendente debe de alcanzar el líder descendente antes de cualquier otro líder generado por otro cuerpo ajeno al sistema de protección. Éste es el

principio básico operación del sistema ESE, que debe mostrar una emisión temprana. ΔT comparada con un SPC.

Si un sistema tiene una emisión temprana ΔT, los fabricantes de los dispositivos ESE afirman que el líder ascendente creado por un ESE cubrirá una distancia más larga que D, comparado con el generado por una terminal aérea convencional, para encontrarse con el líder descendente, como se muestra en la figura 4.11. Por lo tanto los fabricantes de los sistemas ESE aseguran que el rayo será interceptado a una distancia mayor y por consiguiente, su rango de cobertura aumentará.

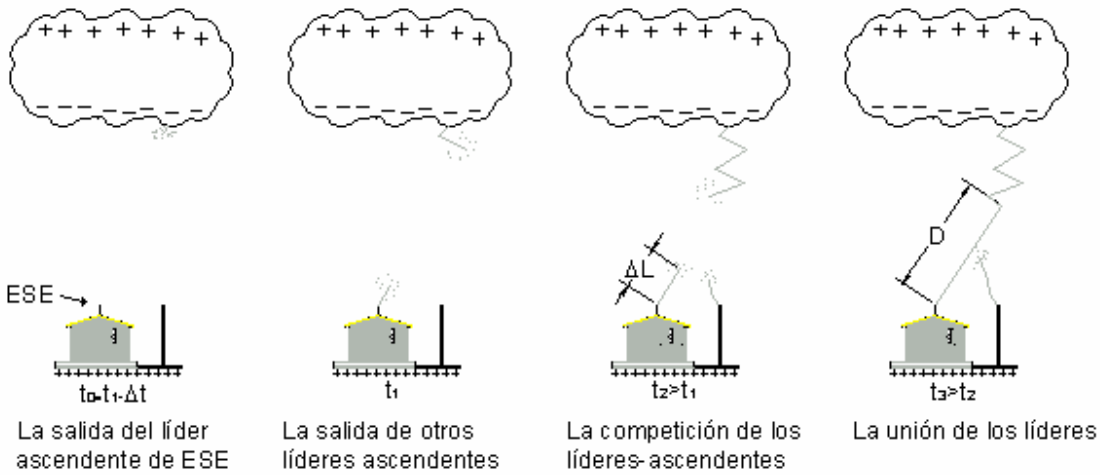


Figura 4.10. Principio de funcionamiento del sistema ESE.

El aumento del rango de operaciones afirman se logra basado en la velocidad de propagación del líder ascendente v. Esta velocidad ha sido utilizada en cálculos correspondientes por los fabricantes para evaluar el desarrollo y avance del líder ascendente de la siguiente manera.

$$\Delta L = \Delta t \times v_u \qquad 4.16$$

Donde ΔL representa el aumento en la distancia de atracción y Δt es la diferencia en tiempo obtenida con la emisión anticipada del líder ascendente. Considerando que la ganancia en tiempo obtenida con un dispositivo ESE esta en el rango de $10x10^{-6}$ a $50x10^{-6}$ segundos, considerando una velocidad del líder

ascendente de 10^6 m/s, el aumento en la distancia de atracción estaría en el rango de 10 a 50 metros.

El principio de generar un líder ascendente en un tiempo inferior al de un SPC para viajar una distancia más larga es una buena idea pero tiene sus inconvenientes. Sin embargo, el desafío es salir en el momento correcto. "Ni demasiado temprano ni demasiado tarde." Ya que si el líder ascendente sale demasiado temprano, no tendría la energía suficiente para recorrer todo el camino, pero si sale demasiado tarde su eficiencia no sería mayor a la de una terminal aérea convencional, parte de un SPC.

Los sistemas ESE tienen mucha similitud con un SPC, la diferencia fundamental entre estos dos sistemas de protección es la supuesta eficiencia más alta que tienen las terminales aéreas ESE, además los sistemas ESE usan un número mucho menor de terminales aéreas, por lo general sólo una terminal aérea, pero no por esto los sistemas de protección ESE son más baratos, de hecho son mas costosos.

En el principio de funcionamiento de los sistemas ESE, el parámetro más importante es la emisión temprana, este parámetro se traduce en un radio de protección. Una emisión temprana de un líder ascendente de cero es equivalente a tener un electro Franklin. De tal modo los fabricantes de los sistemas ESE calculan este radio de protección de la siguiente manera:

$$R_p = \sqrt{\left(h(2D - H) + \Delta L(2D + \Delta L)\right)} \qquad 4.17$$

Donde;

D: es la distancia de la emisión temprana

ΔL: es la ganancia en la longitud del líder ascendente definida por. L = vT, (La velocidad de la propagación del líder es considerada constante e igual a 10^6 m/s).

H: altura de la punta de ESE sobre el área a proteger

R_p: el radio de protección del ESE,

ΔT: Ganancia en la emisión temprana el tiempo instantáneo del líder ascendente continúo.

Cabe señalar que la obtención del radio de protección de un ESE se basa en

- La altura
- La magnitud de la corriente del rayo de retorno.
- La emisión temprana.

Los dos primeros parámetros son determinados mediante el uso del modelo electrogeométrico, cuando el radio de protección es calculado utilizando la formula 4.11.

$$R = 10I^{2/3} \qquad 4.18$$

Por consiguiente, la eficacia de un ESE instalado en una estructura solo varía según la corriente del rayo del retorno, al igual que un SPC.

De este modo los fabricantes dan diferentes valores de tiempo de emisión temprana, los cuales ofrecen diferentes radios de protección, en la tabla 4.1 se muestran los radios de protección a 5 m bajo la punta del ESE. La emisión temprana es una constante que depende de cada modelo de ESE.

Nivel de protección Emisión temprana	I	II	III
Modelo de 25 μs	42 m	57 m	65 m
Modelo 40 μs	58 m	75 m	84 m
Modelo 60 μs	79 m	97 m	107 m

Tabla 4.1. Radios de protección del ESE (h=5m)

A cada valor de emisión temprana le corresponde un radio de protección diferente, a su vez cada a cada radio de protección le corresponde un nivel de protección diferente el cual ofrece una eficiencia del sistema de protección diferente como se muestra en la figura 4.11.

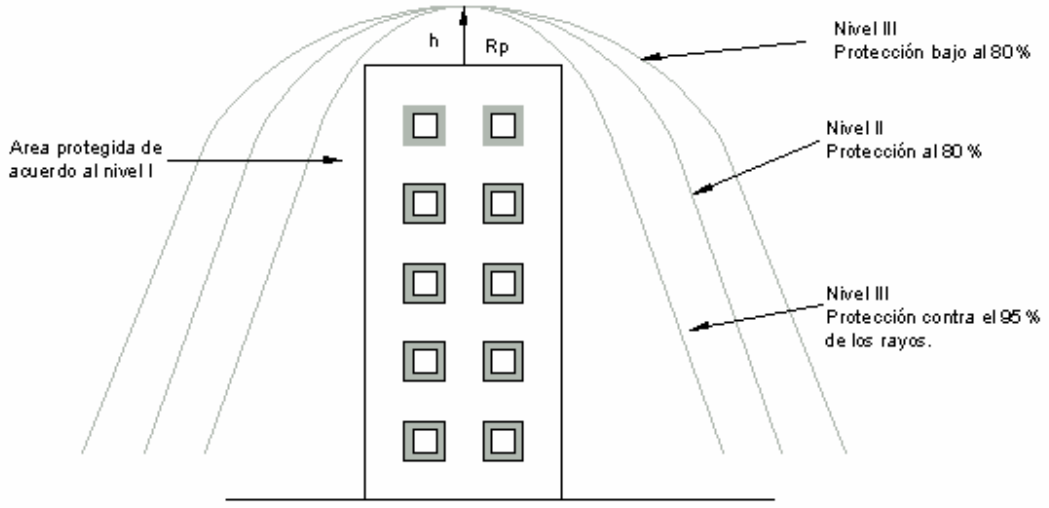


Figura 4.13. Zona de protección ofrecida por un ESE

Los sistemas de protección ESE, tiene algunos cabos sueltos en su principio de funcionamiento que se expone de la siguiente manera.

Como se menciono en este capitulo, para que se generen las descargas corona y los líderes ascendentes se necesitan de condiciones especiales de campo eléctrico que sólo se logran cuando un nubarrón está encima de una zona específica y un líder escalonado está cercano, sólo entonces se tienen los valores apropiados de campo eléctrico para iniciar el proceso de conexión. Los fabricantes de dispositivos ESE aseguran que sus productos pueden generar un líder ascendente de conexión antes que cualquier otro objeto ajeno al sistema de protección o más rápido comparado con una terminal aérea de un SPC, para lograr esto, el dispositivo ESE tiene que generar un líder ascendente en condiciones en las cuales los valores de campo eléctrico son inferiores a los 500 kV/m necesarios para producir el líder ascendente de forma natural. Las condiciones óptimas para generar el líder ascendente, se logran sólo cuando el líder descendente está muy próximo al objeto aterrizado o a la terminal aérea del sistema de protección.

Las condiciones de campo eléctrico para una terminal aérea cuando se tiene al nubarrón sobre el aérea de protección y cuando un líder ascendente esta próximo se ilustran en la figura 4.14.

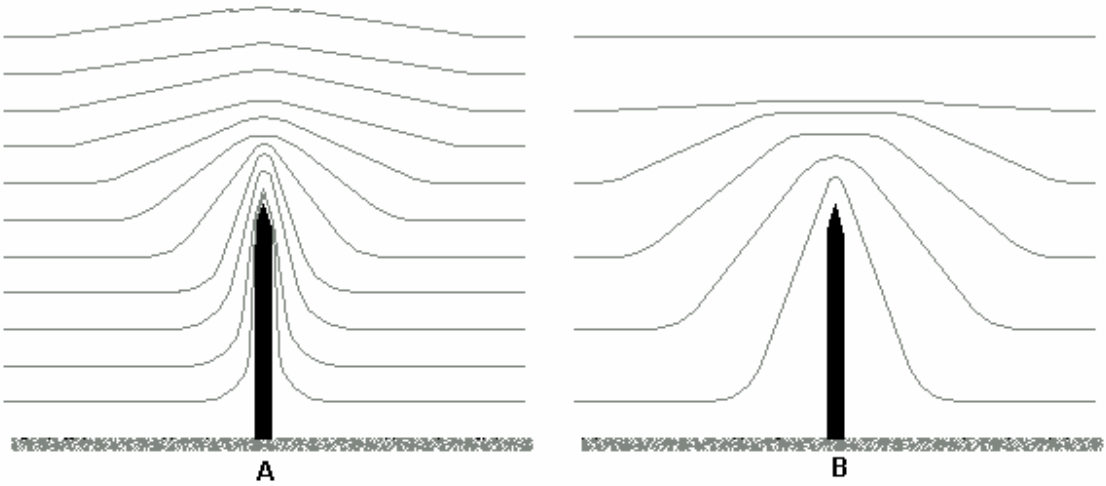


Figura 4.14. Condiciones de campo eléctrico para una terminal aérea.

En la figura 4.14 se representa la intensidad de campo eléctrico, un campo eléctrico mayor se representa con un numero mayor de líneas de campo por unidad de área y paralelas entre si. De tal manera que para la figura 4.16 A, se representa el campo eléctrico sobre una terminal aérea cuando el líder ascendente esta próximo a esta, dado que la punta del líder descendente contiene una gran cantidad de carga cuando líder descendente induce un campo eléctrico muy grande. Este campo eléctrico inducido es deformado por la presencia de un objeto metálico aterrizado como lo es una terminal aérea, este campo eléctrico facilita la generación de descargas corona y por la tanto de los lideres de conexión.

En la figura 4.16 B se muestra un campo eléctrico cuando un nubarrón se encuentra sobre él y la presencia de líder descendente es aún lejana para inducir un campo eléctrico de mayor intensidad, por lo tanto el campo eléctrico es menor y las líneas de campo son menores, y aunque estas líneas se deforman de la misma manera que en la figura 4.16 A, las descargas corona y los lideres ascendentes no pueden ser sostenidos por el campo eléctrico para poder alcanzar el líder descendente. Visto de otro modo, los cortos circuitos provocados por la deformación de campo facilitan la generación de descargas corona y la

propagación del líder ascendente para lograr alcanzar al líder descendente. Por lo tanto, a mayor intensidad de campo eléctrico mayor será la deformación de campo eléctrico y mayor la posibilidad de generar un líder ascendente de conexión.

Suponiendo que el dispositivo ESE lograra generar el líder ascendente de conexión en forma temprana, este líder esta condenado a extinguirse en el aire, ya que no existen las condiciones de campo eléctrico para que este líder ascendente se desarrolle hasta alcanzar al líder descendente. Dicho en otras palabras el dispositivo ESE no es capaz de controlar las condiciones de campo eléctrico ambiental o incrementarlo para que pueda efectuarse el proceso de conexión.

En ocasiones el líder ascendente generado por una terminal aérea ESE puede concluir el proceso de conexión, pero esto se ha logrado bajo campos eléctricos muy grandes generados por el nubarrón. Por tanto, el funcionamiento de un ESE en condiciones de campo eléctrico promedio no tienen un mejor funcionamiento que una terminal aérea convencional o electrodo Franklin, ya que el parámetro de emisión temprana del ESE es igual a cero $\Delta t=0$, lo que equivale a tener una terminal aérea convencional.

4.5.2 Discusión de los sistemas ESE.

Los sistemas ESE han sido estudiados y discutidos a nivel internacional, los defensores de estos dispositivos aseguran una eficiencia mayor a la de un SPC. Algunas organizaciones, como la NFPA y el INERIS (Instituto nacional de Ambiente Industrial y Valoración de Riesgo), la primera Estadounidense y la segunda Francesa, han estudiado cada una por su parte estos dispositivos. La NFPA hizo una investigación independiente para determinar si debe haber una norma nacional americana para los sistemas ESE como lo es la NFPA 780 para los sistemas convencionales. Basado en estos estudios NFPA concluyó que; no había "ninguna base que apoye el funcionamiento de los dispositivos ESE" y por lo tanto ninguna base pare publicar una norma referente a la utilización dispositivos ESE. Por su lado INERIS se encargó de revisar la eficiencia de los sistemas ESE, para esto contó con la participación de algunos fabricantes de dispositivos ESE, y

dado que la norma Francesa NFC 17-102 contempla la utilización de estos dispositivos INERIS revisó algunos aspectos de esta norma. El resultado de este estudio fue la prohibición en el uso de estos dispositivos en instalaciones con riesgo de fuego y explosión, hasta que un estudio serio y neutral arroje resultados favorables. También la normatividad Española contempla la utilización de los dispositivos ESE.

4.5.3Tipos existentes de ESE.

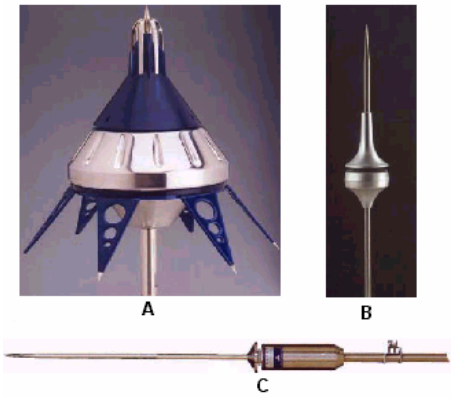
Hay varios tipos de terminales aéreas ESE y es importante distinguir las categorías de cada uno. Porque las tecnologías usadas son diferentes y por lo tanto se traduce en un proceder diferente. Hay cuatro tipos de ESE:

Terminales aéreas radiactivas.

El pararrayos radiactivo es un pararrayos sencillo con un elemento radiactivo agregado adjuntado en un recipiente cerca de la punta, generalmente el material radiactivo es ^{226}Ra (radio 226), ^{85}kr (kurchatovio 85) y ^{60}Co (cobalto 60)[12]. La fuente radiactiva crea una ionización aérea importante alrededor de la punta del pararrayos, mientras aumenta el número de electrones, el pararrayo es capaz empezar la primera fase del proceso de conexión.

Terminales aéreas de gatillo electrónico.

La terminal aérea con un gatillo electrónico es un dispositivo sencillo con un circuito electrónico agregado, que según sus fabricantes es posible producir la ionización aérea para crear a un líder ascendente mediante la generación de chispas alrededor de la punta del dispositivo. La ionización aérea pueden activarse en un momento fijo



Terminales aéreas piezo-eléctricas.

Las terminales aéreas piezo-eléctricas obtienen la energía necesaria para su funcionamiento de un elemento del piezoresistivo que usa el poder del viento como generador. La parte más alta del pararrayos descansa en un tablero cerámico. El viento mueve la parte superior del la terminal aérea que comprimirá el elemento piezoeléctrico para que este oscile. La tensión mecánica se transforma en voltaje eléctrico por medio del elemento del piezoresistivo

Terminales aéreas de forma especial.

Estos dispositivos coleccionan la energía radiada del líder ascendente por medio de un sistema compuesto de una sola terminal aéreas conectado a tierra, y un parte metálica aislada al potencial eléctrico del ambiente. En cuanto se alcance el potencial el voltaje del ionización aérea, se crean las chispas en un gap parte del dispositivo que crea las primeras fases del proceso de conexión del rayo

Existen en el mercado dispositivos ionizantes que, a diferencia de los ESE, tienen la capacidad de ionizar el aire circundante como cualquier elemento pasivo, tomando su energía del líder descendente (es decir, sin fuente propia) mediante las ventajas que ofrece el arreglo de la punta (esférico-puntiagudo) y es aplicado normalmente con un método de protección conocido como Volumen de Colección. La figura 4.15 muestra una terminal aérea de este tipo de terminales aéreas. .

Figura 4.15 Terminal aérea sin fuente ionizante propia

4.6 Aplicación de nuevos productos en México.

En México se han comercializado varios tipos de sistemas no convencionales de protección del tipo CTS. En sus páginas corporativas de Internet aparecen los siguientes clientes que han tenido en México;

- Pemex (GAM Industrial Supply) Mexico XX 1 Dome Roof Tank Array, 5 SBI, 4 CR8
- Pemex Mexico XX 13 DA, 110 SBI, 20 SBT, TVSS
- Pemex (Construcciones Protexa) Mexico XX 20 low profile DAS for tanks

Es importante notar el carácter que tienen este tipo de instalaciones, ya que PEMEX es una empresa petrolera, sus instalaciones son de alto riesgo y ninguna norma nacional o internacional avala o recomienda la utilización de los sistemas CTS.

Los sistemas ESE han sido comercializados e instalados por varias empresas en nuestro país, generalmente extranjeras

Capitulo 5
Normas internacionales de protección contra rayos.

Existen muchas normas de protección contra rayos alrededor del mundo y cada una de ellas puede enfocarse a la protección de diferentes tipos de estructuras o de diferente uso, pero todas las normas tratan de dar la mejor protección para salvaguardar la vida de los usuarios y evitar daños a la estructura y el equipo contenida en ella. Es por esto que las instituciones que tienen a su cargo la responsabilidad de publicar las normas de protección contra rayos no deben obedecer a intereses de particulares, de tal modo que una norma de protección debe analizar los métodos o sistemas de protección desde un punto de vista científico, que se debe de retroalimentar con la experiencia de fallas o daños ocurridos en el pasado. De este modo tenemos una serie de normas, que se han ganado la aceptación internacional por su largo camino recorrido y la seriedad con la que realizan su trabajo.

En el presente capitulo se analizarán los métodos o sistemas de protección recomendados por cada norma, así como su aplicación y restricciones.

5.1 Norma para la instalación de sistemas contra rayos NFPA 780.

5.1.1 Alcances y definiciones.

La norma NFPA 780 es considerada como una de las más antiguas que existen, pues data de 1904 con el nombre de; Especificaciones para la Protección de Edificios Contra Rayos.

La NFPA 780 en su edición 2000, revisada en este capitulo, es muy clara en sus alcances, en el capitulo uno esta norma aclara los siguientes puntos:

La NFPA 780 cubre los requerimientos de sistemas de protección contra rayos para las siguientes estructuras.

(1) Estructuras ordinarias

(2) Diversas estructuras y ocupaciones especiales

(3) Chimeneas de trabajo pesado

(4) Embarcaciones

(5) Estructuras que contienen vapores, gases inflamables o líquidos seguidos de evapores inflamables.

Este documento no cubre los requerimientos de sistemas de protección contra rayos para las siguientes estructuras:

(1) Edificios de manufactura de explosivos y polvorines.

(2) Sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica.

También hace una aclaración muy importante en el tipo de sistema de protección que debe de utilizarse si se desean implementar las recomendaciones de esta norma. En el capitulo 1 en el punto 1.2 dice lo siguiente:

Este documento no debe cubrir los requerimientos de sistemas de protección contra rayos para los sistemas de emisión temprana (ESE) o sistemas de disipación de carga (CTS).

Este punto es muy importante pues algunos modelos de CTS como lo son los disipadores híbridos afirman en su documentación técnica [4] que pueden instalarse siguiendo las recomendaciones de instalación de la NFPA 780. De este modo la NFPA pone un límite referente al sistema de protección que debe de implementarse, si se desea seguir sus recomendaciones para diseñar un sistema de protección contra tormentas eléctricas.

En capítulos posteriores la NFPA 780 define los conceptos de sistema de protección contra rayos y dispositivo terminal de intercepción de la siguiente manera

2.1.24 Sistema de protección contra rayos. Un sistema de protección contra rayos es un sistema completo de dispositivos de terminales aéreas, conductores, terminales aterrizadas, conductores interconectados, dispositivo supresores de onda, y otros conductores o montajes requeridos para completar el sistema.

2.1.3.4. Dispositivo terminal de intercepción. Un componente de un sistema de protección contra rayos que intercepta los rayos y conduce a éstos a tierra. Estos dispositivos incluyen terminales aéreas, mástiles metálicos, partes metálicas permanentes de la estructura, cables en lo alto aterrizados instalados en catenaria (hilos de guarda).

Los dos puntos anteriores describen de manera clara un SPC y limita la aplicación de esta norma solo al sistema convencional de protección.

3.1.1 Estructuras ordinarias. Una estructura ordinaria debe ser cualquier estructura que es usada para propósitos ordinarios o comercial industrial, agrícola, institucional, o residencial

5.1.2 Métodos de protección utilizados en NFPA 780.

5.1.2.1 Cono de protección en NFPA 780.

La utilización del cono de protección en la NFPA 780 para el diseño de protecciones se limita a estructuras ordinarias.

La aplicación del cono de protección es limitada a estructuras no mayores a 50 ft o 15.24 m de altura y el ángulo del cono de protección formado es de aproximadamente de 45 grados.

Para estructuras menores de 25 ft o 7.6 m de altura la NFPA 780 utiliza un cono con una relación de 2 a 1 que equivale a tener un ángulo de protección de 60°. También señala que porciones bajas de la estructura deben de ser consideradas dentro de la zona de protección del cono de protección. Como se muestra a continuación.

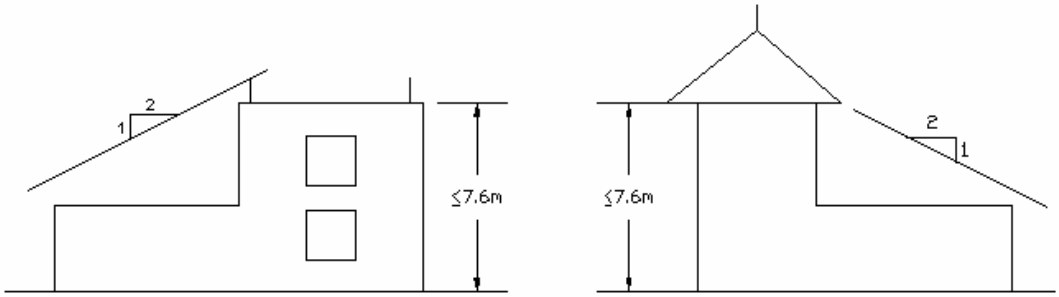


Figura 5.1. Protección de estructuras ordinarias menores a 7.6 m, según NFPA 780.

De la misma forma se protegen las estructuras menores a 50 ft o 15.24m, pero aquí se utiliza un cono con una proporción de 1:1, como se muestra en la figura 5.2.

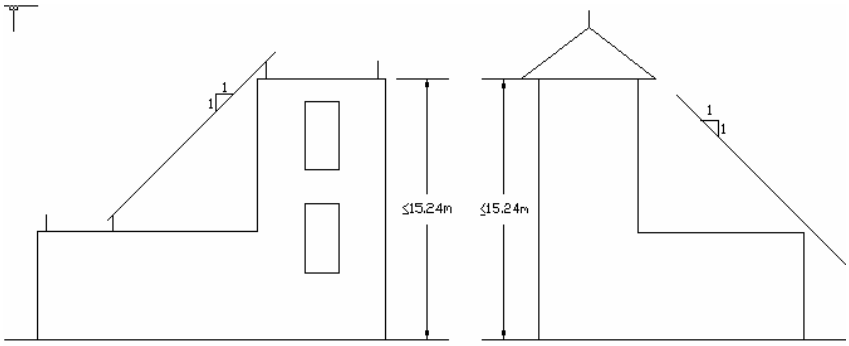


Figura 5.2. Protección de estructuras ordinarias menores a 15.24 m, según NFPA 780.

Estos son los únicos casos en los cuales se utiliza el cono de protección para el diseño de protecciones contra rayos. En los siguientes casos para estructuras en las cuales se pueden aplicar las recomendaciones de la NFPA 780 se aplica el método de la esfera rodante.

5.1.2.2 Modelo de la esfera rodante en NFPA 780.

El método de la esfera rodante en la NFPA 780 se aplica en los siguientes casos:

- Estructuras ordinarias
- Estructuras que contienen vapores inflamables, gases inflamables, o líquidos que pueden emitir vapores inflamables.
- Embarcaciones.

Es de gran importancia el radio de la esfera rodante que se aplica, por que este a su vez se traduce en un nivel de protección. Los radios de protección o tamaño del último paso de la descarga utilizados en esta norma son los siguientes.

Estructura	Radio de la esfera	
	Pies (ft)	Metros (m)
Estructuras ordinarias	150	45
Estructuras que contienen vapores inflamables, gases inflamables, o líquidos que pueden emitir vapores inflamables.	100	30
Embarcaciones	100	30

Tabla 5.1. Radios de protección para diferentes, según NFPA 780.

La NFPA 780 utiliza graficas apara obtener la distancia de protección horizontal protegida que se obtiene al utilizar el método de la esfera rodante, donde los factores a considerar son el radio del esfera y la altura de la terminal aérea, como se muestra en la figura 5.3.

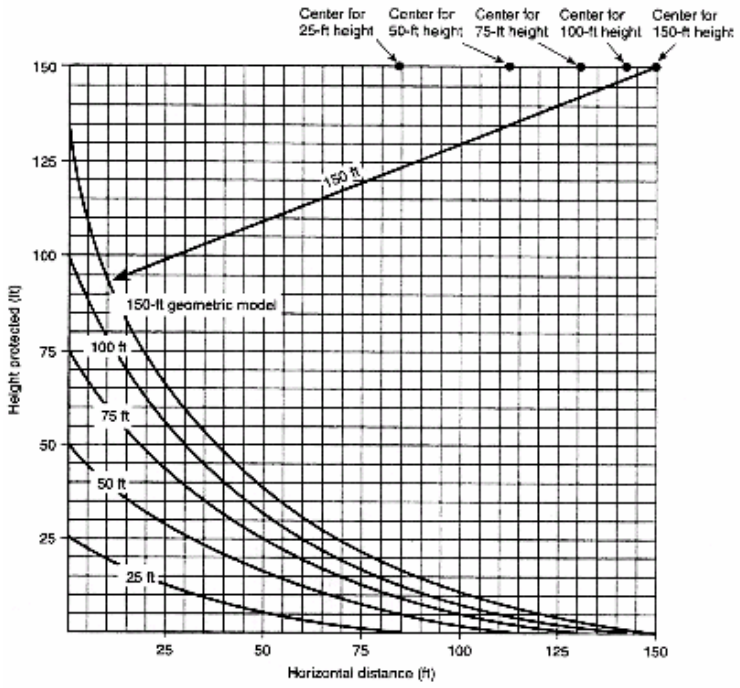


Figura 5.3. Grafica para obtener la distancia de protección horizontal, según NFPA 780.

NFPA 780 también utiliza una formula matemática para determinar la distancia horizontal protegida, la formula matemática es como sigue.

$$d = \sqrt{h_1(300 - h_1)} - \sqrt{h_2(300 - h_2)} \qquad 5.1$$

Donde:

d = distancia horizontal en pies.

h1 = altura mas grande en pies.

h2 = altura mas pequeña (cima del objeto) en pies.

Esta formula tiene la misma forma en todos los casos, solo difiere en el termino expresado como un constante que depende del radio de la esfera rodante.

En el caso de estructuras ordinarias la NFPA 780 hace una serie de recomendaciones referente a los diferentes tipos de tejados o azoteas en las cuales se pueden colocar las terminales aéreas. Es importante señalar que para estructuras ordinarias la NFPA 780 recomienda un espaciamiento entre las terminales aéreas no mayor que 6 m, siempre y cuando se utilicen electrodos franklin de 30 cm, pero si se utilizan electrodos franklin de 60 cm o más el espaciamiento entre las terminales aéreas puede ser de hasta 7.6 m.

Para las estructuras que contienen vapores inflamables, gases inflamables, o líquidos que pueden emitir vapores inflamables, la NFPA recomienda utilizar cables aéreos soportados por mástiles. La zona de protección de cualquier mástil o cable aéreo se obtiene utilizando el último paso de la descarga de 30 m, pero la zona de protección no se incrementara si aumentamos la altura de las terminales aéreas por encima del último paso de la descarga. La razón por la cual se utiliza un radio de 30 m es debido a que el último paso de la descarga relacionada a la severidad de la mayoría de los rayos es mayor que 30m, de esta manera se considera que la estructura estará protegida adecuadamente.

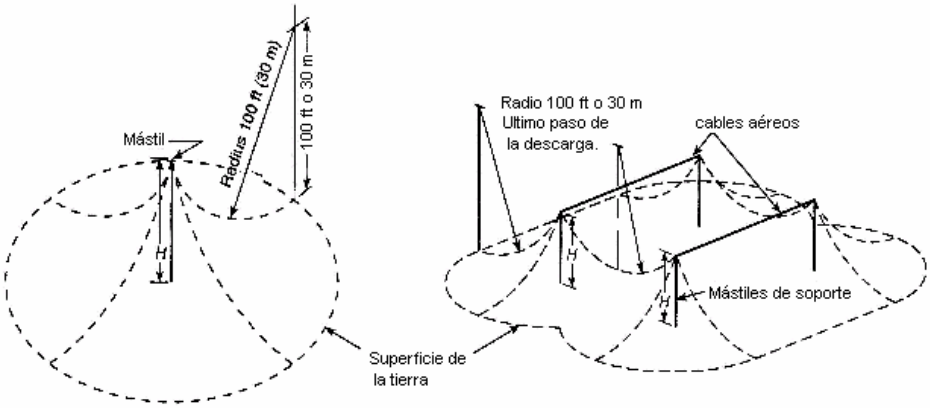


Figura 5.4. Protección para estructuras que contienen materiales inflamables.

La protección para las estructuras restantes contempladas en la NFPA 780 son realizadas de la misma manera a las anteriores, solo difiere en aplicación de materiales y detalles de instalación.

Es importante puntualizar que la NFPA 780 toma la valoración de riesgo de rayo solamente como propósitos informativos y no como parte de los requerimientos de esta norma.

5.2 Norma de la comisión electrotécnica Internacional IEC 61024

La norma de la comisión electrotécnica internacional la IEC 61024, protección de estructuras contra rayos, esta dividida en tres partes: IEC 61024-1 referente a principios generales, IEC61024-1-1 referente a selección de niveles de protección para protecciones contra rayo y la IEC 61024-1-2 referente al diseño, mantenimiento e inspección de los sistemas de protección contra rayos.

5.2.1 Alcances y definiciones.

La IEC 621024-1 en su introducción dice lo siguiente; *debe notarse que un sistema de protección contra rayos no puede prevenir la formación de rayos*. Esto nos da a entender que los sistemas CTS no entran dentro de la definición de sistemas de protección contra rayos de la IEC 61024.

De la misma forma la IEC 61024-1 aclara que: Un sistema de protección contra rayos, diseñado e instalado de acuerdo con esta norma, no garantiza absoluta protección de la estructura, personas u objetos; sin embargo, la aplicación de esta norma reducirá significantemente el daño causado por rayos a la estructura protegida por este.

La IEC 61204 en la subcláusula 1.1.1 marca sus alcances.

Esta norma es aplicable al diseño e instalación de sistemas de protección contra rayos para estructuras comunes de hasta 60 m de altura.

Los caso casos que están fuera del alcance de esta norma son:

- Sistemas de ferrocarril.
- Transmisión eléctrica, distribución y sistemas de generación externos a la estructura.
- Sistemas de telecomunicaciones externos a la estructura.
- Vehículos, barcos, aviones, instalaciones costa afuera.

El objetivo de la norma IEC 61024 es el siguiente:

La norma proporciona información para el diseño instalación, inspección y mantenimiento de un efectivo sistema para la protección de estructuras contra

rayos como se indica en la subcláusula 1.1.1, también para personas instalaciones contenidos dentro o fuera de ellos.

En puntos siguientes la IEC 61024 define los siguientes conceptos:

Sistema de protección contra rayos. El sistema completo usado para proteger un espacio contra el efecto del rayo. Este consiste en un sistema externo y en un sistema de interno protección.

Sistema de protección externo contra rayos. Este sistema consiste en un sistema de terminales aéreas, conductores de bajada y sistemas de tierras.

Sistema de protección interno contra rayos. Todas las medidas adicionales las cuales pudieran reducir los efectos electromagnéticos de la corriente del rayo dentro del espacio a ser protegido.

5.2.2 Métodos de protección utilizados en IEC 61024.

El sistema de protección externa, el cual es del interés del presente capitulo, puede ser formado de la combinación de los siguientes elementos.

1. Varas (electrodos Franklin)
2. Alambres extendidos.
3. Conductores enmallados.

La IEC 61024 utiliza 3 métodos para el diseño de protecciones contra rayo, los cuales son los siguientes:

a) Angulo de protección.
b) Esfera rodante.
c) Conductores enmallados.

La IEC 61024 da cuatro niveles de protección, pero no todos los métodos de protección se pueden aplicare de la misma forma, dependiendo del nivel de protección pueden existir restricciones parar utilizar cada método de protección. Como se muestra en la tabla 5.2

Nivel de protección	h(m) / R(m)	20	30	45	60	Ancho de malla
		$\alpha^{(0)}$	$\alpha^{(0)}$	$\alpha^{(0)}$	$a^{(0)}$	
I	20	25	*	*	*	5
II	30	35	25	*	*	10
III	45	45	35	25	*	10
IV	60	55	45	35	25	20
** Solo se aplica esfera rodante y malla en estos casos*						

Tabla 5.2 Posicionamiento del sistema de terminales aéreas de acuerdo al nivel de protección

Donde:

h(m) es la altura de la estructura.

R(m) es el radio de la esfera.

5.2.2.1 Cono de protección en IEC 61024.

La IEC 61024 recomienda el método del cono de protección para estructuras simples (estructuras utilizadas para propósito ordinario, comercial, industrial, agrícola, institucional o residencial) o partes pequeñas de una estructura grande. Este método no es conveniente para estructuras más altas que el radio de esfera rodante pertinente para la selección del nivel de protección del sistema de protección contra tormentas eléctricas.

De acuerdo con la tabla 5.2, el ángulo de protección α es diferente para diversas alturas de la terminal aérea sobre la superficie a ser protegida como se muestra en la figura 5.5, en donde se puede observar que el ángulo de protección α_1 corresponde a la terminal aérea de altura $h=h_1$, tomando la altura sobre la superficie del techo (referencia plana); el ángulo de protección α_2 es el ángulo correspondiente a la altura $h_2 = h_1 + H$, tomada sobre la tierra plana como referencia.

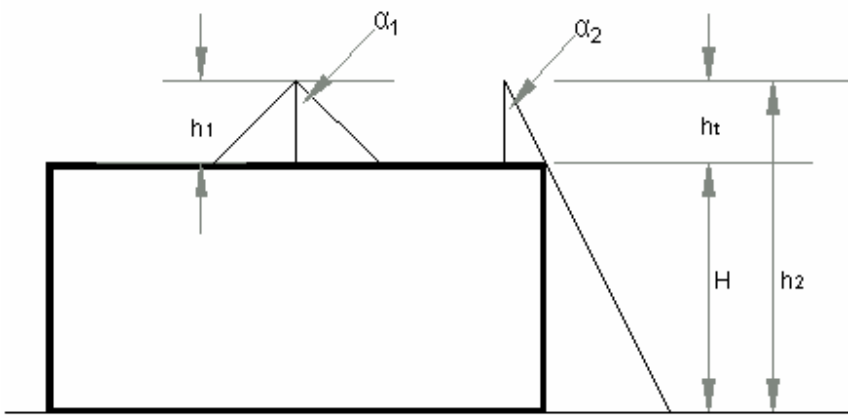


Figura 5.5. Aplicación del cono de protección, según IEC 61024.

Debido a estas limitaciones geométricas la utilización ángulo de protección está restringida y no será aplicado si la altura h, sobre la superficie a ser protegida, es mas grande que la radio de la esfera rodante definido en al tabla 5.2.

5.2.2.2 Método de la esfera rodante en IEC 61024..

El método de la esfera rodante en la IEC 1024-1-2 es recomendado para estructuras complejas. La mayor parte del contenido de esta norma referente al método de la esfera rodante es relacionado a su aplicación

El método de la esfera rodante debe ser usado para identificar el espacio protegido de partes y áreas de la estructura donde la tabla 1 de la IEC 61024-1 (tabla 5.2), excluye el uso del método del ángulo de protección.

El modo en el cual se aplica el método de la esfera rodante en la IEC 61024-1-2 es de la siguiente manera; de acuerdo a la altura de la h_t se elige un nivel de protección y este a su vez se traduce en un radio de protección, como se muestra en la figura 5.6.

Es importante decir que la elección del nivel de protección no se basa solamente en altura de la terminal aérea o estructura, la IEC 61024-1 dedica un amplio análisis a la elección del nivel de protección. Esta norma, a diferencia de la NFPA 780, considera el análisis de riesgo como parte importante del diseño del sistema de protección contra rayos, y no solo de carácter informativo.

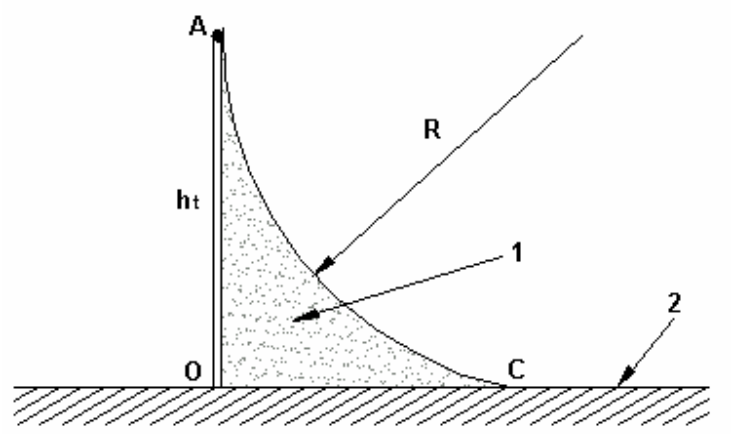


Figura 5.6. Aplicación del método de la esfera rodante según la IEC 61024

En la figura:

1 Espacio protegido

2 Referencia plana.

R radio de la esfera rodante de acuerdo con la tabla 1 de la IEC 61024-1 (tabla 5.2)

OC Radio del área protegida.

$H_t = h_1$ Ver tabla 1 de la IEC 61024.

Ht Altura física de la terminal aérea sobre la referencia plana.

La IEC 61024-1-2 da la formula matemática 5.2 para calcular la protección que ofrecen dos o más conductores horizontales, mediante la utilización de esta formula matemática podemos calcular la distancia de penetración que tiene la esfera rodante entre los conductores.

$$p = R - [R^2 - (d/2)^2]^{1/2} \qquad 5.2$$

Donde la distancia de penetración p debe de ser mayor que h_t, como se muestra a continuación en la figura 5.7.

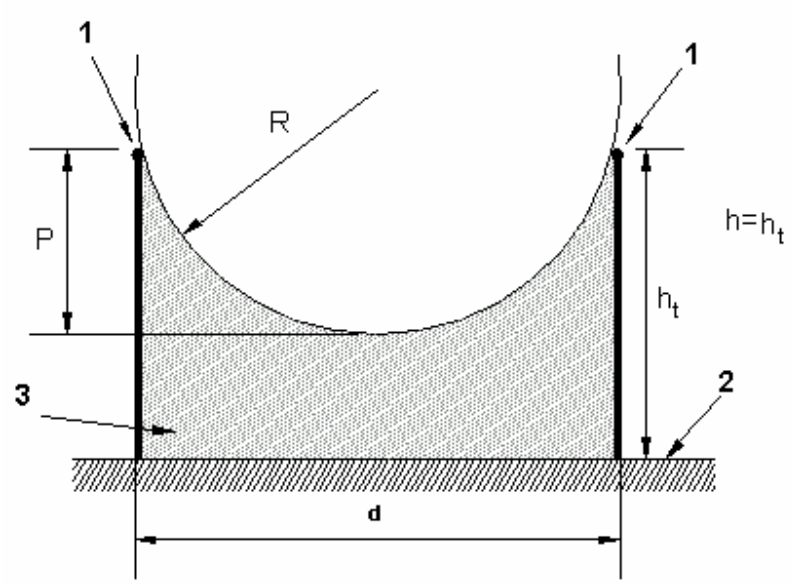


Figura 5.7. Espacio protegido por dos terminales aéreas horizontales

Donde:

- 1 terminales aéreas verticales.
- 2 plano de referencia
- 3 área protegida
- h_t altura física de la estructura sobre el plano de referencia.
- p distancia de penetración de la esfera rodante.
- h altura de la terminal aérea de acuerdo con la tabla 5.2.
- R radio de la esfera rodante.
- d distancia de separación entre las dos terminales aéreas horizontales

Es importante hacer notar que la distancia de penetración p de la esfera rodante deber ser menor que la altura h_t para lograr proteger el área entre las dos terminales aéreas verticales.

5.2.2.3 Método de la malla en IEC 61024.

Este método también es conocido cono jaula de Faraday, y consiste en encerrar la estructura a ser protegida en dentro de una jaula de cobre formada de

conductores del mismo material. Este método de protección según la IEC 61024-1-2 solo es aplicable si se reúnen las siguientes condiciones:

a) Los conductores de las terminales aéreas son posicionadas sobre
    - Las líneas de borde del tejado
    - Vuelos del tejado
    - En el filo de los tejados, si la inclinación del tejado excede 1/10;

El método de la malla esta restringido al nivel de protección elegido para la estructura y la altura de la misma como se muestra en la tabla 5.2, del mismo modo el ancho de la malla esta relacionado a estos dos parámetros.

Las terminales aéreas que forman parte del sistema de protección contra rayos deben ser instaladas de tal manera que la corriente del rayo pueda siempre encontrar por lo menos dos distintas rutas metálicas a tierra desde la terminal aérea.

5.2.3 Selección de los niveles de protección en IEC 61024.

Un aspecto muy importante de la norma IEC 61024-1-1 es su estudio de riesgo, ya que la elección del método de protección depende en gran medida de este estudio. El propósito de seleccionar un nivel de protección es reducir el riesgo de daño, bajo el nivel máximo tolerable, por una descarga directa a la estructura o volumen a ser protegido.

Para cada estructura el riesgo de daño puede ser estimado tomando en cuenta la frecuencia anual de descargas a la estructura (N_d), que se interpreta como la probabilidad con que el rayo cause daños y la media posible de la cantidad de perdidas que pueden aparecer como consecuencia de que un rayo golpee a la estructura. El daño depende de algunos parámetros entre los cuales esta: el uso y el contenido (humanos y bienes) del volumen a ser protegidos; materiales de construcción y medidas tomadas para reducir las consecuencias de los efectos del rayo.

Los parámetros a ser considerados para la selección del nivel de protección son; la frecuencia esperada de descargas directas a la estructura N_d, y la

frecuencia aceptada de descargas a la estructura N_c. Cada uno de estos parámetros se evalúa de forma diferente y proporcionan diferente información.

El N_c proporciona información referente a los daños que se pueden presentar o aceptar en caso de sufrir el impacto de un rayo en la estructura. El valor de N_c es responsabilidad de los Comités Nacionales, instituciones especializadas en valoración de riesgos, donde las pérdidas humanas culturales y sociales son involucradas. El valor de N_c puede ser establecido por el dueño de la estructura o el diseñador del sistema de protección contra rayos donde las pérdidas son relevantes solamente a la propiedad privada. Los valores de N_c pueden ser estimados a través del análisis del riesgo de daño tomando en cuenta los algunos factores como:

- Tipo de construcción.
- Presencia de estructuras inflamables y explosivas.
- Medidas tomadas para reducir las consecuencias de los efectos del rayo.
- Numero de personas involucradas en el daño.
- Tipo e importancia del servicio público involucrado.
- Valor de los vienes teniendo el daño sufrido.

La frecuencia esperada N_d de descargas directas a la estructura puede ser valorada por la formula 5.3:

$$N_d = N_g * A_e * 10^{-6} \text{ por año} \qquad 5.3$$

En donde,

N_g es la densidad de rayos a tierra anual, en rayos por kilómetro cuadrado por año concerniente a la región en donde la estructura es localizada, véase 3.2.

A_e es el equivalente al área de colección de la estructura en metros cuadrados.

El primer paso en el procedimiento de selección del sistema de protección contra rayos (en caso de ser necesario) requiere de una adecuada valoración de la estructura considerando rasgos como dimensión de la estructura, localización,

actividad de tormentas (densidad anual de rayos a tierra) en la región considerada, también la clasificación de la estructura debe ser determinada. Estos datos dan el fondo para la valoración de riesgo.

El valor de la frecuencia aceptada de descargas N_c debe de ser comparada con el valor actual de frecuencia de rayos N_d de la estructura. Esta comparación permite tomar una decisión acerca de si es necesario un sistema de protección contra rayos, y si es así, de que tipo.

Si $N_d \leq N_c$ el sistema de protección contra rayos es opcional.

Si $N_d > Nc$ un sistema de protección contra rayos debe ser instalado.

En caso de que el sistema de protección contra rayos sea instalado el nivel de riesgo esta relacionado con la eficiencia del sistema de protección contra rayos, y esta eficiencia se calcula mediante la formula 5.4.

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \qquad 5.4$$

La relación entre eficiencia y nivel de protección del sistema de protección contra rayos se muestra en la tabla 5.4.

Nivel de protección	Eficiencia del sistema de protección.
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

Tabla 5.4. Niveles de protección relacionados a la eficiencia del sistema de protección.

5.3 Norma del instituto americano del petróleo.

La norma del instituto americano del petróleo, API por sus siglas en ingles, protección contra ignición provocado por estática, rayos y corrientes parásitas, en sus recondiciones prácticas concernientes a métodos de protección contra golpe directo de rayo, que es el aspecto de interés de esta trabajo, describe los tres métodos expuestos en el capitulo 3, que son los sistemas de emisión temprana de streamer (ESE), sistemas de trasferencia de carga (CTS) y el sistema de protección convencional (SPC), pero el hecho de que describa las características de cada uno de estos productos no quiere decir que recomiende su instalación en las estructuras de ocupación de esta norma.

Dado que un impacto directo de rayo puede dañar objetos y que la corriente del rayo tiene como resultado la liberación de una gran cantidad de energía calorífica, la corriente eléctrica y la energía depositada por un golpe de rayo puede ser suficientemente alta para fundir componentes metálicos delgados, destruir componentes electrónicos y ocasionar fuego, las instalaciones a las cuales esta enfocada la norma de API son consideradas de lato riesgo. Debido al carácter de alto riesgo de estas instalaciones, API para la implementación de un sistema de protecciones contra rayo se remite a las recomendaciones de la NFPA 780, y como ya se menciono anteriormente en esta capitulo en el punto 5.1.1 la NFPA 780 solamente recomienda la instalación de sistemas de protección convencional contra rayos basados en el método del ángulo de protección y esfera rodante, por lo tanto los sistemas ESE y CTS quedan fuera del alcance de aplicaciones de la norma de API.

Cabe señalar que algunos fabricantes de ESE y CTS han aprovechado lo limitado del anexo C de la norma API, en donde explica las características los CTS y ESE, para decir que sus productos son recomendados por esta norma.

5.4 Norma Británica, protección de estructuras contra rayo BS 6651.

La norma Británica al igual que la norma IEC 61024 cuenta con gran aceptación internacional.

5.4.1 Alcances y definiciones.

Dentro del texto de esta norma existen un par de enunciados en él prologo y los alcances de la misma, ambas formulaciones dicen lo siguiente;

a) Las recomendaciones de esta norma los materiales, extensiones y dimensiones de terminales aéreas, conductores de bajada terminales a tierra componentes de equipotencialidad, etc. puestos como en esta norma deben ser adheridos por completo e independientemente de cualquier dispositivo o sistema empleado que digan proporcionar protección reforzada.
b) Un pararrayos es incapaz de descargar un nubarrón sin el golpe de un rayo. Su función es desviar a sí mismo una descarga de rayo que pudiera golpear una parte vulnerable de la estructura a ser protegida y llevar la corriente de manera segura a tierra. El rango sobre el cual un pararrayos puede atraer la descarga del rayo no es constante pero es conocido como función de la severidad de la descarga.

El primer punto de la norma británica señala que si se desea emplear cualquier dispositivo que proporcione protección reforzada, entiéndase por estos los sistemas ESE o CTS, se tiene que cumplir con la totalidad de las recomendaciones enunciadas en esta norma.

El segundo punto relativo a la función de un pararrayos deja claro que los sistemas de transferencia de carga no cumplen con la definición de pararrayos como un sistema de protección contra tormentas eléctricas.

Dentro de los alcances de la norma británica se encuentran el tipo de estructuras a las cuales son aplicables las recomendaciones de esta norma, que son las siguientes.

- Bodegas de explosivos.
- Estructuras temporales.
- Grúas.
- Graderías de espectadores construidos de metal de andamiaje.
- Edificios públicos.
- Instalaciones de radio y televisión.
- Árboles y estructuras cercanas a árboles.
- Estadios deportivos.
- Molinos de viento.

Fuera de los alcances de esta la norma Británica están los siguientes casos:

- Estaciones de radares.
- Líneas telefónicas.
- Tracción eléctrica y líneas de poder. en BSI 6651

5.4.2 Métodos de protección utilizados en BSI 6651.

Los métodos de protección en los cuales se apoya la norma Británica para diseñar un sistema de protección contra rayos son el ángulo de protección y el método de la esfera rodante. El ángulo de protección es tomado como método principal, dejando el método de la esfera rodante para aplicaciones como estructuras de más de 20 m de altura y de geometría compleja.

5.4.2.1 Método del cono de protección en BSI 6651.

Para el diseño de un sistema de protección contra rayos mediante el cono de protección la norma británica tiene las siguientes consideraciones.

- La zona de protección de un conductor vertical o estructuras que no excedan los 20 m de altura se define como un cono de

protección con su cúspide en la punta del conductor y en su base sobre el nivel de tierra

- Para un conductor horizontal la zona ha sido definida como el volumen generado por un cono con su cúspide en la punta del conductor horizontal moviéndose desde el principio hasta el final del mismo.

Los ángulos de protección utilizados en la norma británica para estructuras ordinarias hasta de 20 m de altura son:

Para una sola terminal aérea horizontal o vertical el ángulo de protección es considerado 45°.

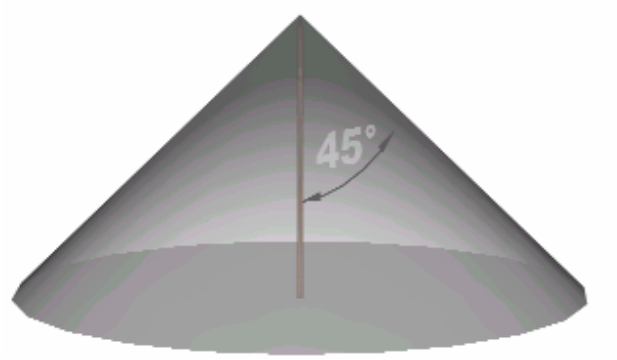


Figura 5.8. Ángulo de protección para una termínala aérea sencilla.

Para dos o más terminales aéreas separadas a no más de dos veces la altura de una de ellas, el ángulo de protección entre dos terminales aéreas puede ser tomado como 60°.

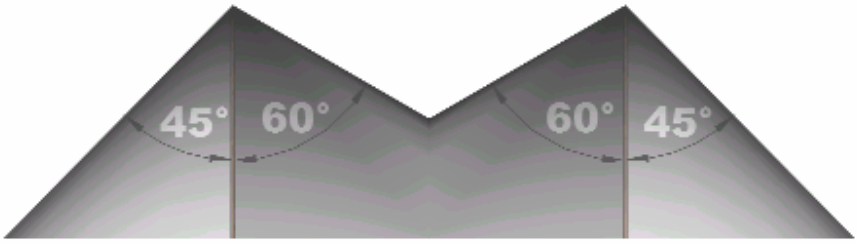


Figura 5.9 Ángulo de protección para dos a mas terminales aéreas.

Para estructuras con explosivos o contenido altamente inflamable el método de protección utilizado sigue siendo el cono de protección, pero las terminales aéreas

utilizadas en este caso son conductores horizontales suspendidos sobre la estructura a proteger, estos conductores o terminales aéreas encierran la estructura a ser protegida como se muestra en la figura 5.10

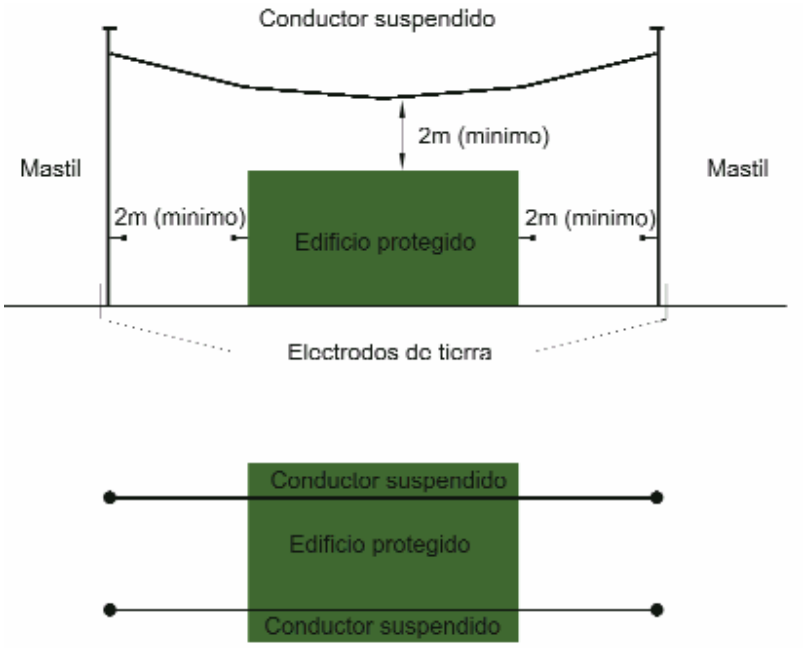


Figura 5.10. Disposición de los conductores verticales para una estructura de alto riesgo

En estos casos, en el que el contenido representa un peligro requiriendo un ángulo de protección más agudo, el ángulo de protección dentro del espacio contenido entre los conductores verticales es de 45°, y 30 fuera del espacio entre conductores como se observa en la figura 5.11.

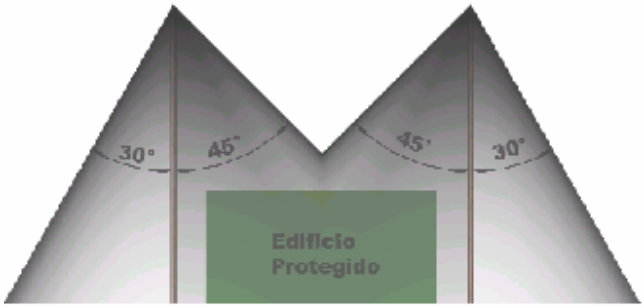


Figura 5.11. Ángulo de protección utilizado para estructuras de alto riesgo.

Es importante señalar que la norma británica permite utilizar un cono de protección igual con un ángulo entre terminales aéreas de 60° en casos en los cuales el costo

del método es injustificado y ningún riesgo seria involucrado en descargas de corriente de rayo fuera de la superficie de la estructura a ser protegida.

5.4.2.2 Método de la esfera rodante en BSI 6651.

El método de la esfera rodante es descrito en el apéndice A5 de la norma Británica para identificar partes no protegidas de estructuras altas o de compleja geometría. En el apéndice A5 el método de esfera rodante es descrito en cuanto a su justificación, y es recomendado para proteger estructuras de más de 20 m y se recomienda utilizar una esfera de 60 m, pero para estructuras que contengan explosivos o contenidos altamente inflamables una esfera de 20 m debe ser usada.

Con relación a la utilización del método de la esfera rodante la norma Británica en su apéndice B aclara lo siguiente;

El comité considera que la información técnica básica de los dos métodos de protección (ángulo de protección y esfera rodante), son totalmente diferentes y comparar resultados no debe ser necesario. Los factores técnicos envueltos en el diseño de sistemas de protección contra el rayo son tomados en cuenta de mayor manera en el método de la esfera rodante, pero ha habido muchas experiencias practicas exitosas con el método del ángulo de protección el cual es mucho más fácil de aplicar.

Del texto anterior extraído de la norma Británica, se entiende que la razón principal por la cual es mas utilizado el método del ángulo de protección en esta norma es la sencillez de aplicación y los resultados satisfactorios que ha mostrado en la práctica, reconociendo la solidez técnica del método de la esfera rodante.

5.4.3 Análisis de riesgo y necesidad de protección en BSI 6651.

La norma Británica da mucho peso a su análisis de riesgo para determinar si es necesario o no un sistema de protección contra rayos, para determinar si es necesario un sistema de protección contra rayos la norma Británica

Estructuras con inherente riesgo de exposición, fábricas de explosivos, tiendas y vertederos y tanque de combustible usualmente necesitan el más alto nivel de protección posible.

En muchos casos, la necesidad de protección puede ser evidente en sí misma por ejemplo.

a) Donde hay un gran numero de personas congregadas.
b) Donde servicios públicos esenciales son involucrados.
c) Donde el área es una en donde los rayos son predominantes.
d) Donde exista una estructura muy alta o aislada.
e) Donde existan estructuras de importancia histórica y cultural.
f) Donde se ubiquen estructuras que contengan explosivos o contenido inflamable.

Sin embargo, hay muchos casos para los que no es tan fácil tomar la decisión. En estos casos la norma Británica recomienda el siguiente análisis de riesgo. El análisis de riesgo recomendado en esta norma no es muy diferente al de la norma NFPA 780 y la IEC 61024, y es calculado de la siguiente forma.

El área de colección efectiva de una estructura es el área del plano de la estructura extendida en todas direcciones para tomar la cuenta de su altura. Se calcula mediante la siguiente formula.

$$A_C = LW + 2H + 2WH + \pi H^2 \qquad 5.5$$

Donde

L es la el largo de la estructura.

H es la altura de la estructura.

W es el ancho de la estructura.

Ya determinada esta aérea se calcula el numero probable de golpes de rayo a la estructura por año P como se muestra en la formula 5.6.

$$P = A_c \times N_g \times 10^{-6} \qquad 5.6$$

Donde.

N_g es el número de rayos a tierra por año por kilómetro cuadrado.

Para saber si es necesario un sistema de protección contra rayos el valor de P debe ser multiplicado por los factores de forma contenidos en la norma Británica.

Si el valor P es mayor o igual que 1×10^{-4} un sistema de protección contra rayos debe ser instalado.

5.5 Norma Australiana y Nueva Zelanda NZS/AS 1768-1991.

La norma australiana tiene una gran aceptación alrededor del mundo dado que el territorio de Nueva Zelanda y Australia tiene gran actividad de rayos a tierra. La norma Australiana NZS/AS 1768-1991 se apoya en el método de la esfera rodante para el diseño de un sistema de protección contra rayos.

5.5.1. Alcances y definiciones.

Esta norma dentro de sus alcances marca las pautas para la protección de personas y propiedades de los riesgos de daño por la exposición al rayo. Las recomendaciones cubren específicamente las siguientes aplicaciones.

a) La protección de personas en dos campos, por el riesgo de un golpe directo de rayo, y en interiores donde el riesgo indirecto es consecuencia de las corrientes de rayo conducidas dentro del edificio.

b) La protección de una variedad de edificios o estructuras, incluyendo aquellas con contenidos altamente inflamables o explosivos y minas.

c) La protección de equipo electrónico sensible (máquinas de fax, módems, computadoras) de sobrevoltaje resultante de un golpe de rayos a un edificio o a estos servicios asociados.

La norma Australiana 1768-1991 dice que el cumplimiento de las recomendaciones no previene necesariamente el daño o lesiones personales debidas a un rayo, pero puede reducir la probabilidad que dicha lesión o daño ocurra.

La norma australiana define a la terminal aérea de la siguiente manera.

*Terminal aérea***.** Es un conductor o vara de un sistema de protección contra rayos, posicionado para interceptar una descarga de rayo, la cual establecen una zona de protección.

Red de terminales aéreas. Una red de terminales aéreas y conductores interconectados que forman parte del sistema de protección contra rayos que intenta la intercepción de una descarga de rayo.

Estas dos definiciones son de gran importancia ya que ambos conceptos forman parte del sistema de protección convencional. Y en ningún momento esta norma permite la utilización de otro tipo de productos como pueden ser los ESE o los CTS.

5.5.2. Métodos de protección utilizados en la norma Australiana.

La norma australiana utiliza el método de la esfera rodante como método de diseño de un sistema de protección contra rayos. Esta norma también considera el método de protección de volumen de colección.

5.5.2.1. Método de la esfera rodante en NZS/AS 1768-1991.

Esta norma ha seleccionado una esfera de 45 m de radio para proporcionar un alto grado de protección a edificios convencionales como una protección estándar, y una esfera de menor radio puede utilizarse para establecer zonas de protección donde se desea un alto grado de protección.

Debido a que el riesgo se incrementa en estructuras que contienen materiales explosivos a altamente inflamables, el radio de protección de la esfera rodante recomendado es de 20 m.

La norma Australiana en su anexo A7 puntualiza que cuando se diseña un sistema de protección contra rayos con un radio mayor se obtiene una protección contra corrientes de rayo más pequeñas, dicho en otras palabras una protección estándar con un radio de protección de 45m tiene una probabilidad del 7% de que

sea vulnerable al rayo, mientras que si la misma estructura es protegida con un SPC basado en una esfera rodante de 20m tiene una probabilidad menor al 1% de ser vulnerable al rayo.

5.5.2.1 Zona de protección.

La norma australiana establece zonas de protección formadas por terminales aéreas sobre partes elevadas de las estructuras, y que deben ser determinadas teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

a) Las terminales aéreas que no excedan 45 m de altura sobre el piso son consideradas a proteger secciones más bajas de la estructura encerradas bajo un arco de 45 m de radio y donde el arco toca el punto más alto del edificio y es tangencial al piso, véase figura 5.12.

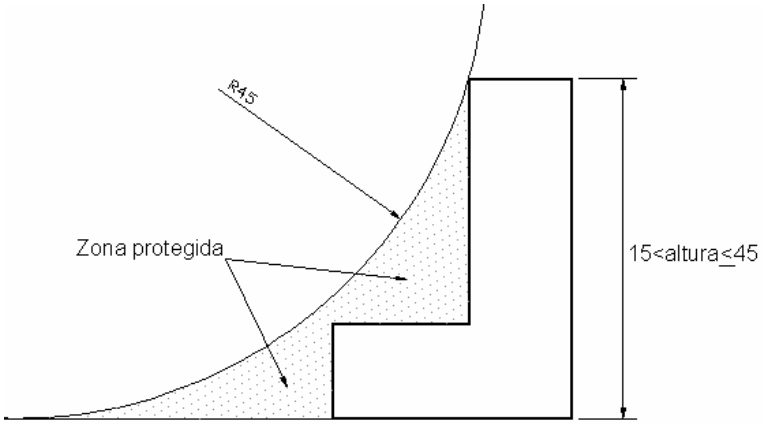


Figura 5.12

b) Terminales aéreas o estructuras que excedan los 45 m de altura son consideradas para proteger solo aquellas secciones de la estructura que queden en el espacio bajo un arco de 45 m de radio que es tangente a la terminal aérea o el lugar del edificio y la tierra como se muestra en la figura 5.13.

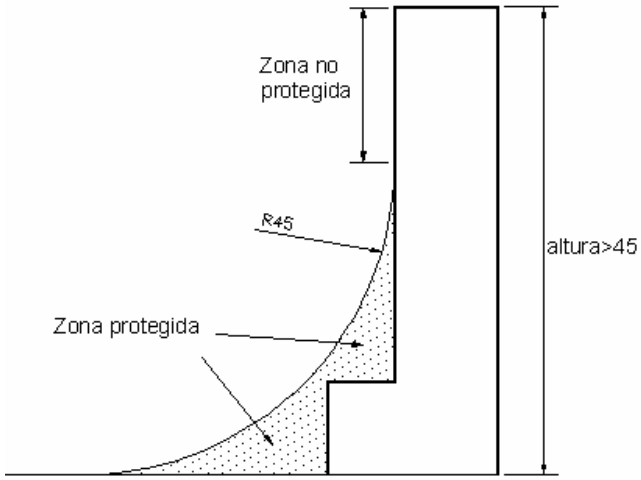


Figura 5.13

La distancia horizontal que puede proteger una terminal aérea se puede determinar analíticamente. Terminales aéreas de altura h sobre un techo o plano horizontal son consideradas para proteger puntos sobre el plano arriba de una distancia horizontal r, desde una terminal aérea horizontal o a un radio horizontal r desde una terminal aérea, donde r está dado por la formula 5.7.

$$r = \sqrt{90h - h^2} \qquad 5.7$$

La norma australiana resume en una tabla la distancia horizontal que protege una terminal aérea de altura h, y el máximo espaciamiento que debe existir en un arreglo de terminales aéreas de altura h.

Altura de la terminal aérea h	**Distancia horizontal para la cual el techo esta protegido, r.**	**Máxima distancia de espaciamiento del arreglo. d**
0.5	6.7	9.5
1.0	9.4	13.3
2.0	13.3	18.8
4.0	18.5	26.2
8.0	25.6	36.2

Tabla 5.5

Un simple arreglo de terminales aérea verticales espaciadas a una distancia d metros desde la terminal aérea más cercana sobre el techo o plano horizontal es considerada para proteger el espacio dentro el limite del arreglo siempre que $d \leq r\sqrt{2}$.

5.5.2.2 Volumen de colección.

El método de volumen de colección es tratado dentro de la norma Australiana solamente con carácter informativo, ya que este método esta basado en el trabajo del Dr. A J Eriksson. Este trabajo esta apoyado en una serie de observaciones de golpes de rayo a estructuras altas y delgadas, por lo tanto este método puede ser valido para estructuras de este tipo. La norma Australiana deja a consideración del diseñador del sistema de protección contra rayos este método de protección, pero no recomienda su aplicación sin antes se realice una fuerte investigación y confirmación del mismo.

5.5.2.2.1 Bases teóricas del método de volumen de colección.

El método de volumen de colección esta basado en asignar un nivel de protección de acuerdo a un riesgo estimado al cual le corresponde un nivel de corriente de rayo de retorno. De tal modo que para cada pico de corriente tenemos una correspondiente longitud del último paso de la descarga y el porcentaje de rayos a tierra que exceden el valor de corriente asignado, como se muestra en la tabla 5.6.

Corriente pico. kA	**Ultimo paso de la descarga correspondiente m**	**Porcentaje de rayos a tierra que exceden el valor establecido %**
6.5	34	98
8	39	96
10	45	93
16	61	88

Tabla 5.6

Como se muestra en la figura 5.14, se puede trazar una superficie esférica sobre una estructura aislada y aterrizada, esta superficie esférica con centro en la punta de la estructura tiene un radio igual al último paso de la descarga para la corriente seleccionada, a una corriente de pico mayor corresponde una longitud mayor al último paso de la descarga.

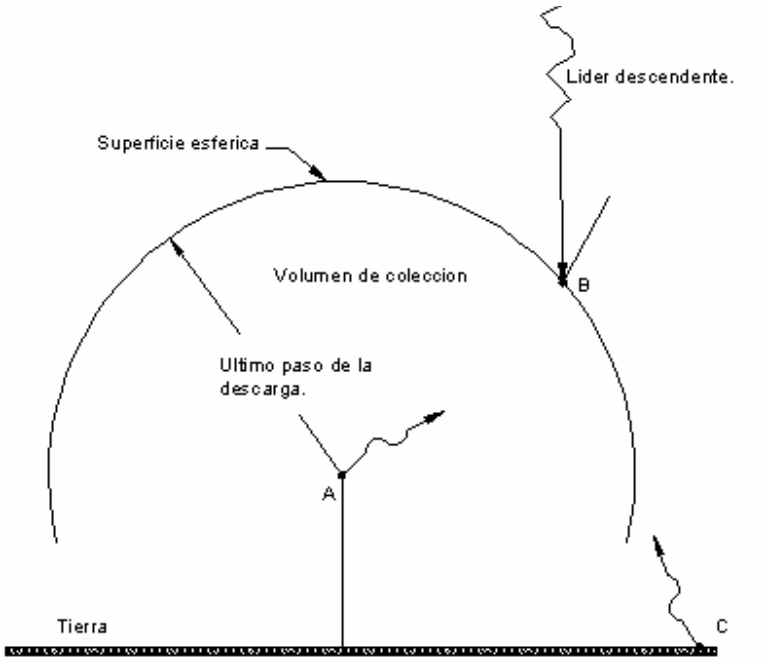


Figura 5.14

Un lugar geométrico de igual probabilidad se puede dibujar para interceptar a la superficie esférica, este lugar geométrico representa todos los posibles puntos en la punta del líder descendente que tiene la misma probabilidad de que la descarga termine en el punto A, o los puntos aterrizados C, como se muestra en la figura 5.15.

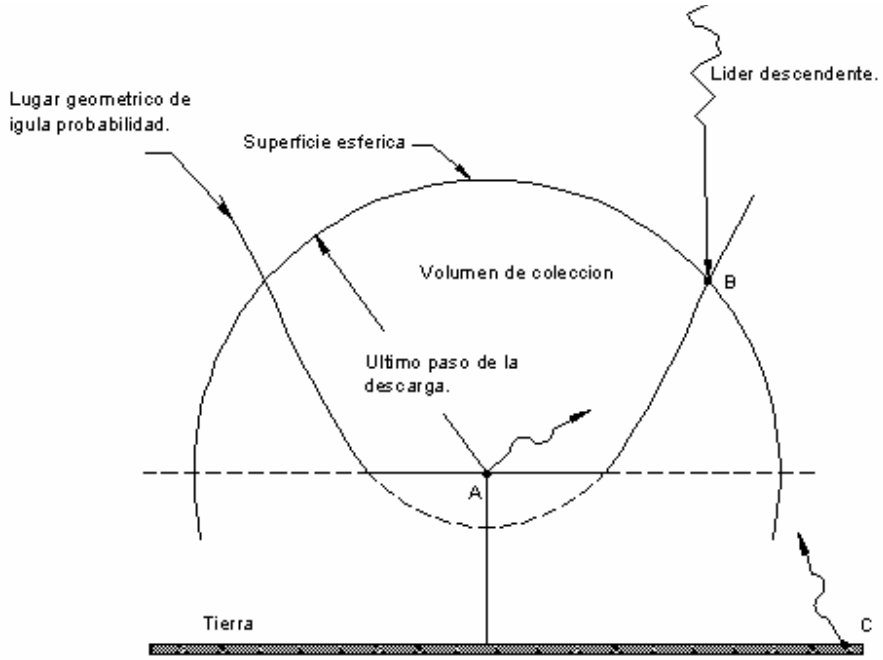


Figura 5.15

Estos puntos en el espacio dependen de la velocidad del líder ascendente y descendente, así el lugar geométrico de igual probabilidad forma una superficie de revolución sobre una línea vertical a través del punto A.

El volumen de colección para el punto A es el volumen encerrado entre el lugar geométrico de igual probabilidad y la superficie esférica y así el líder descendente entrante al volumen de colección asegura una alta probabilidad de que la descarga terminara en el punto A. La forma y el tamaño del volumen de colección dependen de la altura de la estructura sobre el nivel de piso, el probable primer pico de corriente de rayo de retorno y a la velocidad del líder. El tamaño del volumen de colección también depende de la altitud del sitio, así como del último paso de la descarga.

La velocidad del líder ascendente hacia el líder descendente es en ocasiones asumida por simplificación a ser la unidad. Si esto es asumido también la probabilidad de descargas desde la punta del líder B terminen sobre el punto A o C depende sólo de la distancia BA y BC, entonces el lugar geométrico de igual probabilidad tiene una forma parabólica como es mostrado en la figura 5.15. El

lugar geométrico de igual probabilidad es ajustado sobre la estructura, y desatiende a las alturas menores que la cima de estructura.

La figura 5.16 muestra el radio atractivo definido como una proyección vertical, AD, bajo el punto de intersección B, de la superficie esférica definida por el último paso de la descarga, y el lugar geométrico de igual probabilidad. El área circular definida por el radio atractivo es el área atractiva del punto A. Cualquier líder descendente progresando verticalmente hacia el área atractiva resultara en el punto A. El área a nivel de piso debajo del área atractiva será protegida de golpes de rayo que tengan un pico de corriente mayor o igual que el pico de corriente seleccionado, pero podría ser golpeado por una corriente de descarga más baja.

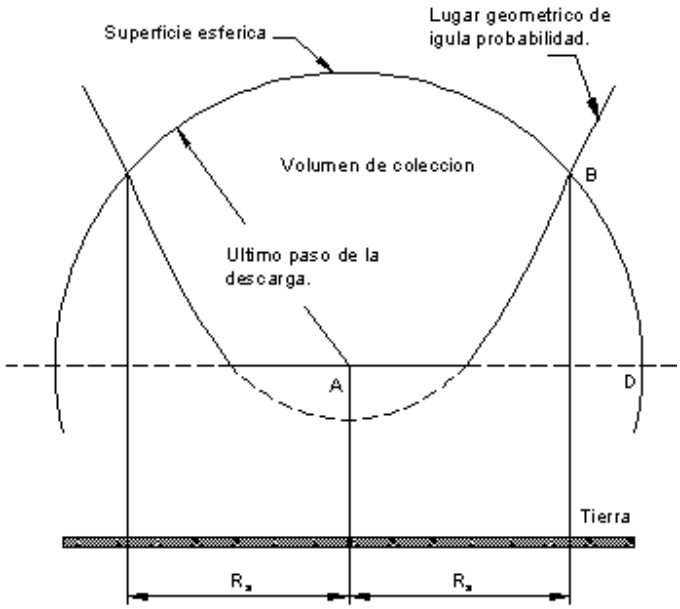


Figura 5.16

La norma Australiana da dos graficas para determinar el radio atractivo a varias elevaciones. Este radio atractivo es aplicado en los bordes superiores y exteriores de las estructuras altas y delgadas para identificar los puntos preferentes en donde es posible que golpee el rayo.

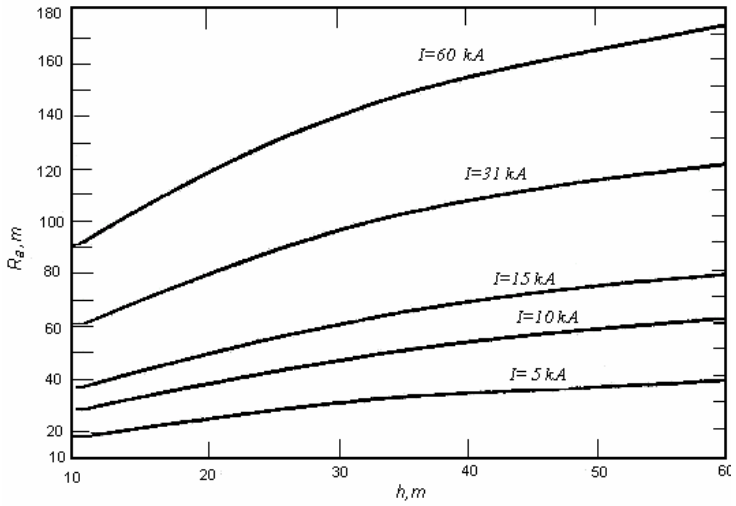


Figura 5.17. Radio atractivo Ra de una estructura de altura h para valores constantes de corriente de rayo de retorno.

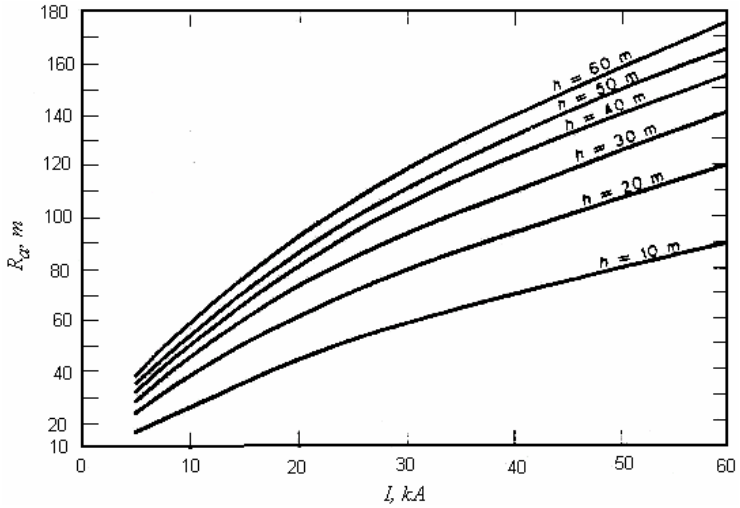


Figura 5.17 Radio atractivo Ra de una estructura con corrientes de rayo de retorno I para valores constantes de altura de la estructura.

6. Conclusiones.

El estudio del fenómeno del rayo ha tenido un avance constante desde que Benjamín Franklin realizó el primer estudio serio de este fenómeno, como consecuencia de este trabajo se determinó el sistema de protección convencional (SPC) el cual es usado hasta ahora.

El estudio del rayo ha pasado de ser considerado un ente divino a un fenómeno de naturaleza eléctrica, el cual puede ocasionar daños a inmuebles y lesiones graves a personas incluso la muerte. De tal modo que, para brindar una protección eficaz, es necesario conocer la fenomenologia del rayo ampliamente.

Los principios de protección contra tormentas eléctricas toma en cuenta, etapas y parámetros de la fenomenología del rayo para el diseño de un sistema de protección contra tormentas eléctricas como lo son el último paso del descarga, corriente de rayo de retorno y la intensidad de campo eléctrico que es inducida por el líder escalonado descendente. Estos parámetros son los conceptos teóricos más importantes que debemos tomar en cuenta para entender el funcionamiento de un sistema o método de protección contra tormentas eléctricas.

De la revisión hecha a los nuevos productos desarrollados para la protección contra tormentas eléctricas se tienen las siguientes conclusiones.

Es difícil concebir la idea y satisfacer los requerimientos electrostáticos para eliminar la formación de un rayo y por esta razón los sistemas de transferencia de carga o CTS carecen de una teoría contundente que justifique su funcionamiento. Como se mencionó en el capitulo 4, la cantidad de puntos necesarios en las series de dispersión (según sus propias expresiones analíticas) es muy grande, y aún teniendo el número de puntos necesarios no se tiene la corriente suficiente para crear la nube de carga positiva para evitar que el rayo golpee la estructura o edificio. De hecho la cantidad de corriente generada por una serie dispersión no es más grande que la generada por un electrodo Franklin.

La promesa de no ser golpeados por un rayo es muy tentadora para los dueños de instalaciones que contiene materiales inflamables, ya que ante la

generación de una chispa se puede iniciar fuego, los fabricantes de estos dispositivos en muchos casos han tomado ventaja de esta promesa y de la naturaleza estocástica del rayo, es decir ellos afirman que después de ser colocados sus productos en una instalación especifica las estructuras o inmuebles protegidos con un CTS no serán golpeadas por un rayo, pero seria de gran ayuda saber el número de veces que la estructura fue golpeada por un rayo antes de la instalación del CTS y así tener las herramientas para la evaluación dichos productos.

Los sistemas de emisión temprana o ESE, tienen mucha similitud en sus bases teóricas con un electrodo Franklin, la diferencia existente radica en la iniciación mas rápida de un líder ascendente que intercepte al líder descendente. Sin embargo existe controversia referente si el campo eléctrico ambiental es lo suficiente fuerte para sostener al líder ascendente y éste no se extinga antes de interceptarse con el líder descendente.

Los fabricantes de los dispositivos ESE no han podido demostrar que la emisión temprana de streamer se traduzca en un incremento de los radios de protección. En general la evaluación de los dispositivos ESE se ha enfocado en demostrar la emisión temprana, pero han dejado a un lado la efectividad de los dispositivos para interceptar la líder descendente.

La superioridad de los dispositivos ESE no ha podido ser demostrada con respecto a un electrodo Franklin en situaciones reales, los radios de protección para los dispositivos ESE son muy optimistas lo cual representa un riesgo mayor de recibir un golpe directo de rayo en la estructura protegida.

Nivel de protección	Sistema de protección a utilizar	Emision temprana 25 µs	40 µs	60 µs
I	SPC	Radio de 20m	Radio de 20m	Radio de 20m
	ESE	Radio de 42m	Radio de 56m	Radio de 79m
II	SPC	Radio de 30 m	Radio de 30 m	Radio de 30 m
	ESE	Radio de 57m	Radio de 75m	Radio de 97 m
III	SPC	Radio de 45 m	Radio de 45 m	Radio de 45 m
	ESE	Radio de 65 m	Radio de 84m	Radio de 107m

Tabla 6.1

Como se muestra en la tabla 6.1, los radios de protección para un dispositivo ESE son muy superiores a los de una punta Franklin, estos radios de protección

mayores no se pueden traducir en una protección confiable hasta que se demuestre en condiciones reales y con un estudio estadístico que los radios de protección son realmente los ofrecen los fabricantes de estos productos.

El sistema de protección convencional tiene más de 250 años aplicándose a nivel mundial, con una dinámica de mejora en su criterio de protección, con base en la experimentación y conocimiento de la física de la descarga en los tiempos modernos. Las limitaciones encontradas en el pasado han servido a los científicos y diseñadores para mejorar el sistema convencional con bases científicas y obligar a realizar nuevos estudios para definir una zona de protección más eficiente y así evitar fallas de blindaje que pueda generar condiciones de alto riesgo.

Los métodos de protección mas utilizados en las normas de protección contra tormentas eléctricas son esfera rodante y el cono de protección, aunque estos dos métodos fueron diferentes en su bases teóricas en los principios de la práctica de protección, actualmente el método de cono de protección tiene como base teórica el segmento de arco del método de la esfera rodante. Ambos son los que ofrecen mayor confianza, ya que ambos métodos son herramientas de diseño del sistema de protección convencional. La aplicación de ambos métodos es limitada por un análisis de riesgo como se indica en la IEC 61024, o por la altura de la estructura o el contenido de la misma como en la NFPA 780, la BS 6651 y *NZS/AS 1768*. El método de la esfera rodante es el que tiene un campo de aplicación más grande, dada la mayor relación que tiene con la fenomenología del rayo en sus bases teóricas y su facilidad de aplicación.

Los sistemas de protección contra tormentas eléctricas al igual que todos los sistemas de protección representan un asunto delicado que no se puede tomar a la ligera ya que esta involucrada la seguridad de las personas y la protección de equipos y estructuras. Debido a la naturaleza estocástica del rayo las experiencias de campo son muy importantes, visto desde este punto de vista el SPC tiene un gran margen de seguridad respecto a los nuevos productos ya que tiene mas de 250 años aplicándose y corrigiendo errores de instalación y depurando sus bases técnicas y científicas. La utilización de una norma nos brinda recomendaciones

basadas en datos técnicos y físicos, pero la principal ventaja de utilizar una norma es que ofrece la retroalimentación de la experiencia de casos prácticos, de tal forma que los productos como lo son los CTS no cuentan con el respaldo de alguna norma que ampare a estos productos, y si a esto sumamos el poco tiempo que tienen en el mercado y las lagunas existentes en sus bases teóricas, no existen razones de peso para recomendar su instalación para la protección contra tormentas eléctricas.

Referente a los ESE las ventajas que dicen tener sobre el SPC no están comprobadas al 100%, es decir aun no esta comprobado que una emisión temprana de streamer se traduzca en un radio de protección mas grande. Aunque estos productos tiene su propia normatividad, esta debe ser revisada y en su caso reducir los radios de protección, esto no quiere decir que la utilización de este tipo de productos deba ser prohibida, pero si restringir su utilización y no colocarlos en instalaciones que contengan materiales inflamables o gases que puedan iniciar fuego.

Finalmente, debido a la importancia en la aplicación de las normas relevantes para la protección de instalaciones contra el efecto de las tormentas eléctricas, a continuación se indican algunas características importantes de dichas normas:

NFPA 780. Esta norma de protección utiliza únicamente el sistema de protección convencional, las terminales aéreas utilizadas son los electrodos Franklin y las recomendaciones de esta norma no son aplicables a otro tipo de productos como lo puede ser los CTS o ESE. Es muy importante señalar que las recomendaciones de NFPA 780 no se pueden aplicar para el diseño de un CTS, como lo afirma los fabricantes de estos dispositivos. Los métodos de protección utilizados en NFPA 780 son el método de cono de protección y esfera rodante.

El método de cono de protección se limita a estructuras ordinarias menores de 15.24 metros de altura siendo 63º el ángulo de protección más optimista y de 45º y el más conservador.

El método de esfera rodante se aplica para estructuras ordinarias, estructuras que contienen vapores inflamables, gases inflamables, o líquidos que pueden emitir vapores inflamables y embarcaciones. Utiliza solamente los radios de protección de 45m y 30m tanto para cables aéreos y electrodos franklin.

IEC 61024. La norma de la comisión electrotécnica internacional contempla como sistema de protección únicamente al sistema de protección convencional. Y dentro de su introducción y definiciones no incluye a los CTS o ESE.

Los métodos de protección utilizados en la norma IEC 61024 son el método de cono de protección, el método de la esfera rodante y el método de la jaula faraday o método de la malla. La utilización de estos métodos de protección esta condicionado al nivel de protección seleccionado, de tal modo que el método del cono de protección es el método más limitado, y el método mas utilizado es el de la esfera rodante como se muestra en la tabla 5.2 del capitulo 5. La elección del nivel de protección esta determinado por el análisis riego descrito en la IEC 61024-1 que juega un papel muy importante dentro de esta norma.

Norma del instituto americano del petróleo. La norma API describe los sistemas de protección convencional, ESE y CTS, pero se remite a las recomendaciones de NFPA para el diseño de un sistema de protección contra tormentas eléctricas. El hecho de describir los métodos de protección CTS y ESE no quiere decir que recomiende la instalación de estos productos. La norma de API debe ser mas especifica en este aspecto ya que varios fabricantes de CTS y de ESE aprovechan lo breve que es la norma de API en su anexo 3 para decir que sus productos cuentan con el respaldo de esta norma.

BS 6651. La norma Británica utiliza como principal método de protección el método de cono de protección y recomienda la utilización de la esfera rodante para estructuras de geometría compleja y estructuras de más de 20m de altura, y no contempla la utilización de los ESE o CTS, pero si se desea utilizar cualquier dispositivo que proporcione protección reforzada se tiene que cumplir con la

totalidad de las recomendaciones dentro de esta norma, pero los sistemas de transferencia de carga no entran dentro de la definición de pararrayo de esta norma. La norma Británica utiliza ángulos de protección que van de los 30º a los 60º, el ángulo de protección de 60º solo se utiliza entre dos terminales aéreas o mástiles paralelos, el ángulo de protección más utilizado para estructuras menores a 20m es de 45º. Para estructuras con explosivos o contenido altamente inflamable se utilizan conductores horizontales, pero el ángulo de protección baja a 30º y 45º entre dos terminales aéreas o conductores verticales.

La norma británica utiliza principalmente el método de cono de protección por el buen resultado que ha mostrado tener en aplicaciones prácticas y la sencillez de aplicación, pero considera que el método de esfera rodante tiene mejores bases teóricas.

Norma Australiana y Nueva Zelanda NZS/AS 1768-1991. La norma australiana considera dos métodos de protección que son el método de esfera rodante y le método de volumen de colección, pero el método de esfera rodante es el único dentro de esta norma para el cual se dan recomendaciones de instalación y diseño, ya que el método de volumen de colección que se expone en el apéndice A solo con carácter de informativo. Para el método de esfera rodante se considera un radio de esfera rodante de 45 m como una protección estándar y para estructuras que contienen materiales explosivos o altamente inflamables recomienda la utilización de un una esfera de 20m de radio.

La norma Australiana no considera la utilización de productos como lo son los ESE y los CTS, existen fabricantes de dispositivos ionizantes que afirman que sus productos se pueden utilizar conforme a la norma australiana utilizando el método de volumen de colección, pero la norma Australiana no recomienda su aplicación sin antes se realice una fuerte investigación y confirmación de este método.

Finalmente en la tabla 6.2 se resumen los métodos utilizados en las normas revisadas en este trabajo.

Nivel de protección	Eficiencia	NFPA 780	IEC 61024	API	BSI 6651	NZA7AS 1768-1991
I	0.98		Esfera rodante Radio de 20 m Estructuras complejas Cono de protección Ángulo de 25º Estructuras convencionales		Esfera rodante Radio de 20 m Estructuras que contienen explosivos Cono de protección Ángulo de 30º y 45º Estructuras que contienen explosivos	Esfera rodante Radio de 20 m Edificios con contenido inflamable
II	0.95	Esfera rodante Radio de 30 m Estructuras que contiene vapores inflamables	Esfera rodante Radio de 30 m Estructuras complejas Cono de protección Ángulo de 25º a 35º Estructuras convencionales	Esfera rodante Radio de 30 m Estructuras que contiene vapores inflamables		
III	0.90	Esfera rodante Radio de 45 m Estructuras convencionales Cono de protección Ángulo de 45º Estructuras convencionales	Esfera rodante Radio de 45 m Estructuras complejas Cono de protección Ángulo de 35º a 45º Estructuras convencionales	Esfera rodante Radio de 45 m Estructuras convencionales Cono de protección Ángulo de 45º Estructuras convencionales		Esfera rodante Radio de 45 m Edificios convencionales
IV	0.80	Cono de protección Ángulo 60º Estructuras convencionales	Esfera rodante Radio de 60 m Estructuras complejas Cono de protección. Ángulo de 25º a 55º Estructuras convencionales	Cono de protección Ángulo 60º Estructuras convencionales	Esfera rodante Radio de 60 m Estructuras de más de 20m de altura Cono de protección Ángulo de 45º y 60º Estructuras ordinarias de hasta 20 m de altura	

Tabla 6.2. Tabla comparativa de los métodos utilizado en las normas revisadas

Bibliografía

Referencias.

[1] Erickson Jon. Las tormentas, de las antiguas creencias a la moderna meteorología. Mac graw Hill. España. 1a edición.

[2] Arturo Carrillo Sánchez, Alejandra Sánchez Trejo. Breviario de terminos climatológicos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán 2002.

[3] Arturo Galván Diego, Raúl Velásquez Sánchez. Protección contra el efecto de las tormentas eléctricas de estructuras y edificios: conceptos básicos, evolución y aplicación en México. Boletín IIE, septiembre-octubre del 2001

[4] Roy B. Carpenter, Jr and Mark N. Drabkin. Ligthning strike protection. *Lightning Eliminators & Consultants, Inc. Colorado USA.*

[5] Ramos Vivanco Serafín. Tesis profesional licenciatura. Análisis de los efectos de acoplamiento electromagnético entre las descargas atmosféricas y los elementos que constituyen una antena receptora en instalaciones de comunicaciones. Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba Veracruz, México 1993.

[6] Galván Diego Arturo Curso “Protección contra descargas eléctricas atmosféricas de edificios, estructuras e instalaciones especiales”. Capitulo 6. Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca México.

[7] John M Tobias. The basis of conventional lightning protection systems. IEEE, paper No. PCIC- 2003-4.

[8] T Horvát. Rolling sphere. Theory and application international conference on lightning protection. Rodas Grecia 2000.

[9] William Rison. There is not magic to lightning protection: charge transfer systems do not prevent lightning stroke. New Mexico institute of mining and technology. Socorro New Mexico.

[10] Abdul M. Mousa. Validity of the lightning elimination claim. Fellow IEEE. Canada.

[11] Mark M. Drabkin. Protection zone of charge transfer system. Lightning eliminators and consultants, Inc boulder USA.

[12] R.J. Van Brunt, T.L. Nelson and K.L. Nelson Stricklett. Early streamer emission lightning protection system an overview. Electrical insulation magazine. January/February 2000.

[13] Correlation Between ground Flash density and thunderstorm day in México. Arturo Galvan Diego. IEE, Cuernavaca México.

Bibliografía.

I. Roy B. Carpenter, Jr.Mark N. Drabkin, “Lightning Strike Protection”, Lightning Eliminators & Consultants, Inc. Colorado USA.

II. Roy B. Carpenter, Jr. “A Hybrid Lightning Strike Protection System That Satisfies The Standards And Reduces The Overall Risk” Lightning Eliminators & Consultants, Inc. Boulder, Colorado, USA.

III. Vladimir A, Rakov and Martín A Uman. Lightning Phisics and efects. Departament of electrical and computer engineering. University Florida. United Kingdom, Cambridge University press 2003.

IV. Abdul M. Mousa. The Applicability Lightning Elimination Devices to Substations and Power Lines,. Fellow, IEEE. BC Hydro Burnaby. Paper V3N 4X8.

V. Donald W. Zipse. Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 37, NO. 2, MARCH/APRIL 2001

VI. Z. A. Hartono. A review of the ICOLSE 2003 abstract “Analysis of the effectiveness of Charge Transfer System intended for lightning prevention using lightning detection system, lightning video system and Rogowski coils”. Lightning Research S/B, Kuala Lumpur, Malaysia. January 2004.

VII. Abdul M. Mousa. A Standard For Lightning Elimination Devices? Fellow IEEE. Burnaby, BC, Canada V3N 4X8. JANUARY 7, 2003

VIII. Abdul M. Mousa. Failures Of Lightning Elimination Decives. Fellow IEEE. Burnaby, BC, Canada V3N 4X8. JANUARY 4, 2003

IX. Z. A. Hartono. I. Robiah. A Study Of Non-Con Ventlonal Alr Termlnals And Stricken Points In A High Thunderstorm Region. Rhodes – Greece 2003

X. Lightning Research Malaysia. 25th International Conference on Lightning Protection. Rhodes – Greece 2003.

XI. P. GRUET. Study of Early Streamer Emission Lightning Conductors – ESE. National Institute of Industrial Environment and Risk Assessment. Francia 2001.

XII. Krystian Leonard Chrzan, Robert Marciniak. History of Lightning Protection in Poland. ILCP 2002. Cracow Poland.

XIII. Christian Bouquegneau. Lightning Phenomenology: ILCP 2002. Cracow Poland.

XIV. D´ Alessaandro. Franco. Fractal Nature of probabilistic model of lightning discharge. IEEE catalogue No: 01CH37239. Paper 99. 2001

XV. IEC 1024-1. Protection of Structures Against Lightning. General Principles. 1990.

XVI. IEC 1024-1-1. Protection of Structures Against Lightning. Part 1 General Principles Section 1: Guide A. Selection of protection levels for lightning Protection Systems. 1993.

XVII. IEC 61024-1-1. Protection of Structures Against Lightning. General Principles. Part 1-2 General Principles. Guide B. Design, Installation, Maintenance and Inspection of Lightning Protection System. 1998.

XVIII. National Fire Protection Association NFPA-780. Standard for the Installation of Lightning Protection Systems. 2000. .

XIX. British Standard Institution. BSI 6651. Code of practice of structures against lightning. 1992.

XX. American Petroleum Institute. Protection Against Ignition Arising Out of Static, Lightning and Stray Currents. 2003.

XXI. Australian Standard New Zealand Standard. NZS/AS 1768. Lightning Protection. 1991.

XXII. Golde R. H. Lightning Protection. Chemical Publishing. New York 1975.

XXIII. Golde R. H. Lightning Volume 2. Lightning Protection. Academic Press. London 1977.