

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**APANTALLAMIENTO NO CONVENCIONAL DE  
SUBESTACIONES ELECTRICAS**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
LUIS ALBERTO TORRES AMPUERO**

**PROMOCIÓN  
2007- II  
LIMA – PERÚ  
2014**

# **APANTALLAMIENTO NO CONVENCIONAL DE SUBESTACIONES ELECTRICAS**

Dedicado a mis queridos padres, a quien les debo todo en esta vida y mediante el presente trabajo expreso mi anhelo de querer cumplir sus metas como padre que son las mías como su hijo.

## **SUMARIO**

El presente informe de suficiencia plantea una alternativa para la protección de las subestaciones eléctricas contra las descargas atmosféricas directas, al que se le ha denominado Apantallamiento No Convencional, para la cual tomamos como referencia a la norma Francesa NFC 17-102, además se ha recopilado información de las normas NFPA 780, IEC 62305 y IEEE Std 998 (1996).

El informe de suficiencia se realizó mediante el análisis de la información recopilada y la experiencia de los Apantallamiento No Convencionales instalados los cuales actualmente se encuentran operando en el Perú satisfactoriamente.

## INDICE

PROLOGO .....	1
CAPITULO I .....	2
INTRODUCCION.....	2
1.1 Objetivo .....	3
1.2 Importancia o Justificación del Informe.....	3
1.3 Método de Trabajo .....	3
1.4 Estructura del Informe.....	3
CAPITULO II .....	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
2.1 Descripción del Problema .....	5
2.1.1 Problema Administrativos .....	5
2.1.2 Problemas Técnicos.....	5
CAPITULO III.....	6
MARCO TEORICO Y METODOLOGIA .....	6
3.1 El fenómeno del RAYO.....	6
3.1.1 Procesos de generación y separación de cargas en las nubes .....	6
3.1.2 Categorización del rayo .....	9
3.1.3 Proceso de formación del rayo.....	9
3.1.4 Descargas atmosféricas en el Perú.....	13
3.1.5 Incidencia de rayos a tierra ( $N_g$ ).....	14
3.1.6 Efectos de las descargas atmosféricas.....	14
3.2 Apantallamiento con Pararrayos CONVENCIONALES .....	16
3.2.1 Conceptos Fundamentales .....	16
3.2.2 Método de los ángulos fijos.....	18
3.2.3 Modelo Electrogeométrico (EMG).....	20
3.3 Apantallamiento NO CONVENCIONAL .....	22
3.3.1 Sistemas de Disipación o Transferencia de Carga CTS (Charge Transfer Systems).....	22
3.3.2 Dispositivos PDC (Pararrayo con Dispositivo de Cebado).....	26
CAPITULO IV .....	33
APLICACIÓN DE METODOLOGIA Y RESULTADOS.....	33
4.1 Objetivo.....	33
4.2 Introducción .....	33
4.3 Evaluación del Riesgo de Impacto en la Instalación.....	33

4.3.1	Determinación de Frecuencia esperada de Impactos Directos de Rayos ( $N_d$ ) y Frecuencia esperada de Tales Impactos ( $N_c$ ).....	33
4.3.2	Calculo de la Eficiencia de la Instalación (E).....	37
4.3.3	Nivel de Protección Requerido.....	37
4.4	Selección y Distribución del Pararrayos.....	38
4.4.1	Radio de Protección $R_p$ (m).....	38
4.4.2	Calculo del Radio de Protección $R_p$ (m).....	39
4.5	Radios de Protección de acuerdo al Fabricante.....	39
4.6	Plano de Apantallamiento de la Subestación Eléctrica.....	40
4.7	Presupuestos de Sistemas de Apantallamiento.....	41
4.8	Análisis de Resultados.....	43
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
	BIBLIOGRAFIA.....	46

## **PROLOGO**

El presente informe tiene como propósito mostrar, analizar, resolver y finalmente establecer una solución al problema de los apantallamientos de las subestaciones eléctricas, para cual se propondrá la utilización de Pararrayos NO CONVENCIONALES, con la finalidad de obtener mayores radios de protección en los apantallamientos de las subestaciones eléctricas.

Inicialmente se plantea el problema y los daños que causan la falta o mal dimensionamiento de los apantalladores de una subestación eléctrica.

Luego se describe el marco teórico y los conocimientos previos que requerimos para poder comprender el funcionamiento de los apantalladores de las subestaciones eléctricas, se muestra la etapa de la formación de los rayos, como operan los pararrayos convencionales y finalmente como operan los pararrayos no convencionales.

Adicionalmente se muestra en el último capítulo a través de un ejemplo de dimensionamiento de un pararrayo no convencional, su radio de cobertura, se compara con un pararrayo convencional y finalmente se estima un costo de un sistema de apantallamiento no convencional.

Finalmente se menciona las conclusiones, propuestas de mejoras al sistema de apantallamiento no convencional de subestaciones eléctricas.

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCION**

Se conoce como apantallamiento de una subestación al conjunto de elementos instalados con el objetivo principal de proteger los equipos y elementos de la subestación contra descargas atmosféricas directas (rayos). En este informe se desarrollara el Apantallamiento de la Subestación con Pararrayos No Convencionales.

La función del apantallamiento consiste en proteger a los equipos de la subestación contra descargas directas. El fenómeno de la descarga atmosférica es de carácter aleatorio. Todas las características del rayo son aleatorias. Por estas razones el efecto de las descargas debe expresarse en términos de probabilidades.

Un sistema de protección contra descargas atmosféricas está compuesto esencialmente por el sistema captor del impacto, el conductor de bajada y la conexión a tierra. El sistema captor del impacto o interceptor del rayo consiste en uno o más elementos metálicos previstos para recibir la descarga atmosférica de manera que el impacto no se produzca en partes vulnerables de la Subestación o sistema a proteger. Los elementos captores se instalan separados de la instalación a proteger, de manera que la corriente del rayo no circule en las proximidades o por partes de la misma. Las varillas verticales se han fabricado tradicionalmente con la terminación superior en punta y se las llama “Puntas Franklin”, ya que fue Benjamin Franklin quien propuso esta implementación desde un principio. Los conductores horizontales suspendidos suelen llamarse “cables de guarda” y también fueron propuestos por Benjamin Franklin en 1753 [1].

Los elementos metálicos que componen el sistema captor son capaces de interceptar la descarga, soportan el efecto del impacto sin daños que afecten su función, efectividad y durabilidad, con sección suficiente como para conducir la corriente del rayo y localizados en todos los puntos donde el impacto es probable. Dichos puntos se determinan mediante metodología basada en las propiedades físicas de la descarga atmosférica. Su efectividad depende de la posición en la estructura a proteger [2]. En particular la evidencia experimental de los últimos años indica que la terminación en punta no mejora la efectividad [3]. La última edición de la norma NFPA780 [4] que regula este tipo de instalaciones en Estados Unidos establece que la terminación de las varillas verticales puede ser tanto en punta como roma. En esta y otras normas como la IEC 62305 se establecen datos dimensionales en el sentido de garantizar la necesaria capacidad de conducción de corriente y la robustez frente a los impactos [5].

El sistema de conductores de bajada que lleva la descarga a tierra consiste en cables metálicos que conducen la máxima corriente probable. El diseño del sistema de bajada tiende a minimizar efectos de la corriente tales como sobretensiones en los propios conductores que pueden producir arcos a la estructura y campos electromagnéticos que



afecten las instalaciones. Esto se logra minimizando la impedancia general del sistema mediante conductores múltiples - de longitud mínima y mínimo número de curvas - que dividan la corriente en forma simétrica en torno a la instalación. Los conductores de bajada instalados no tienen contacto con la estructura a proteger, debido a las sobretensiones que se genera en los extremos de los conductores. Por ejemplo, la corriente de un rayo de valor de pico 20 kA (más del 50% de los rayos supera ese valor) circulando por un cable de bajada de 10 m de altura produce una tensión en la punta con respecto a tierra o respecto a una estructura próxima de entre 200 kV y 2000 kV. El diseño según normas actuales implica prever tensiones de hasta 4000 kV para ese tipo de instalación [6].

El sistema de puesta a tierra consiste en una interconexión de electrodos verticales y horizontales enterrados y partes conductoras enterradas de la estructura a proteger. La extensión y disposición asegura la dispersión de la carga en el terreno de manera que las diferencias de potencial de tierra en la zona de la instalación causadas por la corriente del rayo se reduzcan a límites tolerables por personas y equipos [6].

### **1.1 Objetivo**

El objetivo del presente informe es detallar la metodología para el cálculo de los radios de cobertura para la protección contra las descargas atmosféricas directas de los Pararrayos No Convencionales, y de esta manera mostrarlos como una alternativa más eficiente ante los apantalladores convencionales.

### **1.2 Importancia o Justificación del Informe**

El presente informe servirá como guía para el conocimiento del funcionamiento y cálculo de los radios de cobertura de los pararrayos no convencionales para la protección de subestaciones eléctricas contra descargas atmosféricas directas. Además dará a conocer los modos y forma de operación de los pararrayos tipo PDC (Pararrayo con dispositivo de cebado), la metodología para sus cálculos de radios de cobertura. Además nos dará una noción básica de la formación de las descargas atmosféricas y las teorías que existen para explicar tales fenómenos.

### **1.3 Método de Trabajo**

El presente informe describe la metodología y aplicación de los pararrayos no convencionales, además realiza una comparación de los radios de protección con los pararrayos convencionales y muestra un estimado de costo de instalación y suministro del mismo.

### **1.4 Estructura del Informe**

El presente informe se ha dividido por Capítulos de la siguiente manera:

Capítulo I: En este capítulo se hace una introducción al presente informe, indicándose los objetivos, importancia del informe, método de trabajo y estructura del informe.

Capítulo II: Se especifican los antecedentes de la problemática, problemas que causan las descargas atmosféricas directas y los objetivos que se pretenden lograr con el presente informe.

Capítulo III: Se describe el marco teórico, se hace una breve introducción a la formación de los rayos, luego se describe los pararrayos convencionales y se detalla el método electrogeométrico para el cálculo de radios de protección. Luego se hace describe a los pararrayos no convencionales en especial al tipo de mayor utilización en el mercado actual, los pararrayos tipo PDC (PDC: Pararrayo con Dispositivo de Cebado).

Capítulo IV: Se describe el objetico del informe, la metodología para el cálculo de los radios de protección de los pararrayos no convencionales tipo PDC (PDC: Pararrayo con Dispositivo de Cebado). según la norma francesa NFC 17-102.

Finalmente se detalla las conclusiones y recomendaciones del presente informe, asimismo se muestra la bibliografía que sirvieron de referencia para el desarrollo del presente informe de suficiencia.

## **CAPITULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **2.1 Descripción del Problema**

La Subestación Eléctrica “Estación de Bombeo Booster” se instaló a una altura de 4500 metros sobre el nivel del mar en donde la presencia de nubes de tormentas eléctricas es frecuente, el problema de esta instalación fue que no contaba con un sistema de apantallamiento que proteja a los equipos contra descargas atmosféricas directas.

La falta de apantallamiento de una subestación eléctrica deja a esta instalación sin protección contra descargas atmosféricas directas, siendo necesaria la instalación de apantalladores de subestaciones eléctricas para la protección de los equipos instalados y además para que la confiabilidad del sistema sea alta. Por ende se recomienda la instalación de apantalladores que cubran todas las estructuras de la subestación.

Para el caso de la subestación eléctrica “Estación Booster” ubicada en Cia. Minera Antamina, se solicitó al cliente la instalación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, ya que en su diseño preliminar no contaba con un sistema de protección, siendo esta subestación nueva y estando alejada a las zonas de protección existentes.

##### **2.1.1 Problema Administrativos**

El sistema de protección contra descargas atmosféricas no se encontraba dentro del alcance del contrato, por lo cual no se podía instalar ningún sistema de apantallamiento para subestación que se estaba instalando. Para lo cual se solicitó vía carta a la supervisión Cia. Minera Antamina la inclusión de la instalación de dicho sistema, además se solicitó los planos constructivos para ejecución y se solicitó la confirmación de que esta actividad estaba fuera del alcance y que sea considerada como un adicional al presupuesto contractual.

##### **2.1.2 Problemas Técnicos**

La subestación eléctrica “Estación Booster” se encontraba en una zona alejada a una altura de 4500 metros sobre el nivel del mar y no presentaba ningún sistema de protección contra descargas atmosféricas directas, lo cual se contradecía con los estándares de Cia. Minera Antamina, el cual exigía la protección de las subestaciones eléctricas mediante sistema de captación de rayos. En base al estándar se presentó una propuesta técnica y económica para la instalación de un sistema de captación de descargas atmosféricas.

## **CAPITULO III**

### **MARCO TEORICO Y METODOLOGIA**

#### **3.1 El fenómeno del RAYO**

El fenómeno físico del rayo ha estado con el ser humano desde los tiempos más remotos, pero comparativamente hasta hace poco se le empezó a entender. Benjamín Franklin en sus experimentos eléctricos entre 1740 y 1750 tuvo éxito en identificar al rayo como una descarga eléctrica [6].

C.T.R. Wilson fue el primero en efectuar mediciones de campo eléctrico. Tras realizar observaciones de numerosas tormentas a cierta distancia, concluyó que la estructura básica de una nube de tormenta era la de un dipolo positivo. Por aquella misma época, midiendo la carga de la lluvia producida por nubes de tormenta, Mr. Simpson llegó a la conclusión opuesta: la región inferior de una nube de tormenta estaba cargada positivamente y la superior negativamente, formando así un dipolo negativo. Solo en las últimas décadas del siglo XX, los investigadores en física de la atmósfera han podido explicar esos resultados incompatibles a primera vista. Tanto Mr. Wilson como Mr. Simpson realizaron mediciones desde un solo lugar, lo que no bastaba para inferir correctamente la distribución de cargas en la nube de tormenta [6].

##### **3.1.1 Procesos de generación y separación de cargas en las nubes**

Las nubes de la atmósfera son acumulaciones de una gran masa de aire húmedo calentado como consecuencia de la radiación solar. Constantemente existen corrientes de aire que ascienden desde las proximidades de la superficie terrestre hacia las capas superiores de la atmósfera, cargando estas masas de aire hasta las partes superiores de la atmósfera. Estas corrientes de aire ascendentes provocan una disminución de presión y por tanto, un fenómeno de expansión adiabática, provocando la condensación del vapor de agua contenido en el aire, formando así la estructura básica de la nube.

Cabe señalar que para explicar algunas de las teorías de separación de cargas en las nubes, se tiene que destacar primero la existencia de un campo eléctrico dirigido hacia abajo entre la atmósfera y tierra del orden de 1V/cm cerca de la superficie, y que a mayor altura decrece, llegando a ser del orden de 0.02 V/cm a 10 Km [6]. A continuación se presentan tres teorías:

##### **a. Modelo de precipitación**

El modelo de la precipitación se basa en el funcionamiento de cualquier rociador de jardín: las gotas de agua grandes se apartan del chorro cayendo rápidamente, mientras que la neblina de pequeñas gotitas permanece suspendida en el aire y es arrastrada por el viento. Análogamente, el modelo de precipitación supone que las gotas de lluvia y las partículas de granizo en una tormenta son atraídas hacia abajo por la gravedad a través del aire, dejando en suspensión gotas de agua menores y cristales de hielo.

Las colisiones entre las grandes partículas de precipitación y la neblina de gotitas de agua y cristales de hielo, cargan negativamente las partículas de precipitación; por conservación de la carga total, la neblina se carga negativamente y las partículas de precipitación positivamente. De este análisis se concluye que la parte más baja de la nube acumula carga negativa y la parte superior, carga positiva, es decir, un dipolo positivo [6].

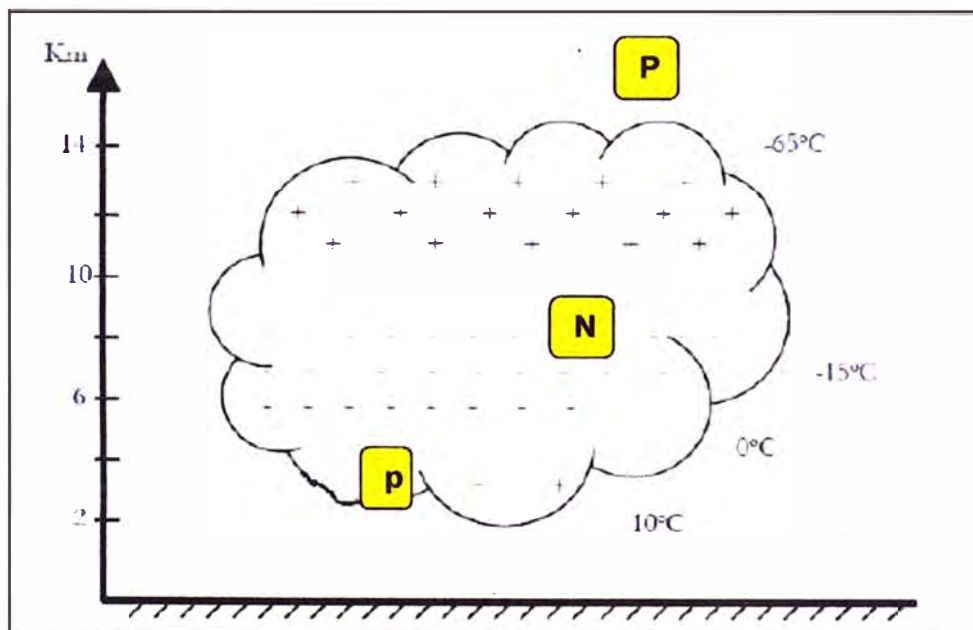
#### b. Modelo de la convección

El modelo de convección es algo más complejo. Supone que las cargas eléctricas de la nube proceden, inicialmente, de dos fuentes externas: los rayos cósmicos y un fuerte campo eléctrico. Los rayos cósmicos inciden sobre las moléculas de aire por encima de la nube y lo ionizan. La segunda fuente es el intenso campo eléctrico que se presenta sobre objetos puntiagudos de la superficie de la tierra; este campo produce lo que se conoce como “descarga de corona” de iones positivos. El aire caliente transporta los iones positivos hacia arriba por convección. Una vez que han alcanzado las regiones superiores de la nube, esos iones positivos atraen a los negativos que los rayos cósmicos habían formado por encima de la nube de tormenta. Los iones negativos penetran en la nube y se unen rápidamente a gotitas de agua o cristales de hielo, creando una “capa pantalla” cargada negativamente. Entonces, por hipótesis, las corrientes de aire descendentes en la periferia de la nube transportan las partículas cargadas negativamente de la capa protectora hacia abajo; el resultado vuelve a ser la formación de una estructura de dipolo positivo [6].

#### c. Estructura tripolar de la nube de tormenta

Transcurridas más de cuatro décadas de observaciones y mediciones desde la controversia Wilson - Simpson, investigadores como Malan y Schonland (1947) y Kasemir (1965) establecieron que la estructura básica de las nubes de tormentas no es bipolar, sino tripolar [6].

En la Fig. 1.1 se describe la estructura tripolar de una nube de tormenta en donde hay una región de carga negativa **N** en el centro, con una región de carga positiva **P** encima de ella y una segunda región, menor, de carga positiva **p** debajo de aquella.

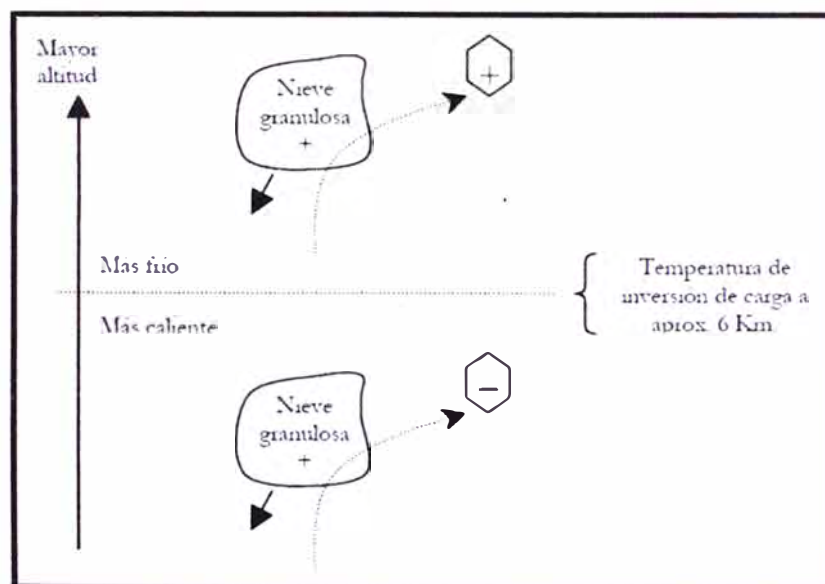


**Fig. 1.1** Configuración Tripolar de la nube de Tormenta

Esta estructura tripolar ayuda a comprender los resultados de Wilson y Simpson. El primero de ellos midió el campo eléctrico a una distancia considerable de la nube; el efecto de la pequeña región positiva  $p$  de la base de la nube quedaba anulado por la región negativa  $N$  principal. Por tanto, vio así la carga positiva superior  $P$  y una carga negativa  $N$  debajo de ella, es decir, un dipolo positivo. Simpson, por su parte, midió debajo de la nube. Sus instrumentos detectaron la región positiva inferior  $p$  por encima mismo del investigador. Como la carga negativa central  $N$ , más arriba, apantallaba la región positiva superior  $P$ , Simpson concluyó que la carga negativa estaba en la parte alta y que la estructura de la nube era un dipolo negativo.

La característica más notable de la capa principal, cargada negativamente, según la Fig. 1.1, está en su forma: su espesor vertical, aunque inferior a un kilómetro, puede extenderse horizontalmente varios kilómetros o más. Se halla a unos 6 kilómetros de altura, donde la temperatura se aproxima a  $-15^{\circ}$  Celsius. Bajo las condiciones allí dominantes, las tres fases del agua - hielo, líquido y vapor - pueden coexistir. Los campos eléctricos más intensos de la nube de tormenta se encuentran en las fronteras superior e inferior de la capa principal de carga negativa [7].

Por estudios que se realizan en cascadas, se sabe que las gotas mayores adquieren selectivamente una carga positiva al romperse. En la Fig. 1.2 se describe la teoría de inversión de cargas en donde cuando las partículas de granizo blando chocan con los cristales de hielo, la polaridad de la carga depende notablemente de la temperatura. Por debajo de una temperatura crítica, llamada temperatura de inversión de carga, las partículas se cargan negativamente; a temperaturas más altas se cargan positivamente. El valor de la temperatura de inversión de carga está entre  $-20$  y  $-10$  grados Celsius, según los estudios de laboratorio [8].



**Fig. 1.2** Teoría de la inversión de Cargas

La hipótesis de la inversión de carga explica por qué las cargas negativas se encuentran con menos frecuencia por debajo de una altura, donde la temperatura es de unos  $-15^{\circ}\text{C}$ : las partículas de granizo blando se cargan positivamente al caer a través de los cristales de hielo suspendidos y al colisionar con ellos. Estas cargas positivas que caen forman la región inferior positiva del tripolo.



El avance más reciente sobre la teoría de la electricidad de las tormentas es el haber establecido el concepto de *temperatura de inversión de carga* y un valor de esta, concordante, tanto en los experimentos de laboratorio como con las observaciones de nubes de tormenta. Sin embargo, la falta de una descripción microfísica de la electrificación estática es el mayor vacío que permanece en el conocimiento de la electricidad de las tormentas [6].

### 3.1.2 Categorización del rayo

En el estudio y cálculo de sobretensiones, un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar.

En la **Fig. 1.3**, se han identificado cuatro tipos de rayo entre nube y tierra. Las descargas negativas forman el 90% de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (*categoría 1*); menos del 10% de las descargas son positivas (*categoría 3*) [7]. También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (*categorías 2 y 4*), sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. Un aspecto adicional que se debe tener en cuenta es la distorsión que la presencia de objetos altos puede provocar en los parámetros de un rayo respecto al que se originaría en terreno plano.

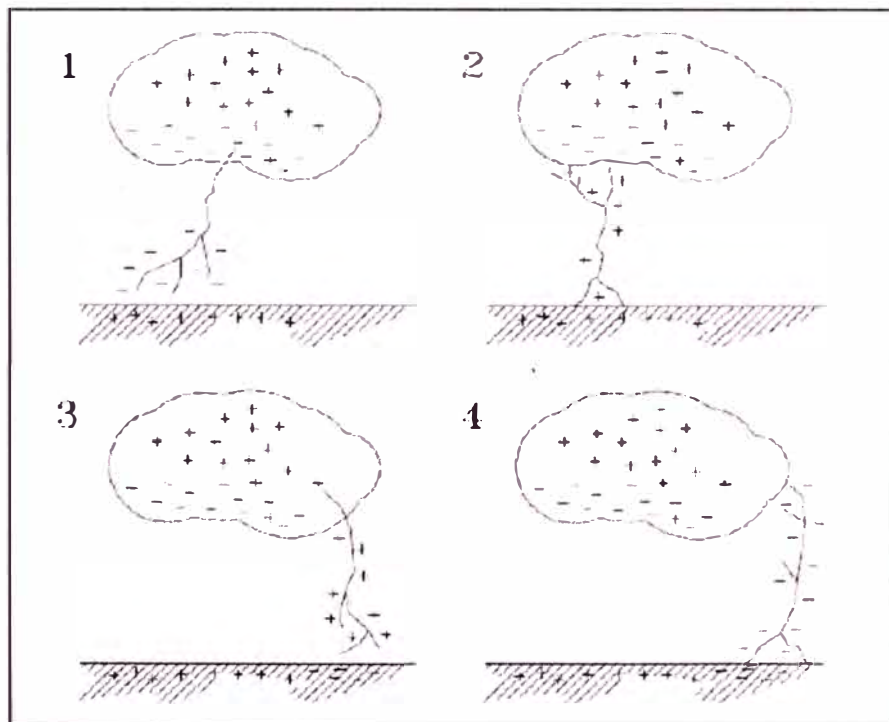


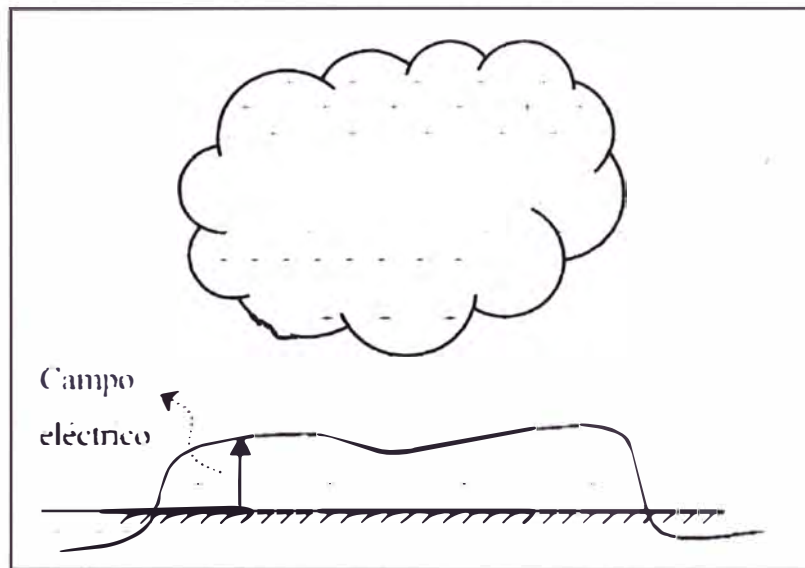
Fig. 1.3 Tipos de rayo entre nube y tierra

### 3.1.3 Proceso de formación del rayo

Se inicia un rayo cada vez que la acumulación de carga en una nube de tormenta es tal que el campo eléctrico entre los centros de carga que se forman dentro de la nube o entre la nube y la tierra es muy intenso.

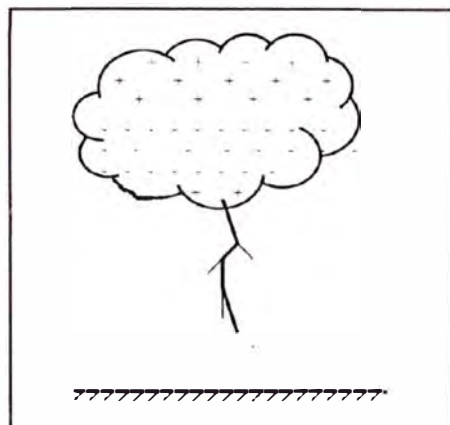
En la **Fig. 1.4** se ilustra a una nube de tormenta electrificada genera un campo eléctrico en el espacio comprendido entre la nube y la Tierra. La Tensión entre una nube de tormenta y la Tierra antes de una descarga al terreno se estima de 10 MV a 1000 MV. Una vez que el gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, se inicia una descarga [7].

Típicamente, intervienen en el proceso tres fases. En la primera, una ionización local puede generarse por choque en el aire y la alta intensidad del campo eléctrico, generando consecuentemente descargas eléctricas que se conocen como descargas iniciales piloto (Pilot Streamer), la cual según lo medido, avanza a una velocidad promedio de 150Km/s (aproximadamente 1/20 de la velocidad de la luz) [7].



**Fig. 1.4** Campo Eléctrico entre nube y tierra

Una de estas descargas logra imponerse en su crecimiento hacia la tierra dando paso a lo que se llama descarga escalonada (stepped leaders). La descarga escalonada es una secuencia de descargas eléctricas que parecen tener su origen en la acción del viento, con una corriente de pocos amperios y acompañada de pequeños puntos de baja luminosidad. Esta se propaga de forma discreta con una velocidad de aproximadamente 15 a 20% de la velocidad de la luz, avanzando aproximadamente 50 metros por escalón. En la **Fig. 1.5** se ilustra una vista representativa de la descarga escalonada desarrollada [7].



**Fig. 1.5** Descarga Escalonada



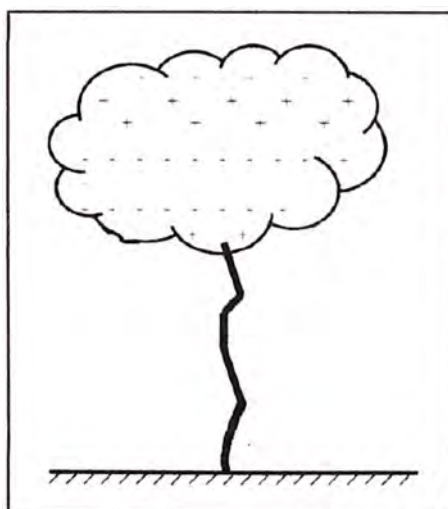
Se considera que la descarga escalonada llega muy pocas veces a tierra. Esto se debe a que generalmente la intermitencia de la descarga piloto (de 30 a 90  $\mu\text{s}$ ) sustrae la energía necesaria para este fin. Es posible que se inicie una descarga escalonada sencilla o múltiple desde un objeto situado sobre la superficie de la Tierra. En este caso, dos descargas escalonadas pueden encontrarse en algún punto. Hay evidencia también de que la descarga escalonada inicial puede originarse partiendo de una estructura alta que esté sobre la Tierra y no a partir de una nube [8].

El incremento del gradiente eléctrico de la tierra al aproximarse la descarga a esta, favorece a la formación de un canal de recepción; dicho canal muchas veces puede ser distinto al suelo, es decir, que puede ser un objeto el causante del canal de recepción (upward streamer) y es de notar que raramente dicho canal supera 30 metros de altura.

El canal de recepción sale entonces al encuentro con la descarga piloto, la cual trae una gran cantidad de cargas negativas (o positivas en algunos casos), formándose así un canal plasmático entre la nube y tierra, a través del cual ocurrirán todas las descargas sucesivas.

La segunda fase se inicia con una descarga de gran intensidad a través del canal plasmático establecido, donde se transfiere una cantidad sustancial de carga positiva de la tierra a la nube para neutralizar el centro de carga en donde se originó el rayo. Esta descarga es extremadamente luminosa y por lo tanto visible. Se propaga con una velocidad de alrededor de 10 a 50% de la velocidad de la luz [8].

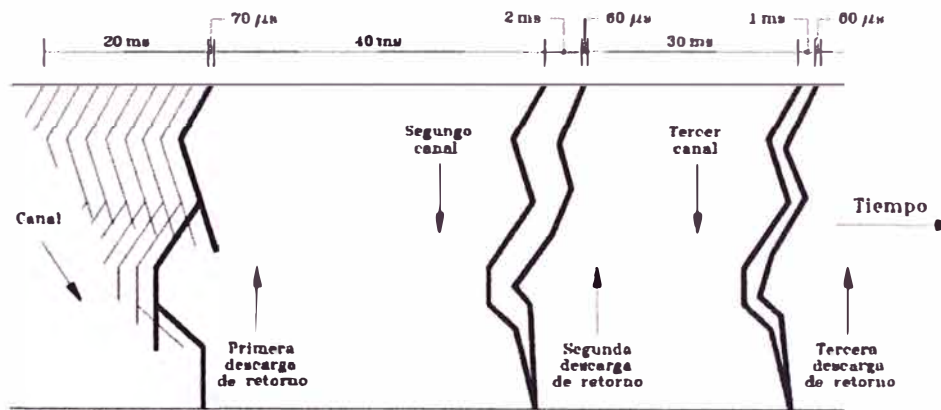
Se conoce que el 50% de esta descarga tiene una intensidad de corriente inferior a 20kA, aunque el 5% de los rayos que caen a tierra poseen intensidades de corrientes de hasta 160 kA, habiéndose registrado descargas de hasta 400 kA. La magnitud de la corriente se eleva rápidamente, dentro de 1 a 10  $\mu\text{s}$ , hasta el valor de pico y luego decrece, teniendo así un tiempo promedio aproximado de 100  $\mu\text{s}$ . La energía de un rayo es, por consiguiente, aproximadamente del orden de 10 a 100 kWh, pero con una potencia destructiva de 10 a 1000 GW. La forma de la onda de la corriente es determinada por la tasa de descarga del canal plasmático, la cual es función de la velocidad del retomo y de la distribución de las cargas a lo largo del canal [8]. En la **Fig. 1.6** se ilustra la descarga de retorno o "return stroke".



**Fig. 1.6** Descarga de Retorno.

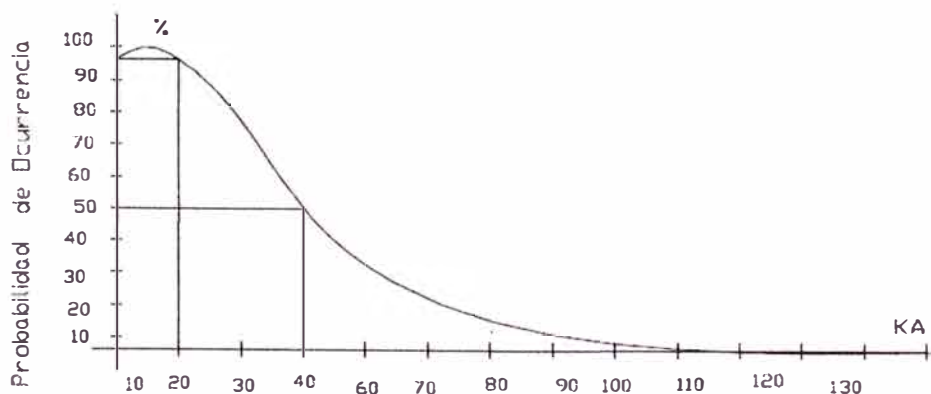
La **Fig. 1.7** describe las fases de un rayo y sus múltiples descargas, el impacto provocado por las cargas eléctricas, el cual es introducido en el seno de la nube por la descarga de retorno, es tan fuerte que en la mayoría de los casos origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, denominada descarga secundaria o "dart leader", con una velocidad promedio del 1% de la velocidad de la luz (3000 Km/s). También ocurren descargas procedentes de otros centros de carga situados dentro de la nube de tormenta hacia el centro de carga agotado, por razón de la mayor diferencia de potencial que hay entre ellos. Esta descarga disparará otra descarga más entre la nube y la Tierra a través del canal de plasmático ya establecido con la primera descarga [9].

Este proceso puede repetirse varias veces, dependiendo del estado de electrificación de la nube de tormenta, dando por resultado varias descargas que utilizan el mismo canal plasmático o se puede formar un segundo canal. Hay evidencias de que la mayoría de los rayos que llegan a la Tierra son de descargas múltiples (al menos el 50%) con un intervalo de tiempo entre descarga y descarga de 0.0005 a 0.5 segundos [8][9].



**Fig. 1.7:** Fases de un Rayo

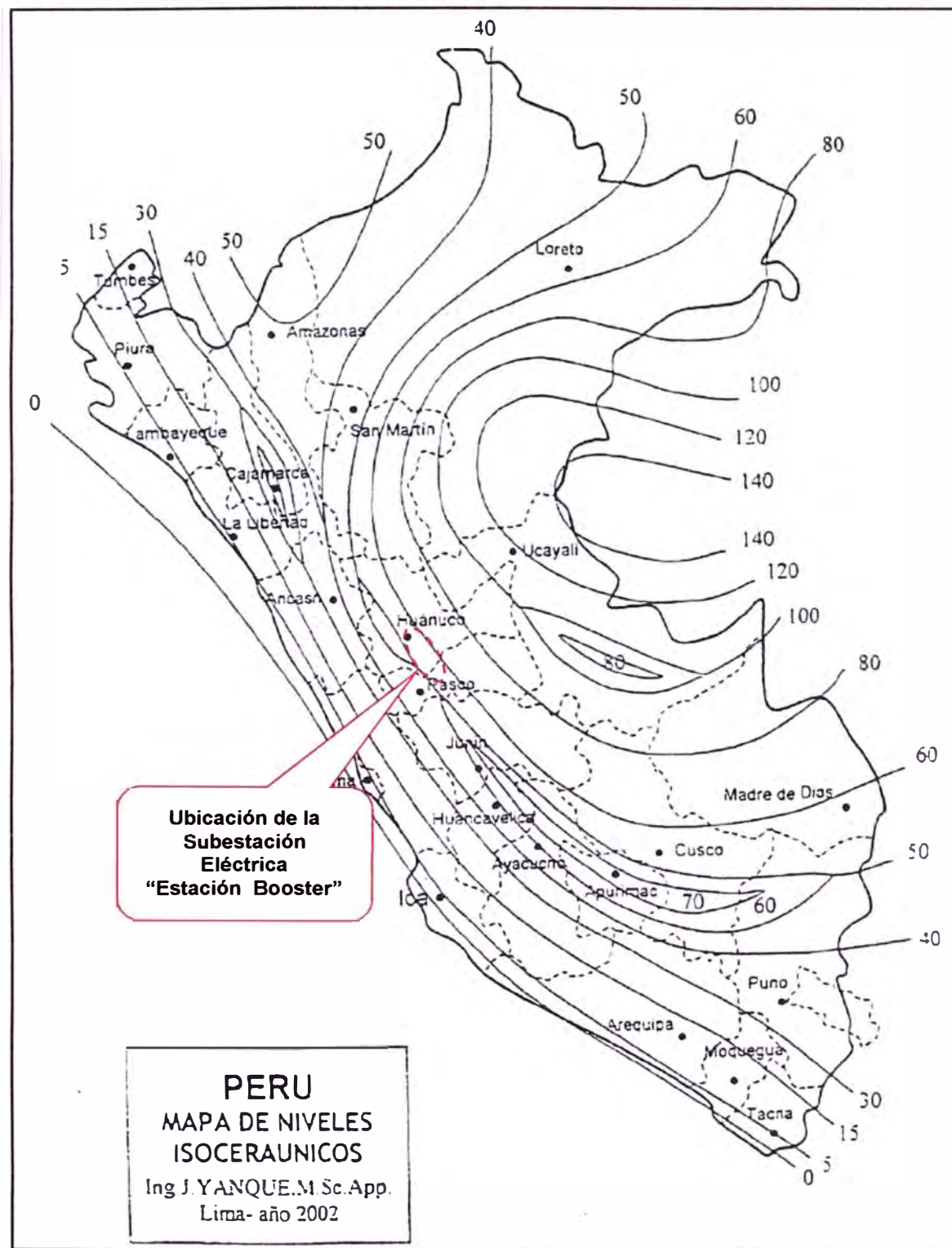
Con propósitos de aplicación es conveniente tener una idea de la distribución probabilística de la magnitud de la corriente del rayo. En la **Fig. 1.8** se puede observar entrando en el eje de las abscisas que con una corriente de 10 kA se obtiene su probabilidad de ocurrencia en el eje de las ordenadas y que es del orden de 85%, en cambio una corriente de 40 kA, siguiendo el mismo procedimiento, tiene una probabilidad de ocurrencia del 50% [9].



**Fig. 1.8:** Distribución probabilística de las corrientes del rayo

### 3.1.4 Descargas atmosféricas en el Perú.

Las características climáticas y montañosas de cada país determinan el número y la intensidad de las tormentas que se producen (nivel isoceraunico), riesgo que varía dentro de un mismo país. En la **Fig. 1.9** detalla las zonas de riesgo para determinar eficazmente el tipo de protección adecuada contra el tipo de descarga a la cual está expuesto.



**Fig. 1.9** Promedio anual de tormentas eléctricas en el Perú

### 3.1.5 Incidencia de rayos a tierra ( $N_g$ )

Para estudios y diseños eléctricos, se utiliza la cantidad de rayos a tierra ( $N_g$  o *GFD*) o densidad de rayos por  $\text{Km}^2$  en un año.

Existen tres formas para determinar este indicador:

- Con el uso de contadores;
- Por medio de los datos obtenidos a través de los registros realizados por satélite;
- Por medio de ecuaciones empíricas que lo relaciona con el nivel Ceraúnico ( $T_d$ ).

El nivel Ceraúnico representa la cantidad de días tormentas al año, que caracteriza a la zona particular que está siendo estudiada. Este último método es el menos exacto, pero es utilizado mundialmente en zonas donde no existen otras alternativas.

La expresión matemática utilizada para el cálculo de la densidad de descargas a nivel de tierra, es:

$$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25} \quad (1.1)$$

**Donde:**

$N_g$  : Número total de rayos a tierra (descargas/ $\text{km}^2$ -año)

$T_d$  : Nivel Ceraúnico (días de tormenta /año).

Para el área de estudio se tendría un  $T_d = 40$  días de tormenta /año (Cia. Minera Antamina), por tanto se tendría un nivel de rayos a tierra de:

$$N_g = 0.04 \times 40^{1.25}$$

$$N_g = 4.0238 \text{ Descargas}/\text{km}^2\text{-año}$$

### 3.1.6 Efectos de las descargas atmosféricas

Los fenómenos de sobrevoltaje más frecuentes en instalaciones son originadas por fenómenos externos como son las descargas atmosféricas. Este tipo de fenómeno ocasiona salidas de operación frecuentes en las instalaciones que provocan interrupciones en el servicio, por lo que es importante el conocimiento cualitativo y cuantitativo de las descargas atmosféricas, a fin de proporcionar la protección más adecuada a la instalación.

Existen tres tipos de sobrevoltaje:

- Por carga estática.
- Por descarga indirecta.
- Por descarga directa.

#### a. Por carga estática.

Estos sobrevoltajes se presentan en las instalaciones y en particular en líneas de transmisión por el simple hecho de que existen nubes sobre estas, y que las nubes sean desplazadas por el viento; este caso es menos peligroso, ya que se disminuye considerablemente su efecto mediante el uso de hilos de guarda en la línea de transmisión y bayonetas e hilos de guarda en las subestaciones que se encuentran permanentemente conectadas a tierra, limitando los gradientes a través de los aislamientos a valores muy por debajo de su valor de ruptura.

**b. Por descarga indirecta.**

Se presentan en la instalación por la presencia de rayos que caen en puntos cercanos y que por efecto de inducción electrostática y electromagnética introducen transitorios en las instalaciones. Este tipo de voltaje es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de descarga, ya que de mediciones realizadas en el campo se sabe que los sobrevoltajes son del orden de 100 y hasta 200 kV con corrientes de 25 a 100 kA [11].

Las descargas indirectas son las que más afectan a las instalaciones de medianas y bajas tensiones de orden de: 4.16kV, 13.8kV, 24.9kV, 34.5kV, etc. [11].

**c. Por descarga directa.**

Este tipo de sobrevoltajes son los menos frecuentes en las instalaciones, pero son los que pueden causar los daños más graves, debido a la enorme cantidad de energía, que trae consigo una descarga atmosférica.

Las corrientes que se presentan por este tipo de descarga, pueden alcanzar valores hasta de 100 kA instantáneos con frentes de onda muy escarpadas que introducen enormes esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones [11].

Por lo general una descarga directa sobre un punto intermedio de una línea de transmisión provoca una onda de sobrevoltaje inicial que se divide en dos ondas viajeras que van hacia la izquierda y la derecha del punto en que se produce la descarga con una velocidad cercana a la de la luz en caso de conductores aéreos desnudos.

Como se ha visto, en cualquiera de los tipos de acción externa se producen sobrevoltajes que son mayores o menores dependiendo de si la descarga es directa o indirecta. Este tipo de sobrevoltajes someten a los aislamientos de las instalaciones mal protegidas, particularmente a los de las máquinas, a esfuerzos dieléctricos que superan los niveles básicos de impulso de su aislamiento, produciendo la ruptura por perforación del material dieléctrico de dicho aislamiento.

Otros efectos que ocasionan las descargas atmosféricas sobre las instalaciones son los siguientes:

- La corriente del rayo alcanza valores instantáneos extremadamente altos que someten a los elementos de la instalación o esfuerzos dinámicos y térmicos y que requieren para su disminución de un diseño adecuado de la red de tierras.
- Los esfuerzos dinámicos debidos a la corriente del rayo someten a los conductores en las líneas o barras en las subestaciones a fuerzas de atracción y repulsión que pueden llegar a romper los aisladores o soportes de estos y deformar las estructuras de sujeción.
- La corriente del rayo trae consigo una gran cantidad de energía calorífica alcanzándose temperaturas de hasta 8350°C que provocan la fusión de los conductores y aislamientos provocando la correspondiente destrucción de los equipos [8]



### 3.2 Apantallamiento con Pararrayos CONVENCIONALES

Este Capitulo presenta tres metodologías para el diseño del apantallamiento de subestaciones descritas en la norma "Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations (IEEE Std 998 (1996) [7] [11]. Que son las ampliamente utilizadas:

- Método clásico de ángulos fijos
- Método Electrogeométrico.

#### 3.2.1 Conceptos Fundamentales.

##### a. Magnitud de la descarga $P(I)$

Uno de los valores más representativos y de mayor importancia de un rayo es la magnitud de la comente pico de la descargas. En la Fig. 2.1 detalla que la magnitud media de una descarga es de 31kA [7] y que la probabilidad de que cierta magnitud de corriente sea excedida en una descarga, está definida por la siguiente ecuación:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.1)$$

Donde:

$I$ : Magnitud de corriente pico de una descarga atmosférica, kA.

$P(I)$ : Probabilidad de que la corriente pico de una descarga atmosférica sea excedida

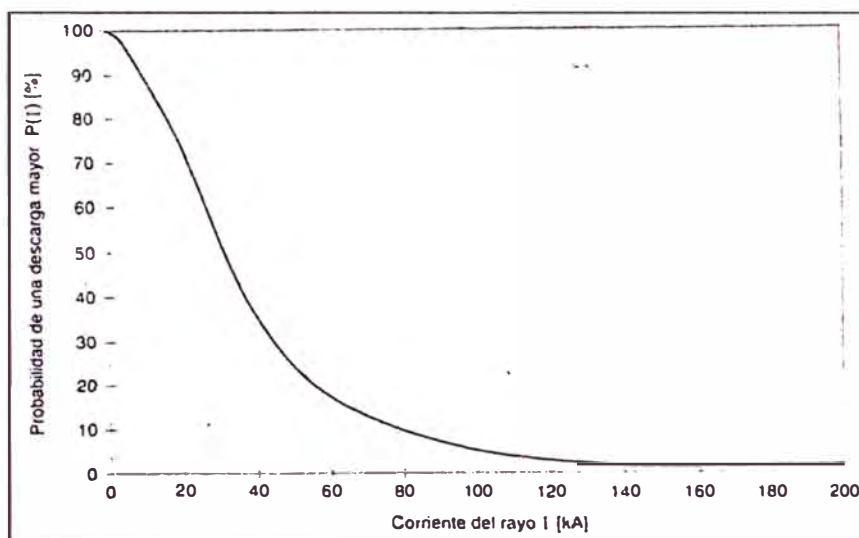


Fig. 2.1 – Probabilidad de que una descarga exceda la corriente pico.

##### b. Densidad de Rayos a Tierra (GFD)

La densidad de rayos a tierra es definida como el número promedio de descargas en un área de un kilómetro cuadrado durante un periodo de un año y está relacionada con el nivel Ceraúnico mediante la siguiente fórmula:

$$GFD = 0.12 \times Ni \quad (2.2)$$

Donde:

$GFD$ : Densidad de Rayos a Tierra.

$N_i$  : Nivel Ceraúnico. (Según Fig. 1.9)

Para la subestación que vamos apantallar se tiene un  $N_i = 40$ , por tanto se tiene:

$$GFD = 0.12 \times 40 \text{ Descargas/km}^2\text{-año}$$

$$GFD = 4.8 \text{ Descargas/km}^2\text{-año}$$

El cual es similar al resultado obtenido en 1.6 donde  $N_g = 4.0238 \text{ Descargas/km}^2\text{-año}$

### c. Dispositivos Apantalladores

Normalmente se emplean tres dispositivos con fines de apantallamiento en subestaciones, los cuales son: (Cables de Guarda, Puntas y Mástiles)

#### Cables de Guarda.

Son cables ubicados por encima del equipo a proteger y conectados a la tierra a través de los pórticos de la subestación. Presentan algunas características importantes, tales como:

- Protegen a lo largo de todo el cable.
- Son económicos en cuanto a que son conductores livianos con tensiones de temple bajas, por lo que no requieren estructuras muy fuertes.
- Aprovechan los pórticos como estructuras de soporte y solo requieren un castillete como estructura adicional.
- Las corrientes del rayo viajan siempre en las dos direcciones del cable, con lo cual la corriente que debe disipar cada estructura se reduce.
- La impedancia característica presentada al rayo es notablemente inferior (cerca de la mitad de la que presentara una sola estructura) reduciendo así la inductancia de la estructura y en consecuencia, el riesgo de flameo inverso en los aisladores de suspensión, fenómeno que puede producirse cuando hay descargas repetidas a través del mismo canal ionizado por el rayo.
- Para proteger aéreas pequeñas y aisladas de la subestación, el cable de guarda puede no resultar más económico que las puntas.

#### Puntas

Están colocadas sobre los pórticos y requieren como estructura adicional un castillete. Económicamente pueden competir con los cables de guarda ya que presentan menores problemas para su instalación y mantenimiento, aunque tienen unas características eléctricas ligeramente inferiores a las de estos, tales como:

- Tienen tendencia a aumentar las corrientes de retorno, con lo cual se hacen atractivas a los rayos, pero a la vez presentan mayores problemas para la disipación de esa corriente.
- A medida que el área de la subestación aumenta, el apantallamiento con puntas se hace más costoso que con cables de guarda debido a que una protección efectiva con puntas se logra solo con distancias relativamente cortas entre ellas, ya que el área a proteger debe tener una forma aproximadamente cuadrada.

#### Mástiles

Requieren estructura propia por lo que resultan ser los más costosos. Su utilización debe restringirse a casos especiales en los que se requiere proteger equipos aislados que no tengan pórticos aledaños.

Presentan además, como desventaja adicional a las ya anotadas para las puntas, la gran cantidad de disipación de corriente requerida, dada su tendencia a incrementar las

corrientes de retorno, ya que la corriente se debe disipar a través de una sola estructura por el desconocimiento que aún existe sobre la zona de protección del mástil.

Para efectos de cálculos de puntas y mástiles se sigue la misma metodología.

### 3.2.2 Método de los ángulos fijos

Método clásico de diseño que ha sido usado históricamente, y aún en la actualidad, para proteger las subestaciones contra las descargas directas y con el cual generalmente se provee un nivel aceptable de protección el cual es llamado también método geométrico.

La Fig. 2.2 detalla el método utilizando ángulos verticales para determinar la cantidad, posición y altura de los cables de guarda.

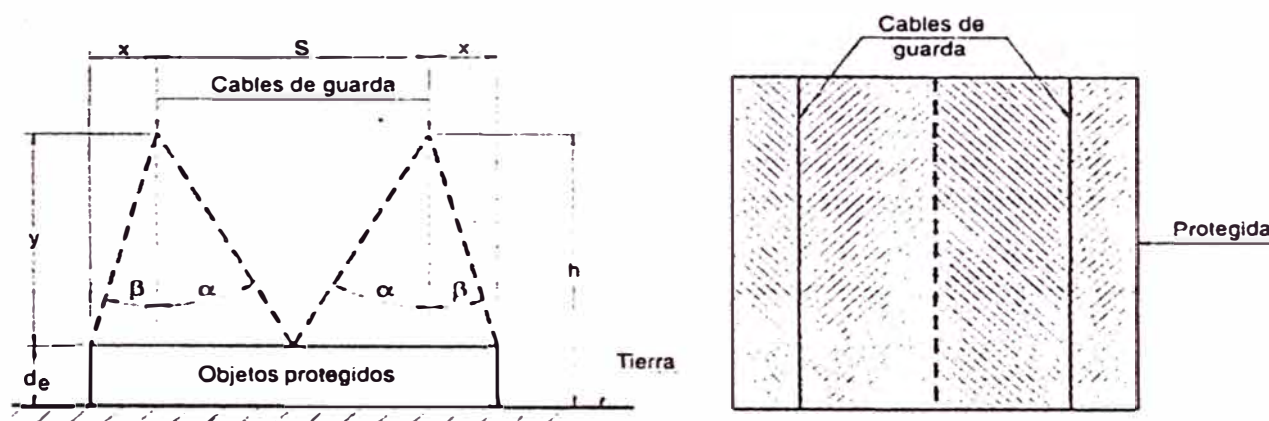


Fig. 2.2 – Ángulos fijos para cables de Guarda

La Fig. 2.2 detalla el método utilizando ángulos verticales para determinar la cantidad, posición y altura de los mástiles.

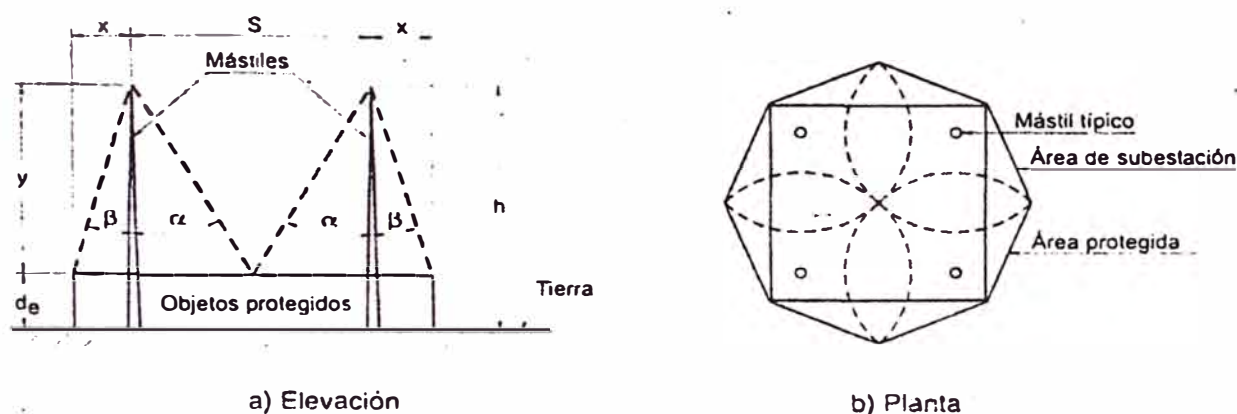


Fig. 2.3 – Ángulos fijos para mástiles

Los ángulos que se usan están determinados por el grado de exposición a las descargas, la importancia de la subestación y el área ocupada por la misma. Al ángulo  $\alpha$  normalmente se le asigna un valor de  $45^\circ$  y para el ángulo  $\beta$  se utilizan valores de  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . El diseño se hace de tal forma que se reducen los ángulos de apantallamiento a medida que la altura de las estructuras de la subestación se incrementa, para mantener una baja tasa de falla.



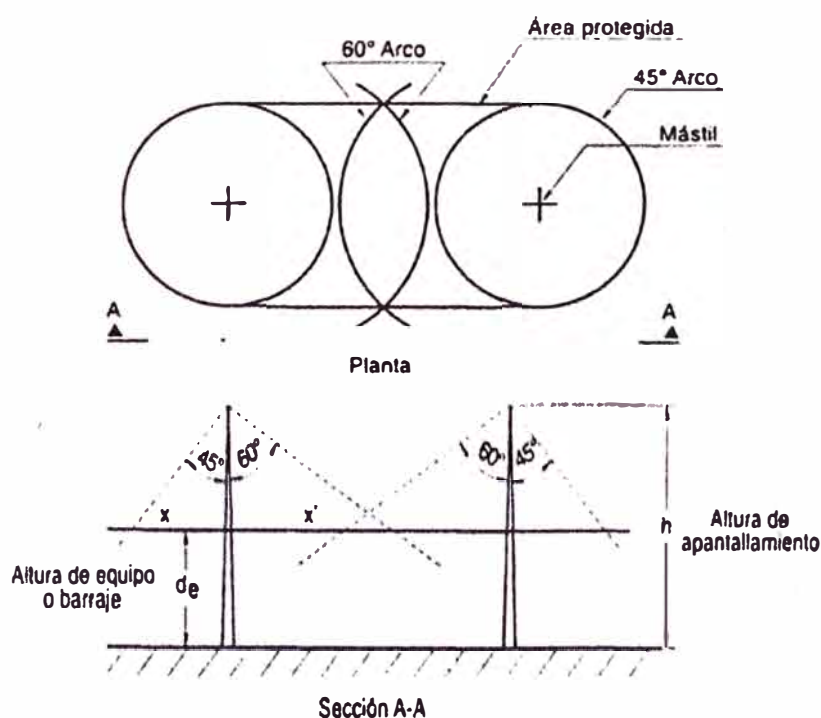
En la **TABLA 2.1** se indica que el ángulo de protección debe decrecer a medida que los conductores se elevan, para mantener uniforme la tasa de falla. Suponiendo una tasa de falla entre 0.1 y 0.2 fallas por cada 100 km /año (aplica a subestación) algunos autores recomiendan ángulos de protección de  $40^\circ$  a  $45^\circ$  para objetos hasta 15 m,  $30^\circ$  para alturas entre 15 m y 25 m y menor a  $20^\circ$  para alturas hasta 50 m [10].

**TABLA 2.1** Angulo de Apantallamiento

Altura del cable de guarda [m]	Falla de apantallamiento por cada 100 km / año (método del ángulo de protección)						
	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
10	0	0	1,1E-4	0,0087	0,0383	0,1032	0,2286
15	0	6,4E-5	0,0068	0,0351	0,0982	0,2182	0,4483
20	8,3E-6	0,0026	0,0214	0,0711	0,1695	0,3466	0,6903
25	0,0011	0,0087	0,0404	0,1123	0,2468	0,4819	0,9429
30	0,0035	0,0170	0,0620	0,1565	0,3275	0,6208	1,2008
35	0,0069	0,0269	0,0853	0,2024	0,4100	0,7616	1,4608
40	0,0109	0,0378	0,1096	0,2494	0,4936	0,9035	1,7214
45	0,0155	0,0493	0,1345	0,2969	0,5776	1,0462	1,9820
50	0,0204	0,0612	0,1598	0,3447	0,6619	1,1892	2,2423

La aplicación del método es como se indica a continuación:

- Se suponen una altura del mástil o cable de guarda y su localización.
- Se determina el cubrimiento para equipos o barrajes de acuerdo con los ángulos supuestos (**Fig. 2.4**).
- Se incrementa la altura del mástil o de ubicación de los cables de guarda, se relocalizan los mástiles o se adicionan para obtener un cubrimiento completo.



**Fig. 2.4** Cubrimiento con dos Mástiles

### 3.2.3 Modelo Electrogeométrico (EMG)

Mr. Gilman y Mr. Whitehead (1973) desarrollaron un sistema analítico referido a un Modelo Electrogeométrico (EMG) para determinar la efectividad de los apantallamientos. En él se pretende que los objetos a ser protegidos sean menos atractivos a los rayos que los elementos apantalladores, esto se logra determinando la llamada "distancia de descarga" del rayo a un objeto, cuyo significado es "la longitud del último paso de la guía de un rayo, bajo la influencia de la tierra o de un terminal que lo atrae".

La distancia de descarga determina la posición de la estructura apantalladora con respecto al objeto que se quiere proteger, tomando en cuenta la altura de cada uno respecto a la tierra. Dicha distancia está relacionada con la carga del canal de la guía del rayo y por lo tanto es una función de la corriente de retorno del mismo. La amplitud de la corriente de retorno es una variable aleatoria. Aproximadamente el 50% de las empresas utilizan el Modelo Electrogeométrico para diseñar el apantallamiento de subestaciones [10].

En la Fig. 2.5 se describe el método para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección, se trazan arcos de circunferencia, con radio igual a la distancia de descarga a los objetos a ser protegidos, de tal forma que los arcos sean tangentes a la tierra y a los objetos, o tangentes entre los objetos. Cualquier equipo por debajo de los arcos estará protegido por el o los objetos que conforman el arco y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas. Otra forma de visualizar este concepto consiste en imaginar un balón (esfera) de radio igual a la distancia de descarga, rodando sobre la superficie de la subestación y sobre los objetos de la misma. Todos los equipos que logre tocar el balón serán susceptibles a descargas directas. El propósito es que los únicos objetos que toque el balón sean los dispositivos apantalladores.

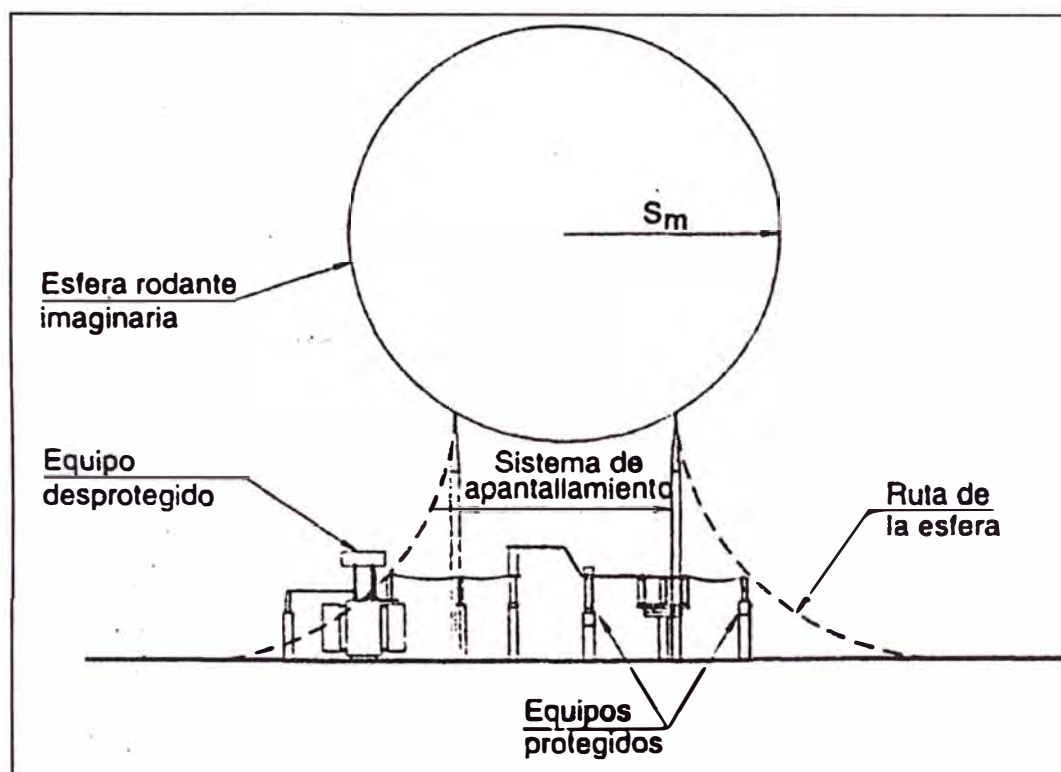


Fig. 2.5: Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga  $S_m$

**Distancia de descarga crítica ( $S_m$ )**

La distancia de descarga crítica  $S_m$  corresponde al último paso del líder de la descarga atmosférica para la corriente crítica. Esta dada por:

$$S_m = 8 \times k \times I_c^{0.65}, \text{ metros} \quad (2.3)$$

Donde:

$I_c$ : Corriente crítica de flameo,  $kA$

$k$ : coeficiente que tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga:

- 1.0: para cables de guarda
- 1.2: para mástiles y punta pararrayos.

**Corriente Crítica ( $I_c$ )**

La corriente crítica  $I_c$  es aquella que ocasiona una sobretensión peligrosa para el aislamiento. Esta dada por la expresión:

$$I_c = \frac{2.2 \times BIL}{Z_o} \text{ kA} \quad (2.4)$$

Esta ecuación es empleada cuando el apantallamiento protege un barraje soportado por aisladores de poste o equipos. El valor del BIL será el determinado para la instalación según los estudios de coordinación de aislamiento.

O por:

$$I_c = \frac{2.068 \times CFO}{Z_o} \text{ kA} \quad (2.5)$$

Donde:

$Z_o$ : impedancia característica del barraje a proteger,  $\Omega$

$BIL$ : Tensión soportada al impulso tipo atmosférico del aislamiento del equipo,  $kV$

$CFO$ : Tensión crítica de flameo de los aisladores,  $kV$ .

Esta ecuación es empleada cuando el apantallamiento protege un barraje soportado por cadenas de platos aisladores. El valor de CFO puede ser estimado por la fórmula de Mr. Anderson (1987) [10]:

$$CFO = 0.94 \times 585 \times w, \text{ kW} \quad (2.6)$$

Donde:

$CFO$ : Tensión crítica de flameo inverso de los aisladores y explosores (cuernos),  $kV$

$w$ : longitud de la cadena de aisladores,  $m$ .

### 3.3 Apantallamiento NO CONVENCIONAL

Desde el momento en que Benjamín Franklin propone su sistema de captor de descarga, conductor de bajada y puesta a tierra, básicamente el sistema que ha probado su efectividad durante más de 250 años y que seguimos usando, quedaron planteados dos temas. Uno de ellos fue la determinación (y la ampliación) del área que un elemento captor de rayos era capaz de proteger interceptando las descargas que de otro modo impactarían en la misma y el otro implicaba la posibilidad de impedir directamente la formación del rayo.

Es así que sobre todo en las cuatro últimas décadas se han desarrollado dispositivos que pueden aumentar significativamente el área de captación de descargas con respecto al pararrayos convencional o bien evitar la formación del rayo sobre la instalación a proteger. En la literatura se los denomina generalmente “*sistemas no convencionales*” [11]. Los cuales se dividen en dos clases o grupos:

Una clase agrupa esquemas de protección cuyo objetivo es evitar la formación del rayo sobre la estructura modificando las condiciones eléctricas de la nube o de la guía escalonada funcionando como “*Eliminadores de rayos*”. Estos sistemas han sido comercializados bajo el nombre DAS (*Dissipation Array System - Sistema de disipación*) y últimamente como CTS (*Charge Transfer System – sistema de transferencia de carga*).

La segunda clase se basa en captores tipo pararrayos verticales pero equipados con un dispositivo en la punta destinado a aumentar significativamente el área de protección generada en comparación con la que se establece al aplicar el método de la esfera rodante a un pararrayos vertical convencional, se los conoce como dispositivos ESE (*Early Streamer Emission – Emisión temprana de trazador*) o PDC (*Pararrayos con Dispositivo de Cebado*) o PDA (*Paratonnerres à Dispositif d’Amorçage*) [11].

#### 3.3.1 Sistemas de Disipación o Transferencia de Carga CTS (Charge Transfer Systems)

Son aquellos dispositivos que cambian las condiciones eléctricas de la atmósfera sobre y en las proximidades de la zona a proteger de manera de evitar el rayo o por lo menos reducir la probabilidad de su formación. Las descripciones de su funcionamiento dadas por los fabricantes se basan en el efecto corona que se produce en irregularidades del terreno y estructuras bajo un campo eléctrico como el que se produce bajo una nube durante una tormenta eléctrica, y en la correspondiente emisión o absorción de cargas por parte de objetos en punta sometidos a dicho campo eléctrico. Su construcción emplea conductores de bajo diámetro, del orden de algunos milímetros, cuyo extremo puede considerarse una punta. Estos conductores son comunes a todas las construcciones propuestas, y de aquí en adelante nos referiremos a esos conductores como “puntas” [11].

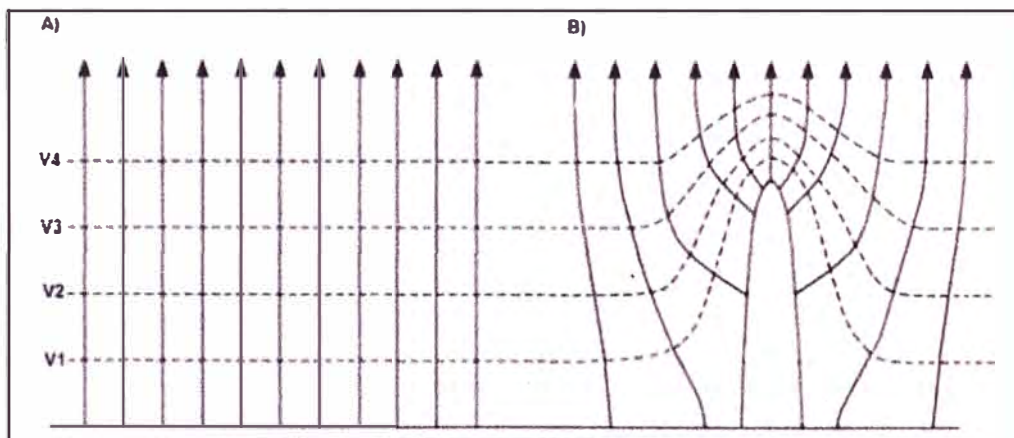
##### a. Descargas en Puntas (Point Discharge) o Efecto Corona

Se entiende por efecto corona o descarga en puntas a una descarga eléctrica debida a la ionización del aire en una punta o lugar en que un campo eléctrico existente está fuertemente intensificado en forma local por factores geométricos. Su intensidad es menor que la de una chispa eléctrica y puede mantenerse en estado aproximadamente estacionario confinada en un volumen alrededor de la punta. Si en un campo eléctrico uniforme sobre un plano conductor colocamos una punta conductora conectada al plano, se produce un aumento de la intensidad del campo en la punta debido a que la dirección del campo debe ser perpendicular al conductor.

La representación de la magnitud del campo eléctrico por la densidad de líneas de fuerza permite visualizar su intensificación en la punta y la dependencia de dicha intensificación de la curvatura de la punta (**Fig. 3.1**). Si la intensificación es suficiente el campo actúa sobre electrones libres (siempre presentes debido a rayos cósmicos y radiactividad natural) acelerándolos de manera que adquieran suficiente energía cinética como para ionizar la molécula o partícula atmosférica con la que choquen.

De esa forma se generan nuevos iones que son acelerados produciéndose un efecto de avalancha. Si la punta y el plano están cargados positivamente (lo usual durante una tormenta eléctrica) parte de los electrones generados fluirán hacia la punta produciendo una corriente al plano -que puede ser la tierra- y los iones positivos se alejarán de la punta. Los iones positivos forman una carga espacial que hace disminuir el campo eléctrico alrededor de la punta, inhibiendo la formación de nuevos iones. Se puede llegar entonces a un estado estacionario definido por un volumen en el que se produce la descarga corona, una corriente que fluye por el conductor en punta y por la velocidad de recombinación de las moléculas ionizadas [11].

El volumen y la corriente dependen del campo original en ausencia de la punta en la zona circundante. Si este campo aumenta, por ejemplo en una tormenta eléctrica con la aproximación de una guía descendente, la descarga corona pierde su condición estacionaria y puede convertirse en un trazador ascendente y eventualmente formar un rayo de retorno. El fenómeno puede ser alterado en alguna medida por el viento que arrastra los iones. La emisión de cargas por puntas bajo la acción del campo eléctrico atmosférico fue descrita por Franklin en 1749, antes de la invención del pararrayos.



**Fig. 3.1**

**A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano.**

**B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta**

#### **b. Estructura de un CTS y Operación.**

La operación de los CTS es la utilización de las cargas eléctricas que salen de conductores en punta en el campo eléctrico en condiciones de tormenta. Se intenta formar una carga espacial de características tales que la hagan capaz de modificar las condiciones eléctricas de la atmósfera al punto de impedir la formación de un rayo entre la nube y la estructura a proteger. Se parte de la suposición de que esto es posible si el sistema CTS libera una cantidad suficientemente grande de carga eléctrica por unidad de tiempo, mediante un dispositivo provisto de una cantidad adecuada de puntas, ubicado sobre el área a proteger y conectado a una tierra de muy baja impedancia y de distribución especial.



### c. Sistemas Comercializados Actualmente

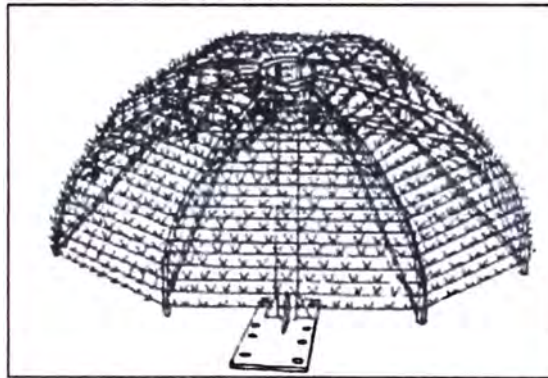
Es a partir de 1971 los sistemas destinados a prevenir o impedir los rayos empieza a ser fabricados y comercializados. Los nombres genéricos han ido cambiando, siendo los más usuales Sistemas Disipativos (DAS – Dissipative Array Systems) primero y Sistemas de Transferencia de Carga (CTS – Charge transfer Systems) en la actualidad [12].

La **Fig. 3.2** muestra la estructura de un dispositivo de transferencia de carga típico el cual se compone de tres elementos básicos que son el Ionizador, el colector de corriente y los conductores de servicio.

El “ionizador” o “disipador” que consiste en una armazón en forma de paraguas, usualmente de algunos metros de diámetro y envuelta en alambre con puntas, que se instala en una torre por encima de la estructura a proteger. Las dimensiones varían.

El “colector de corriente o carga de tierra”, un conductor que rodea la zona a proteger y que conecta electrodos de puesta a tierra dispuestos en cerco cada 10 m aproximadamente, formando un sistema de puesta a tierra de muy baja impedancia. En terrenos de alta resistividad los fabricantes recomiendan electrodos químicos.

Los “conductores de servicio” que conectan el ionizador al sistema de tierras.



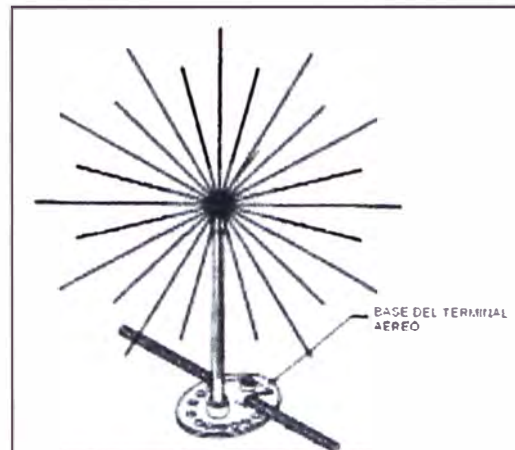
**Fig. 3.2** Disipador en forma de paraguas.

En la **Fig. 3.3** se muestra una instalación típica de un disipador en forma de paraguas para la protección de una instalación de gas.



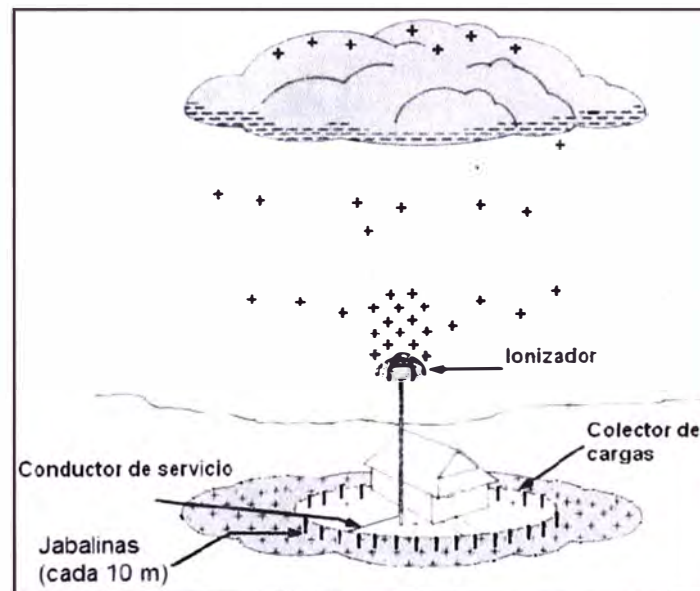
**Fig. 3.3** Disipador en forma de paraguas.

En la **Fig. 3.4** se muestra Otro tipo de ionizador en forma esférica.



**Fig. 3.4** Disipador esférico.

El funcionamiento del sistema se muestra en la **Fig. 3.5**. Debajo de una nube de tormenta cargada negativamente en su base, la tierra adquiere una carga positiva superficial, y el campo eléctrico es de algunos kilovoltios por metro, intensificándose en las irregularidades de las cuales puede partir un líder ascendente si el campo se intensifica ante las presencia de una guía escalonada. La idea es que, al colocar el CTS, las puntas del ionizador bajo efecto del campo eléctrico generan por efecto de descarga en punta iones cargados positivamente, que forman una nube de carga espacial positiva de magnitud tal - en carga y extensión- que es capaz de interactuar con la nube o las descargas impidiendo la formación del rayo [11][12].



**Fig. 3.5** Funcionamiento de un CTS

#### **d. Teorías de Funcionamiento**

Las teorías del mecanismo de protección están basadas en la magnitud de la carga liberada y de la interacción de la carga con los demás actores de la descarga atmosférica.

### ➤ **Descarga de la Nube**

El primer mecanismo postulado fue el de la descarga de la nube. Los iones positivos generados por las puntas neutralizarían la carga negativa de la nube en proporción suficiente como para impedir la formación de un rayo sobre la zona protegida. Según los estudios realizados las cargas positivas emitidas son menores que las negativas imposibilitando que la misma afecte la nube y/o la neutralice.

### ➤ **Apantallamiento por Carga Espacial Generada**

Esta propuesta del modo de operación se basa en que, si bien las cargas no llegan a la nube, son efectivamente generadas por las puntas formando una carga espacial sobre la zona a proteger (**Fig. 3.5**) Dicha zona, presentada como la zona delimitada por el sistema de tierras llamado colector de carga, quedaría libre de cargas positivas inducidas por la nube.

Adicionalmente la carga espacial generada crea una pantalla protectora que actúa como una “jaula de Faraday”.

### ➤ **Neutralización de la Guía Escalonada Descendente**

Este postulado del modo de operación fue descrita por Zipse. Se postula que el sistema CTS es capaz de crear una zona de carga espacial de magnitud suficiente como para atraer a la guía escalonada descendente, que generalmente es una carga negativa, y neutralizarla total o parcialmente. Se admite que no todas las guías pueden ser neutralizadas. En caso de formarse un rayo, éste se formaría con el ionizador, que entonces actuaría como una protección convencional. La viabilidad de este modo de operación dependería de la cantidad de puntas del ionizador y de la corriente corona que es capaz de emitir cada punta.

#### **e. Funcionamiento del CTS como Protección Convencional**

Un sistema CTS completo con sus terminales, sus bajadas, sus buenas puestas a tierra y sus protecciones complementarias constituyen un buen sistema de protección convencional cumpliendo y pudiéndose aplicar lo que ordena la NFPA-780 para el cálculo de su zona de protección contra descarga atmosférica.

### **3.3.2 Dispositivos PDC (Pararrayo con Dispositivo de Cebado)**

Son llamados también como **ESE** (Early Streamer Emission), **PDA** (Paratonnerre a dispositif d'Amorçage) y también pararrayos activos. Internacionalmente se los conoce como dispositivos ESE. Se tiene la norma francesa NFC 17-102 relativa a su ensayo y empleo. Además de la norma española UNE 21186 es una traducción de la francesa con diferencias menores. Los sistemas de protección basados en dispositivos ESE difieren de los convencionales en el uso de puntas verticales, son de características especiales capaces de generar un trazador ascendente antes, y por lo tanto significativamente más largo que una punta vertical convencional colocada en el mismo lugar y a la misma altura. Dicho trazador ascendente encontraría la guía escalonada a una distancia mayor, aumentando la zona de protección. De esta forma una única punta ESE sustituiría varias puntas convencionales [11][13]

#### **a. Funcionamiento de la protección basada en dispositivos PDC**

Al acercarse la guía escalonada, la punta del dispositivo PDC inicia el trazador ascendente un cierto tiempo  $\Delta t$  del orden de decenas de microsegundos antes de lo que lo haría la punta de una barra vertical común o punta Franklin ubicada en la misma posición.



Esa afirmación implica que el trazador anticipado, que consiste en una descarga capaz de propagarse, se inicia y se propaga con un campo eléctrico significativamente menor que en el caso de la punta convencional u objeto emisor. La ventaja temporal se traduce en una ventaja espacial o ganancia en longitud consistente en una distancia:

$$\Delta L = v\Delta t \quad (3.1)$$

Donde “ $v$ ” es la velocidad de propagación del trazador ascendente ( $1\text{m}/\mu\text{s}$  - NFC)  
Además se toma el valor convencional de *distancia de impacto*  $R_s$ , definido por:

$$R_s = A \times I^B \quad (3.2)$$

Donde  $I$  la corriente de pico de la primera descarga de retorno en kiloamperios y  $A$  y  $B$  constantes. La norma CEI define la ecuación como:

$$R_s = 10 \times I^{0.65} \quad (3.3)$$

Una vez calculada la distancia de impacto al PDC se determina mediante el cálculo geométrico que sigue una “zona de protección”. Se considera un dispositivo PDC instalado en el extremo superior de un mástil vertical con su punta a una altura  $h$  sobre una superficie plana (Fig. 3.6). La zona de atracción o captura del plano es una recta horizontal a altura  $R_s$ , siendo  $R_s$  la distancia de impacto convencional estimada según la ecuación (3.3). La distancia de impacto para el PDC es  $\Delta L + R_s$ . Se concluye entonces que las guías ascendentes cuyas puntas lleguen a una distancia  $\Delta L + R_s$  del PDC antes que a una distancia  $R_s$  del piso generarán el trazador ascendente exitoso desde el PDC. Este criterio determina entonces una zona circular del piso con centro en el pie del mástil del PDC limitada por la proyección vertical  $I$  de los puntos  $P$  de altura  $R_s$ , que distan  $\Delta L + R_s$  de la punta  $A$  del PDC. Las descargas que se hubieran establecido contra el piso de esa zona se establecerían entonces contra el PDC. El radio de esa zona se denomina entonces radio de protección  $R_p$  y se calcula aplicando Pitágoras al triángulo ABP [11] [13]

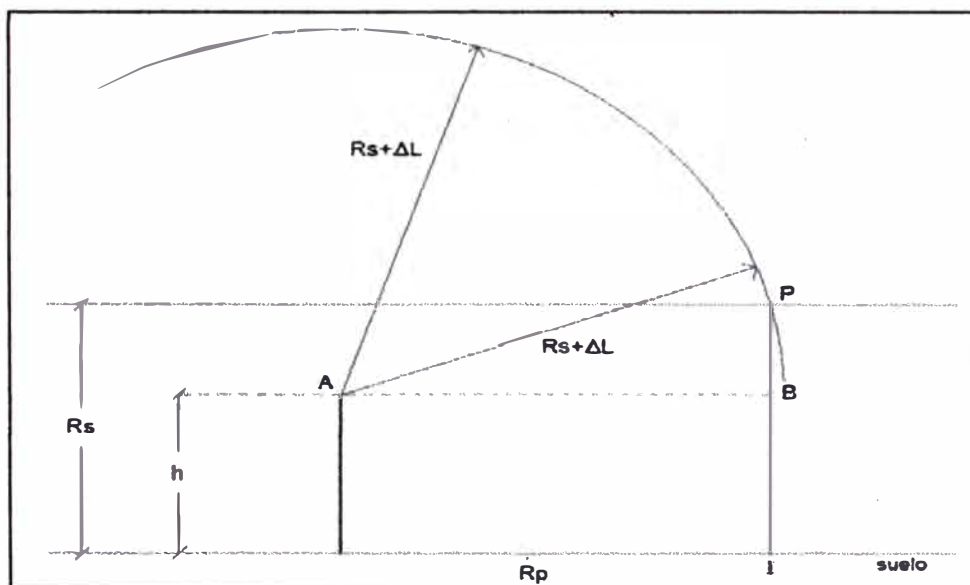


Fig. 3.6 Cálculo de la zona de protección de un PDC

$$R_p^2 = (AB)^2 = (\Delta L + R_s)^2 - (R_s - h)^2$$

$$R_p = \sqrt{(\Delta L + R_s)^2 - (R_s - h)^2}$$

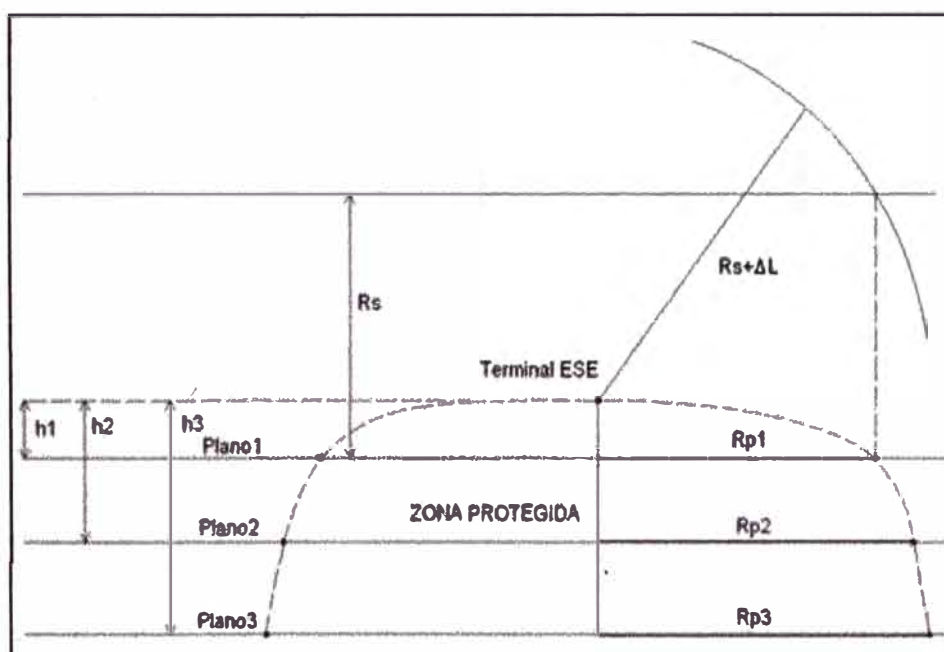
Haciendo cuentas se llega a la expresión que aparece en la norma francesa:

$$R_p = \sqrt{\Delta L \times (\Delta L + 2R_s) + h \times (2R_s - h)} \quad (3.4)$$

De acuerdo al cálculo, la expresión anterior indicaría solamente el radio del área de suelo plano alrededor del ESE a altura  $h$  que estaría protegida por el mismo.

Sin embargo dicha expresión se utiliza además para determinar una “zona protegida” de carácter volumétrico. La construcción de esa zona se muestra en la **Fig. 3.7**.

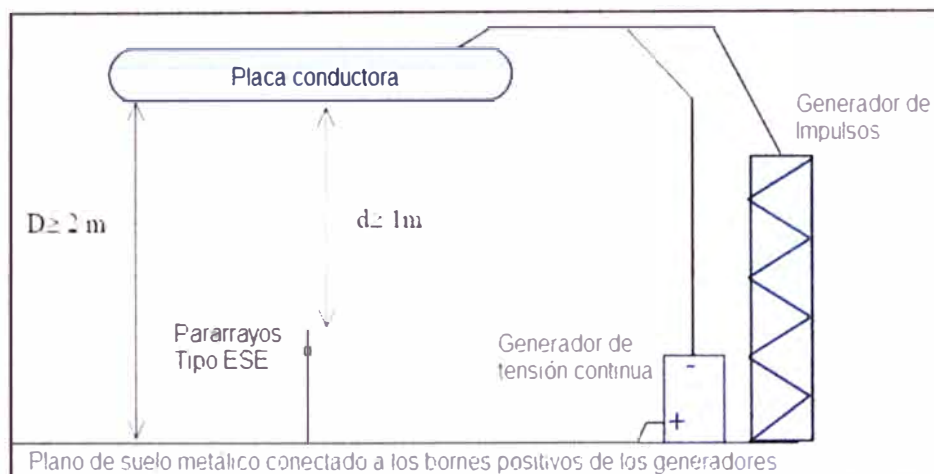
La norma indica que la fórmula  $R_p$  es válida para  $h \geq 5$  m. Para valores menores de  $h$  la superficie se completa mediante funciones lineales expresadas por curvas.



**Fig. 3.7.** Construcción de la zona espacial “protegida” de un PDC.

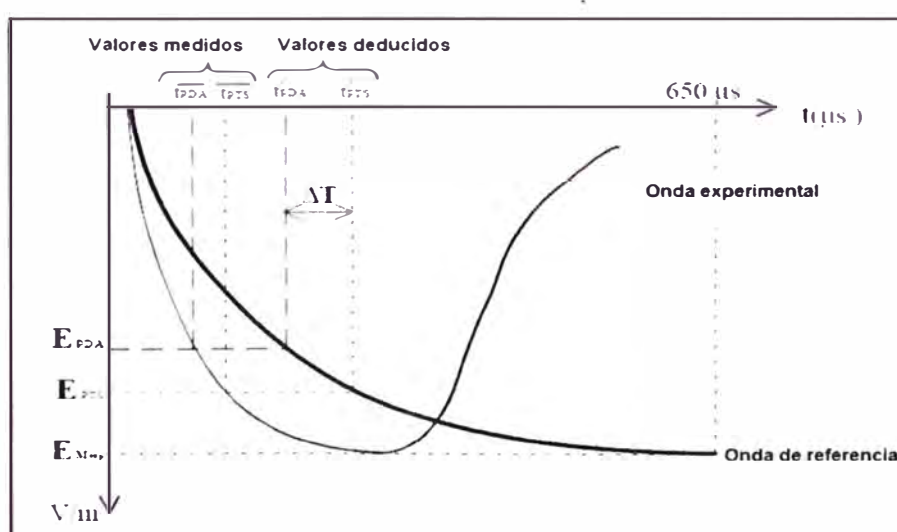
$R_p = R_p(h)$  de acuerdo a la fórmula  $R_p$ .

Un elemento básico de la teoría es el valor de  $\Delta t$ . La norma establece el método que se describe a continuación para medirlo de manera de determinar la efectividad de un PDC. En la **Fig. 3.8** describe que si se instala a una distancia  $h \geq 2$  m por encima de un piso plano metálico una superficie metálica paralela al piso de bordes redondeados hacia arriba y de dimensión mínima igual o mayor que  $h$ . Se instala en el medio una punta PDC a una distancia  $d \geq 1$  m. Se bloquea el funcionamiento del dispositivo de manera que el PDC se comporte como una punta convencional. Se aplica una tensión continua ente placa y piso tal que el campo esté entre 10 y 25 kV/m, en el entendido de que esos valores son representativos del medio eléctrico cerca de tierra bajo una nube de tormenta. Se superpone una tensión de impulso tal que el tiempo de subida del campo esté entre 100 y 1000  $\mu$ s y que la pendiente en el instante inicial esté entre  $2 \times 10^8$  y  $2 \times 10^9$  V/m/s [11] [14].



**Fig. 3.8.** Configuración de ensayo de un pararrayos tipo PDC en laboratorio.

Luego se mide el tiempo  $T_{PTS}$  desde el inicio del impulso al momento de la descarga entre la placa superior y la punta y se registra el valor  $E_{PTS}$  del campo en el momento de la descarga. Luego se hace lo mismo con la punta activada, se mide el tiempo  $T_{PDA}$  y el campo correspondiente  $E_{PDA}$ . Si el dispositivo funciona estos valores deben ser menores que los anteriores. Los valores  $E_{PTS}$  y  $E_{PDA}$  se llevan a una curva de referencia dada por la norma, normalizada al campo máximo del impulso experimental, y que llega a dicho máximo en  $650 \mu\text{s}$ . De esa forma se determinan los tiempos deducidos  $T'_{PTS}$  y  $T'_{PDA}$ . En la **Fig. 3.9** se determina la diferencia de tiempos  $T'_{PTS} - T'_{PDA}$  en la onda de referencia correspondiente a la diferencia de campos. Esta diferencia es tomada como la ventaja temporal  $\Delta t$  asociada al dispositivo ensayado. Los subíndices empleados corresponden a las siglas en francés de pararrayos convencional (PTS) y pararrayos PDC (PDA). El adelanto medido de esta forma puede estar entre 20 y  $100 \mu\text{s}$ , lo que según la fórmula de  $R_p$  puede dar, para una distancia de impacto convencional de 45 m, un radio de protección de 51 m a 135 m con un PDC con su punta a sólo 5 m de altura sobre la eventual superficie plana a proteger. [11] [14].



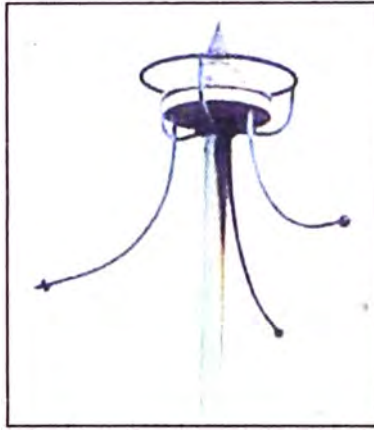
**Fig. 3.9.** Deducción del adelanto temporal  $\Delta t$   
A partir de los resultados del ensayo según la *Fig. 3.8*.

### b. Operación de los dispositivos PDC

El funcionamiento de los dispositivos PDC se basa en la creación de una ionización del aire alrededor de su punta mucho mayor que la que se produce naturalmente en un captor vertical convencional en condiciones de campo eléctrico bajo una tormenta, de manera de crear condiciones para la emisión anticipada del trazador ascendente.

### c. Pararrayos radiactivos

El primer medio utilizado para obtener un aumento de ionización fue la radiactividad. El físico húngaro Szillard planteó en 1914 por primera vez la posibilidad del aumento de la zona de atracción de un pararrayos agregando cerca de su punta una fuente radiactiva. En la **Fig. 3.10** se describe a un pararrayos radiactivo el cual consiste en un vástago terminado en punta con un recinto en la proximidad de la misma que contiene un elemento radiactivo, normalmente radio o americio.

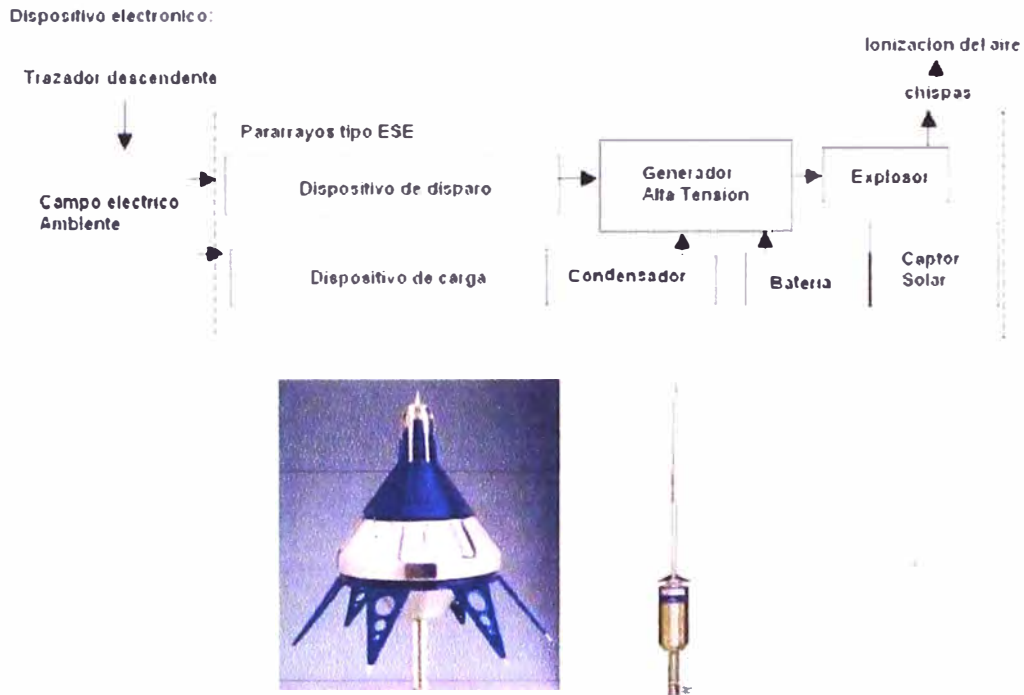


**Fig. 3.10.** Pararrayos radiactivo.

### d. Pararrayos activos (PDC) no radiactivos

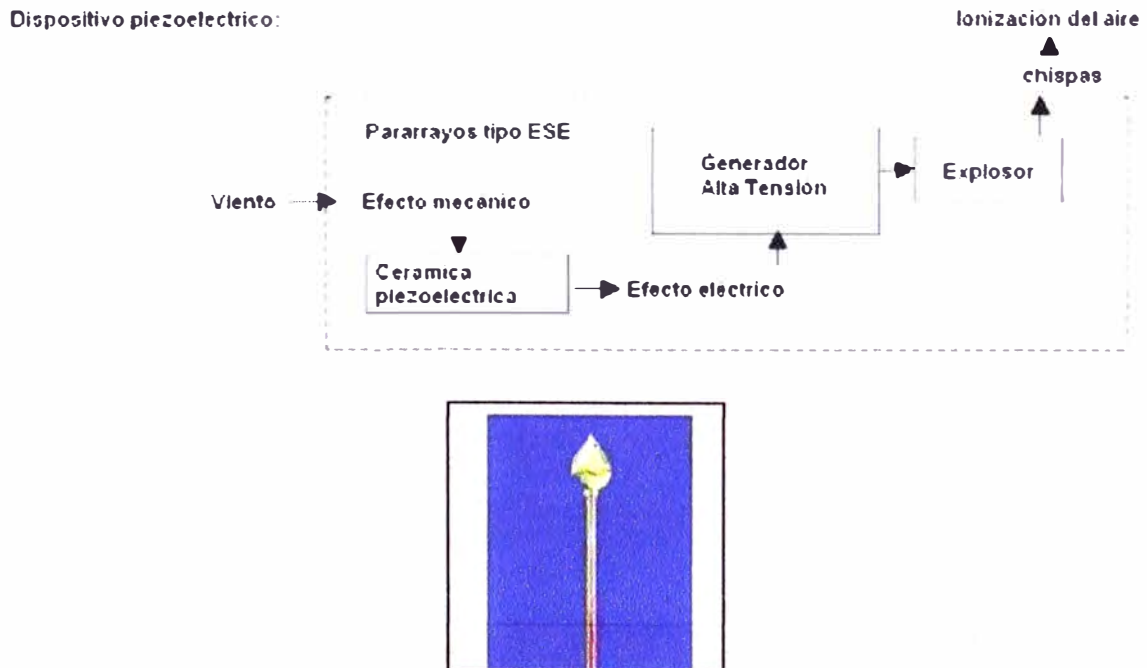
Existen por menos tres tipos de pararrayos activos no radiactivos: De disparo electrónico, piezoeléctricos y de perfil especial. Se indica el principio básico de su funcionamiento.

**Los dispositivos de disparo electrónico:** En la **Fig. 3.11** describe este tipo que consisten en un generador de alta tensión que hace saltar una chispa entre dos electrodos. Esa chispa se traduce en la ionización del aire buscada. El generador es disparado por un dispositivo electrónico que incluye un detector de intensidad de campo eléctrico. Estos dispositivos necesitan energía eléctrica para su funcionamiento. Para su alimentación se han desarrollado distintos métodos. Algunos dispositivos usan una batería cargada por un panel solar. Otros utilizan el propio campo eléctrico ambiente creado por la nube de tormenta para cargar un condensador de almacenamiento de energía.



**Fig. 3.11** PDC de disparo electrónico

**Los dispositivos piezoeléctricos:** En la Fig. 3.12 se detalla y se describe como equipos que en que la parte superior del pararrayos descansa en equilibrio sobre una cerámica piezoeléctrica. El viento mueve la parte superior comprimiendo la cerámica y generando así impulsos de alta tensión que generan chispas en su punta auxiliar ubicada en una cámara de ionización dentro de la parte superior del pararrayos. Los iones suben a la punta del pararrayos aumentando la carga eléctrica en esa zona.



**Fig. 3.12** PDC piezoeléctricos

**Los pararrayos de perfil especial:** En la Fig. 3.13 se detallan y describe que consiste en un captor vertical conectado a tierra rodeado de elementos metálicos de formas especiales aislados de tal manera que tomen el potencial ambiente del aire. Su funcionamiento se basa en que al acercarse una guía descendente la tensión entre la parte a tierra y las partes aisladas (“antenas” o “captoreadores de energía”) aumenta a miles de voltios provocando chispas entre esas partes que contribuyen al aumento de la ionización.

Dispositivo de perfil especial:

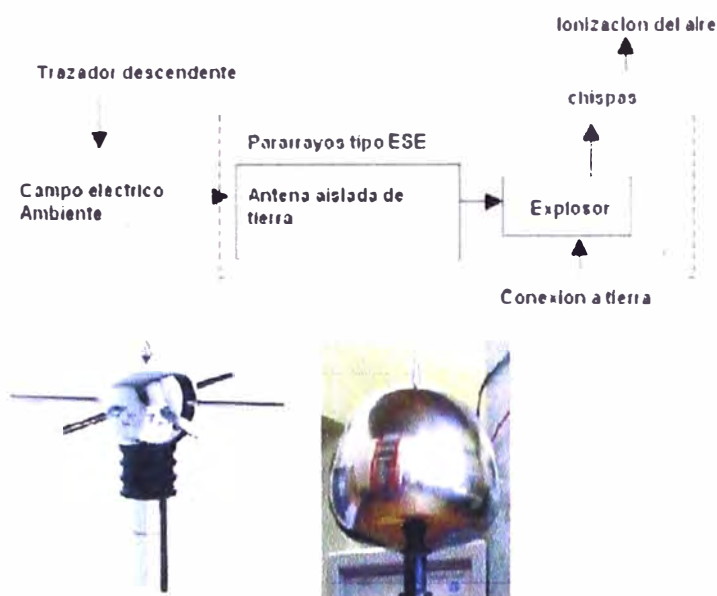


Fig. 3.13: PDC de perfil especial

En la Fig. 3.14 se detallan la nomenclatura de los tipos de pararrayos tipo PDC que existen actualmente en el mercado.

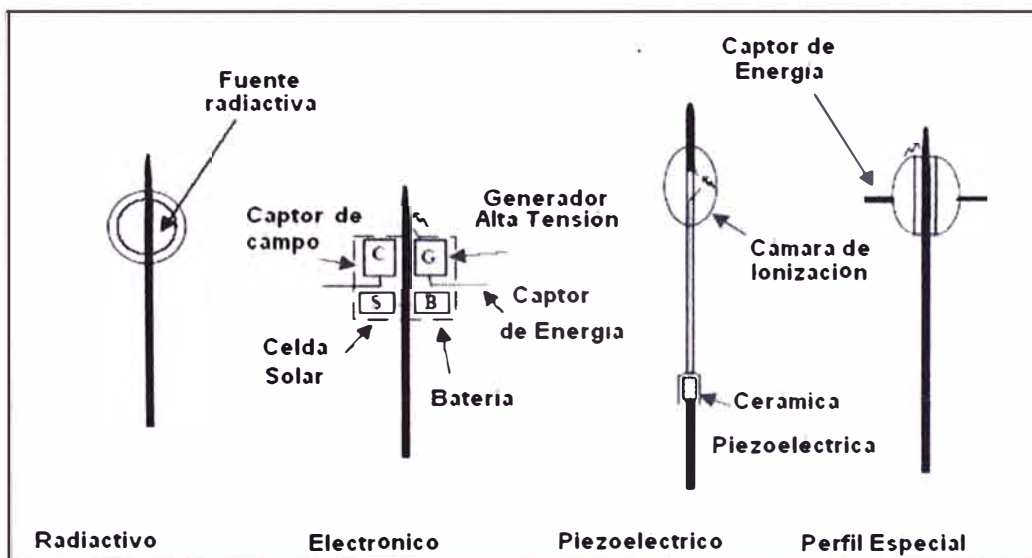


Fig. 3.14 Representación esquemática de distintos tipos de PDC.

## **CAPITULO IV**

### **APLICACIÓN DE METODOLOGIA Y RESULTADOS**

#### **4.1 Objetivo**

El desarrollo de este informe tiene como objetivo mostrar la metodología para seleccionar el tipo de pararrayos NO CONVENCIONAL tipo PDC adecuado que proteja el área donde se ubicará la nueva subestación eléctrica.

Para ello esta metodología consta de tres partes:

- Primero definir los parámetros y características del área a proteger frente a posibles descargas atmosféricas que pudieran ocurrir en dicha zona y de esta manera saber si es necesario implementar un sistema de protección frente a este tipo de descargas.
- Luego de saber si se necesita implementar este tipo de protección, debemos de seleccionar el nivel de protección correspondiente.
- Finalmente seleccionamos el tipo de pararrayos, el cual cumplirá con los cálculos realizados y cubrirá toda el área que requerimos proteger.

#### **4.2 Introducción**

Con la implementación de un sistema de protección frente a descargas atmosféricas se busca lograr una adecuada protección frente a este tipo de fenómenos naturales y así garantizar la seguridad del personal y equipos expuestos frente a este tipo de descargas eléctricas, cumpliendo con la norma francesa NFC 17-102 de pararrayos con dispositivo de cebado (ESE).

#### **4.3 Evaluación del Riesgo de Impacto en la Instalación.**

##### **4.3.1 Determinación de Frecuencia esperada de Impactos Directos de Rayos ( $N_d$ ) y Frecuencia esperada de Tales Impactos ( $N_c$ ).**

###### **a. Densidad de Impactos de Rayos sobre el terrenos ( $N_g$ )**

Conociendo el nivel Isoceraunico ( $N_k$ ) podemos determinar la densidad de impactos en la zona ( $N_g$ ) de acuerdo al mapa de nivel isoceraunicos 2002 (Fig. 8)

De donde se observa que para la zona de Ancash (ubicación de Compañía Minera Antamina S.A.) le corresponde un nivel isoceraunico ( $N_k = 40$  rayos- año)

$$N_g = 0.04 * (N_k)^{1.25} \quad (4.1)$$



Por tanto:

- $N_g = 0.04 * (40)^{1.25}$
- $N_g = 4.02$  rayos – año / Km<sup>2</sup>

**b. Frecuencia Esperada de Impactos directos de Rayos ( $N_d$ )**

Según la norma:

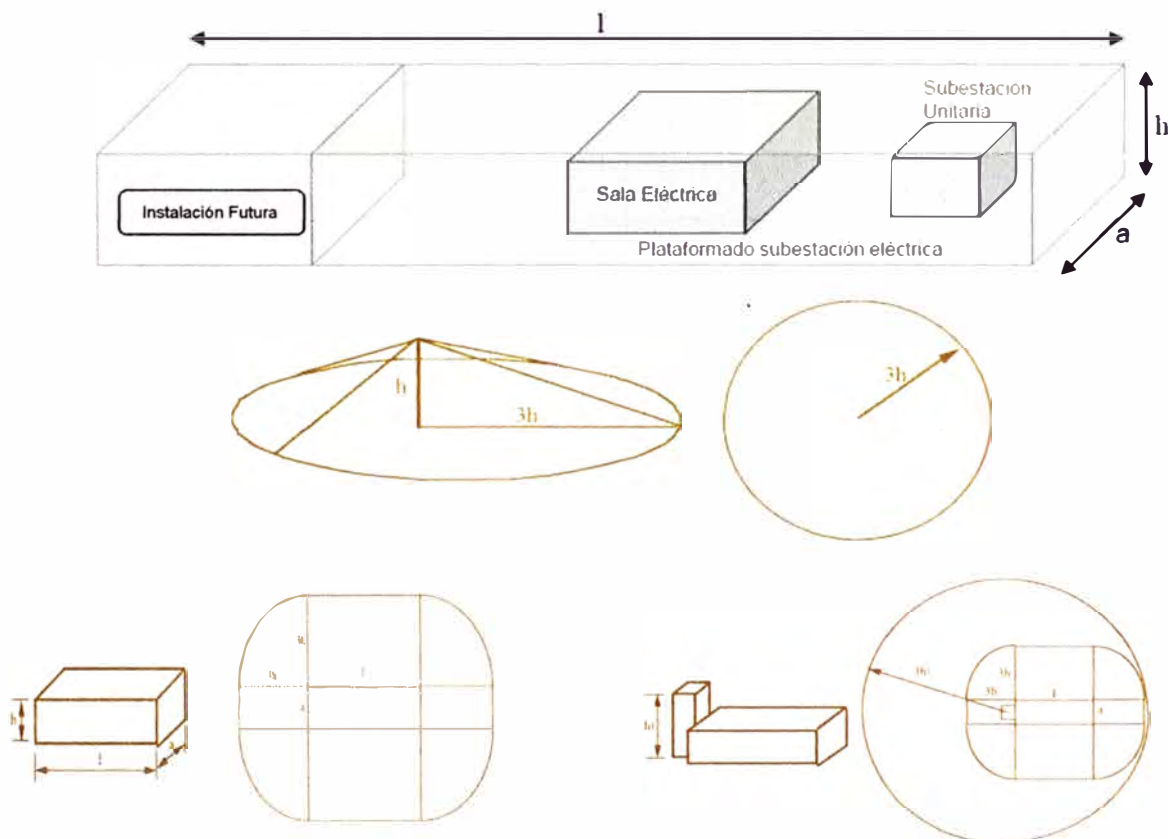
$$N_d = N_g \times A_e \times C1 \times 10^{-6} / \text{año} \quad (4.2)$$

Donde:

- $N_g$ : Densidad anual media de impactos de rayos donde está ubicada la subestación (# impactos/año/km<sup>2</sup>)
- $A_e$ : Superficie de captura equivalente de la estructura aislada.
- $C1$ : Coeficiente relacionado con el entorno

**Calculo de la Superficie de captura equivalente de la estructura aislada ( $A_e$ )**

Será Superficie de captación equivalente será la superficie sobre el suelo que tiene la misma probabilidad anual que la estructura de recibir el impacto directo del rayo. La superficie aislada será la superficie comprendida entre las líneas obtenidas por la intersección entre la superficie del suelo y una línea pendiente 1:3 que pasa por el punto más alto de la estructura y de la vuelta a ésta. En Fig. 4.1 se detallan las estructuras rectangulares longitud "l", ancho "a" y altura "h".



**Fig.4.1** Área a proteger en la subestación Eléctrica ubicada en el plataformado



$$A_e = a \times l + 6 \times h \times (l + a) + 9 \times \pi \times h^2 \quad (4.3)$$

En el caso de la subestación para una altura  $h = 6\text{m}$  (altura desde el plataformado al punto más alto de la sala)

$l = 60\text{ m}$  (longitud que cubre el plataformado de la subestación eléctrica)

$a = 20\text{ m}$  (ancho que cubre el plataformado)

$$A_e = (20)(60) + 6(6)(60+20) + 9(\pi)(6)^2$$

$$A_e = 5097.87\text{ m}^2$$

### Calculo de Situación relativa a la estructura (C1)

Se determina de la Tabla 4.1, Norma NF C17-102.

**Tabla 4.1:** Situación relativa a la estructura

Situación relativa a la estructura	C <sub>1</sub>
Estructura situada donde hay otras estructuras o arboles de la misma altura o más altas.	0.25
Estructura rodeada de estructuras más bajas.	0.5
Estructura aislada.	1
Estructura aislada sobre colina.	2

La subestación eléctrica estará cercana a la laguna Huayaococha (en una zona aislada) por lo tanto le corresponde, por tanto  $C_1 = 1$

Por tanto procedemos a calcular la **Densidad anual media de impactos de rayos** donde está ubicada la subestación ( $N_d$ ) (# impactos/año/km<sup>2</sup>)

Calculo de  $N_d$ :

- $N_d = N_g \times A_e \times C_1 \times 10^{-6} / \text{año}$
- $N_d = (4.02) \times (5097.87) \times (1) \times 10^{-6} / \text{año}$
- $N_d = 0.02049$  al año (Frecuencia anual media de impactos directos de rayos esperada en una estructura.)

### c. Frecuencia Aceptada de Rayos (Nc)

$$N_c = 5.5 \times 10^{-3} / C \quad (4.4)$$

Este valor será la frecuencia anual media aceptable de rayos sobre una estructura, donde la valoración se hace teniendo en cuenta los conceptos que a continuación se indican por medio de los coeficientes C, C2, C3, C4 y C5 correspondientes a:

- Tipo de construcción (C2= 0.5) Tabla 4.2
- Contenido de la estructura (C3= 3) Tabla 4.3
- Ocupación de la estructura (C4= 1) Tabla 4.4
- Consecuencias sobre el entorno (C5= 5) Tabla 4.5

Tabla 4.2: Coeficiente estructural

C2 - Coeficiente estructural			
ESTRUCTURA	METAL	COMUN	INFLAMABLE
Metal	0.5	1	2
Común	1	1	2.5
Inflamable	2	2.5	3

Tabla 4.3: Contenido de estructura

C3 – Contenido de la estructura	
Sin valor y no inflamable	0.5
Valor estándar o normalmente inflamable	1
Gran valor o particularmente inflamable	2
Valor excepcional, irremplazable o altamente inflamable	3

Tabla 4.4: Estructura habitada

C4 – Estructura habitada	
Inhabitada	0.5
Normalmente habitada	1
Dificultad para evacuación o riesgo de pánico	3

Tabla 4.5: Consecuencia del rayo

C5 – Consecuencia del rayo	
No requiere servicio continuo y sin consecuencias para el medio ambiente	1
Requiere servicio continuo y sin consecuencias para el medio ambiente	5
Consecuencias para el medio ambiente	10

Donde:

$$C = C2 \times C3 \times C4 \times C5 \quad (4.5)$$

Entonces:  $C = (0.5)(3)(1)(5) = 7.5$

Por lo tanto:

- $N_c = 5.5 \times 10^{-3} / C$
- $N_c = 5.5 \times 10^{-3} / 7.5$
- $N_c = 0.000733$

#### d. Selección del Nivel de Protección – Subestación Eléctrica.

Según la norma NF C17-102 si  $N_d > N_c$  es necesario un sistema de protección, para este caso se tiene que  $N_d = 0.02049$  y  $N_c = 0.000733$

Se observa que  $N_d > N_c$ , por lo tanto es necesario implementar un sistema de protección frente a descargas atmosféricas (pararrayos).

#### 4.3.2 Calculo de la Eficiencia de la Instalación (E).

$$E = 1 - (N_c/N_d) \quad (4.6)$$

$$E = 0.9642$$

(Para la zona que cubre el área de la subestación eléctrica y el platamado de instrumentación)

#### 4.3.3 Nivel de Protección Requerido.

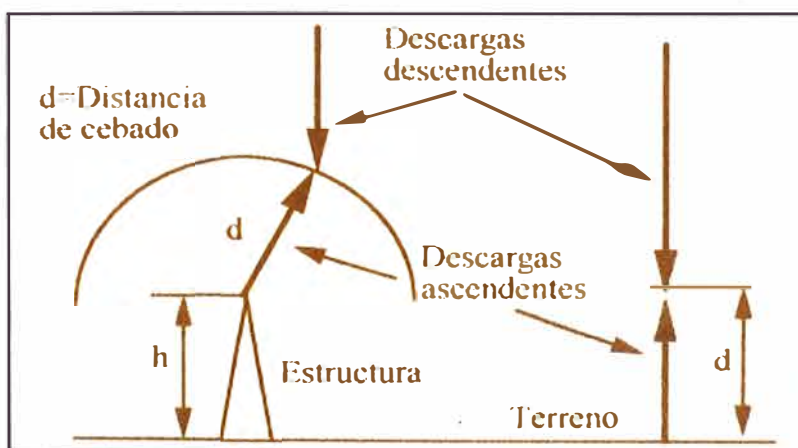
De acuerdo a la eficiencia de la instalación ( $E = 0.9642$ ) se obtiene el nivel de protección de la tabla adjunta:

**Tabla 4.6:** Niveles de protección

EFICIENCIA (E)	NIVEL DE PROTECCIÓN	PICO DE CORRIENTE I (kA)	DISTANCIA DE CEBADO D (m)
$E > 0.98$	Nivel I + adc	--	--
$0.95 < E < 0.98$	Nivel I	2.8	20
$0.80 < E < 0.95$	Nivel II	9.5	45
$0 < E < 0.80$	Nivel III	14.7	60

Para la eficiencia de  $E = 0.9642$  le corresponde una protección de Nivel I.

- I (kA) Corriente de Cresta Max. = 2.8 kA
- D (m) distancia de Cebado = 20 m



**Fig. 4.2:** Zona de protección de pararrayos

#### 4.4 Selección y Distribución del Pararrayos.

Criterio de selección del pararrayo:

- Usar poste o estructura de no más de 18 m (colocado encima de la horizontal que se quiere proteger), se limita la altura porque para mayores alturas no se logran mejoras apreciables del radio de protección. (Para el caso del Franklin France)
- Maximizar área de protección.
- Protección contra rayos positivos y negativos

##### 4.4.1 Radio de Protección $R_p$ (m).

Este valor es calculo de acuerdo a la formula de la norma NF C 17-102, para pararrayos con dispositivo de cebado PDC.

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)} \quad (4.7)$$

Este valor depende de los siguientes parámetros:

**D:** Radio de la esfera rodante del modelo electromagnético de acuerdo a la guía de evaluación de riesgos de impacto de rayo (NF C 17-102 anexo B), el estándar prevé tres tipos de protecciones requeridas para cada proyecto:

Tabla 4.7: Niveles de protección

D (m)	Protección
20	Nivel I
45	Nivel II
60	Nivel III

**h:** Altura real del pararrayos por encima de la superficie a proteger ( para alturas menores a 5 m los valores de  $R_p$  no se rigen por la formula, si no serán los valores de acuerdo a la tabla de radios de protección siguiente.

Tabla 4.8: Radios de protección NFC 17-102

Radios de protección de acuerdo a la norma NF C 17-102									
	Nivel I D = 20 m			Nivel II D = 45 m			Nivel III D = 60 m		
$\Delta T(\mu s)$	25	40	60	25	40	60	25	40	60
h (m)	Rp (m)			Rp (m)			Rp (m)		
2	17	24	32	23	30	40	26	33	44
3	25	35	48	34	45	59	39	50	65
4	34	46	64	46	60	78	52	57	87
5	42	58	79	57	75	97	65	84	107
6	43	58	79	58	76	97	66	84	107
8	43	59	79	59	77	98	67	85	108
10	44	59	79	61	77	99	69	87	109

• Nivel de protección calculado de acuerdo al apéndice B de la norma NF C 17-102  
 •  $\Delta T$  de acuerdo al apéndice B de la norma NF C 17-102

$\Delta T$ : Avance del cebado obtenido de las pruebas de evaluación de los PDC (pararrayos con dispositivos de cebado).

- $\Delta L$  (m) =  $V$ (m/ $\mu$ s)  $\cdot \Delta T$ ( $\mu$ s)
- $V$  : Velocidad de la descarga ascendente (m/ $\mu$ s)

#### 4.4.2 Cálculo del Radio de Protección $R_p$ (m).

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)}$$

- $h$  = 18 m (Altura del mástil de 18 m)
- $D$  = 20 m
- $\Delta L$  = 60 m (Para el modelo Prevectron 2, modelo S 6.60, de acuerdo a catalogo)

Tabla 4.9: pararrayo Prevectron

PREVECTRON 2	$\Delta T$ ( $\mu$ s)
S 6.60	60
S 4.50	50
S 3.40	40
TS 3.40	40
TS 2.25	25

PREVECTRON 2	$\Delta L$ (m)
S 6.60	60
S 4.50	50
S 3.40	40
TS 3.40	40
TS 2.25	25

High voltage test report carried out by the CNRS (French National Scientific Research Center) available on request

Reemplazando:

- $R_p = \sqrt{21(2 \cdot 20 - 21) + 60(2 \cdot 20 + 60)}$  Entonces :  $R_p = 79.97$  m

El cual verifica los valores de la tabla de radios de protección mostrada, para  $h > 5$ m.

#### 4.5 Radios de Protección de acuerdo al Fabricante.

De acuerdo al modelo Prevectron 2, modelo S 6.60, se tiene:

Tabla 4.10: Radios de protección Prevectron

## RADIOS DE PROTECCIÓN

Nivel I :  $D = 20$ m  
protección reforzada

h (m)	2	3	4	5	10
S 6.60	31	47	63	79	79
S 4.50	27	41	55	68	69
S 3.40	23	35	46	58	59
TS 3.40	23	35	46	58	59
TS 2.25	17	25	34	42	44

Nivel II :  $D = 45$ m  
protección intermedia

h (m)	2	3	4	5	10
S 6.60	39	58	78	97	99
S 4.50	34	52	69	86	88
S 3.40	30	45	60	75	77
TS 3.40	30	45	60	75	77
TS 2.25	23	34	46	57	61

Nivel III :  $D = 60$ m  
protección estándar

h (m)	2	3	4	5	10
S 6.60	43	64	85	107	109
S 4.50	38	57	76	95	98
S 3.40	33	50	67	84	87
TS 3.40	33	50	67	84	87
TS 2.25	28	39	52	65	69





#### 4.7 Presupuestos de Sistemas de Apantallamiento.

**Tabla 4.11: Presupuesto para el Suministro e Instalación de un Sistema de Apantallamiento No Convencional para la subestaciones eléctrica “Estación Booster”.**

Item	Descripción	Und	Cant.	COSTO TOTAL UNITARIO	SUB TOTAL
<b>1.0</b>	<b>Pararrayo Ionizante de Proteccion Reforzada, Prectron, Modelo "S 6.60" o Similar</b>	<b>GLB</b>			<b>\$5,629.16</b>
1.1	Suministro de Pararrayo Tipo PDC	UND	1.00	5,560.00	\$5,560.00
1.2	Instalacion de Pararrayo Ionizante Modelo S 6.60.	GLB	1.00	69.16	\$69.16
<b>2.0</b>	<b>Contador de Descargas (Incluye instalacion y equipo)</b>	<b>GLB</b>			<b>\$742.85</b>
2.1	Suministro de contador de descargas	UND	1.00	700.00	\$700.00
2.2	Instalacion de Contador de descargas.	GLB	1.00	42.85	\$42.85
<b>3.0</b>	<b>Poste Metálico para Pararrayo</b>	<b>GLB</b>			<b>\$5,076.36</b>
3.1	Excavacion con equipo y manual	m3	0.97	39.14	\$38.04
3.2	Eliminacion de material excedente	m3	0.41	11.82	\$4.89
3.3	Solado fc= 10 Mpa	m3	0.04	57.39	\$2.32
3.4	Encofrado y desencofrado	m2	0.56	41.42	\$23.11
3.5	Concreto fc= 30 Mpa	m3	0.56	65.14	\$36.41
3.6	Relleno y compactacion	m3	0.41	15.38	\$6.35
3.7	Instalación de Poste Metalico de 18m.	GLB	1.00	2,065.23	\$2,065.23
3.8	Suministro de Poste Metalico de 18m	UND	1.00	2,900.00	\$2,900.00
<b>4</b>	<b>Puesta a Tierra de sistema contra descargas atmosféricas (&lt;10 Ohm)</b>	<b>GLB</b>			<b>\$7,207.68</b>
4.1	Excavacion en terreno normal	m3	130.00	8.14	\$1,057.81
4.2	Transporte de Top Soil	m3	38.92	3.94	\$153.38
4.3	Tratamiento, relleno y compactacion de top soil	m3	38.92	12.82	\$498.82
4.4	Relleno y compactacion	m3	91.08	18.51	\$1,685.44
4.5	Eliminacion de material excedente	m3	38.92	7.40	\$287.99
4.6	Instalación de cable desnudo 4/0 AWG.	ml	30.00	34.85	\$1,045.55
4.7	Instalación de PAT, con Registro.	UND	1.00	835.04	\$835.04
4.8	Instalación de PAT, sin Registro.	UND	2.00	821.83	\$1,643.66
<b>5</b>	<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>				<b>\$18,858.05</b>

**Tabla 4.12: Presupuesto para el Suministro e Instalación de un Sistema de Apantallamiento Convencional para la subestaciones eléctrica “Estación Booster”.**

Item	Descripción	Und	Cant.	COSTO TOTAL UNITARIO	SUB TOTAL
<b>1.0</b>	<b>Pararrayo Proteccion Convencional Tipo Franklin.</b>	<b>GLB</b>			<b>\$519.16</b>
1.1	Suministro de Pararrayo Tipo Franklin	UND	1.00	450.00	\$450.00
1.2	Instalacion de Pararrayo Tipo Franklin	GLB	1.00	69.16	\$69.16
<b>2.0</b>	<b>Contador de Descargas (Incluye instalacion y equipo)</b>	<b>GLB</b>			<b>\$742.85</b>
2.1	Suministro de contador de descargas	UND	1.00	700.00	\$700.00
2.2	Instalacion de Contador de descargas.	GLB	1.00	42.85	\$42.85
<b>3.0</b>	<b>Poste Metálico para Pararrayo</b>	<b>GLB</b>			<b>\$5,076.36</b>
3.1	Excavacion con equipo y manual	m3	0.97	39.14	\$38.04
3.2	Eliminacion de material excedente	m3	0.41	11.82	\$4.89
3.3	Solado f'c= 10 Mpa	m3	0.04	57.39	\$2.32
3.4	Encofrado y desencofrado	m2	0.56	41.42	\$23.11
3.5	Concreto f'c= 30 Mpa	m3	0.56	65.14	\$36.41
3.6	Relleno y compactacion	m3	0.41	15.38	\$6.35
3.7	Instalación de Poste Metalico de 18m.	GLB	1.00	2,065.23	\$2,065.23
3.8	Suministro de Poste Metalico de 18m	UND	1.00	2,900.00	\$2,900.00
<b>4</b>	<b>Puesta a Tierra de sistema contra descargas atmosféricas (&lt;10 Ohm)</b>	<b>GLB</b>			<b>\$7,207.68</b>
4.1	Excavacion en terreno normal	m3	130.00	8.14	\$1,057.81
4.2	Transporte de Top Soil	m3	38.92	3.94	\$153.38
4.3	Tratamiento, relleno y compactacion de top soil	m3	38.92	12.82	\$498.82
4.4	Relleno y compactacion	m3	91.08	18.51	\$1,685.44
4.5	Eliminacion de material excedente	m3	38.92	7.40	\$287.99
4.6	Instalación de cable desnudo 4/0 AWG.	ml	30.00	34.85	\$1,045.55
4.7	Instalación de PAT, con Registro.	UND	1.00	835.04	\$835.04
4.8	Instalación de PAT, sin Registro.	UND	2.00	821.83	\$1,643.66
<b>5</b>	<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>				<b>\$13,546.05</b>

Para la protección de la subestación eléctrica “Estación Booster” con el sistema convencional se tendría que instalar dos pararrayos tipo Franklin el cual tendría un costo de **\$27,092.00**. En cambio si optamos en la instalación de un sistema No Convencional tendríamos que instalar solo un pararrayo tipo PDC con un costo de **\$18,656.05**.

#### 4.8 Análisis de Resultados.

A continuación se compara los radios de protección del sistema no convencional desarrollado anteriormente según la norma NFC 17-102 y el radio de protección por un pararrayo convencional según la norma NFPA 780.

**Sistema No Convencional:** En primer lugar se muestra el Cálculo efectuado según la norma NFC 17-102, observamos la zona de protección de un pararrayo tipo PDC o ESE es de 79metros, según los cálculos efectuados anteriormente.

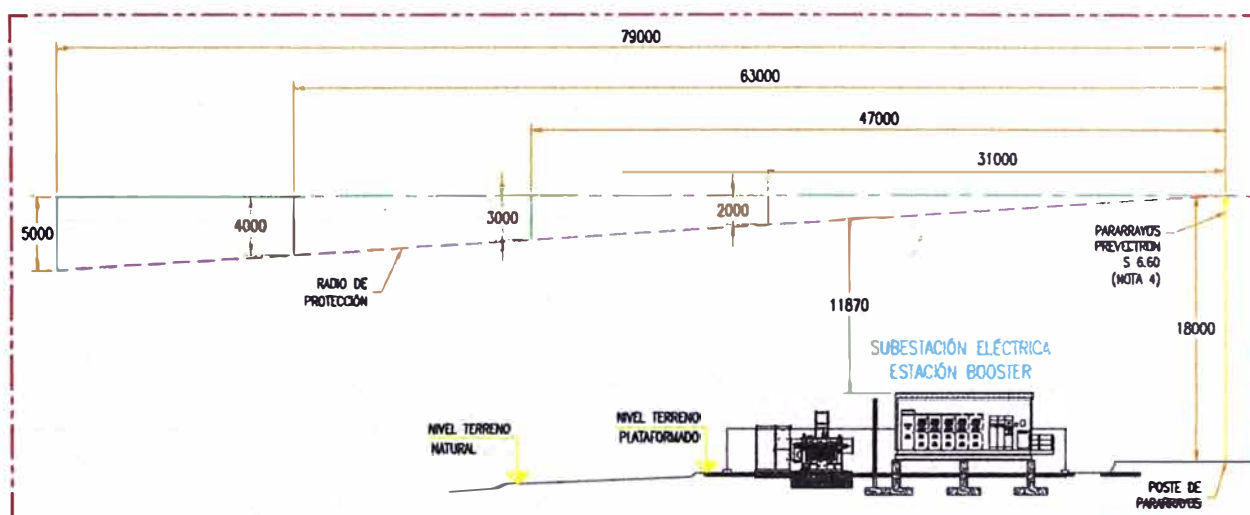


Fig. 4.4: Zona de protección de un pararrayo No Convencional

**Sistema Convencional:** En segundo lugar mostramos el cálculo realizado según método Electrogeométrico NFPA 780 - IEEE std 998 (1996), tomando una magnitud media de una descarga es de 31kA.

La distancia de impacto se expresa entonces como:  
Por tanto, la distancia de impacto promedio  $r_s = 93.19m$

$$r_s = 10I^{0.65}$$

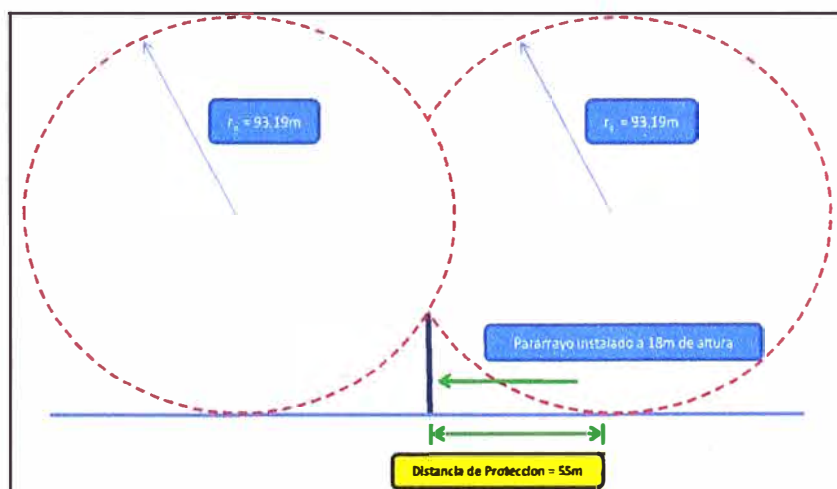


Fig. 4.5: Zona de protección de un Pararrayo convencional tipo Mástil

### Comparación de sistemas de Apantallamiento:

Se observa que el sistema de apantallamiento No Convencional tiene mayor radio de protección (Radio de protección = 79 metros / *Amarillo*) que el sistema convencional (Radio de Protección = 55 metros / *Verde*).

Además sabemos que el pararrayo tipo PDC puede operar como un tipo Franklin en caso sufriera algún desperfecto en operación, Y se observa que la curva de protección del método electrogeométrico cubre la subestación.

Una ventaja que se observa con el uso de pararrayos tipo PDC es la gran diferencia que existe entre las zonas de protección que ofrecen, como observamos el pararrayo tipo PDC presenta un radio de protección de 79 metros y un mayor volumen de zona de protección. A diferencia del convencional que tiene un radio de protección de 55 metros y un menor volumen de zona de protección.

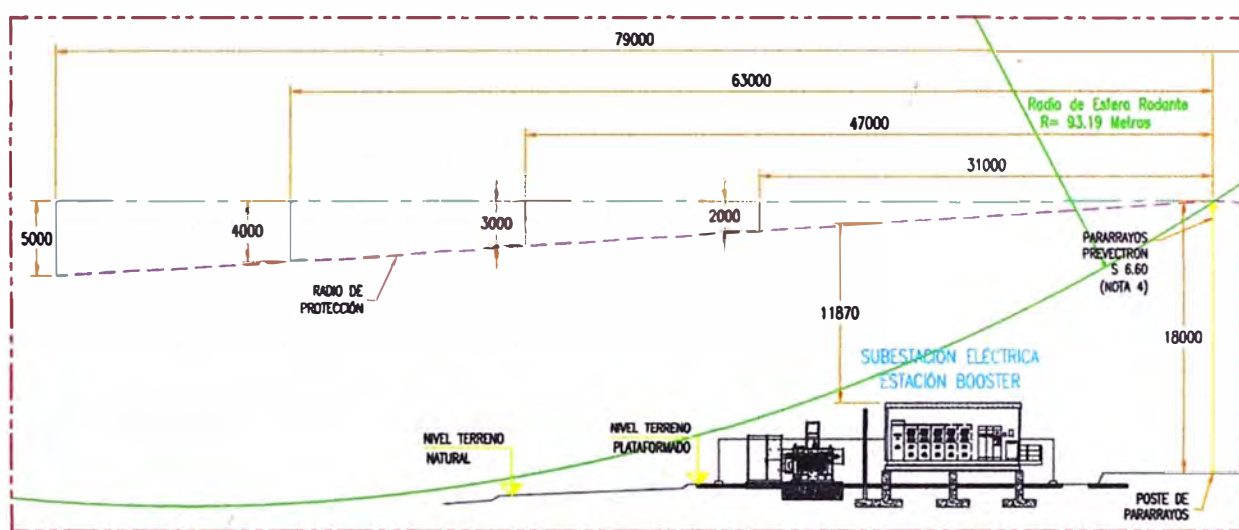


Fig. 4.6: Comparación de los dos Sistemas de Apantallamientos

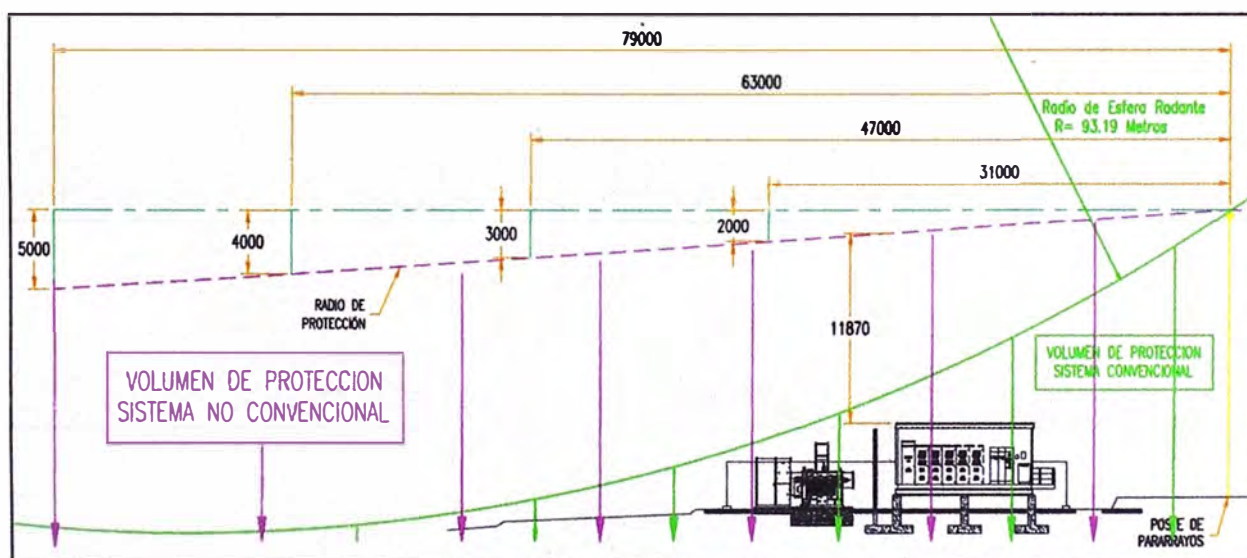


Fig. 4.7: Ilustración de las zonas de protección de los Sistemas de Apantallamiento.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

1. Los sistemas de apantallamiento no convencionales brindan mayor radio y volumen de protección para las subestaciones eléctricas contra descargas atmosféricas directas.
2. Los sistemas de apantallamiento no convencionales pueden operar como un sistema convencional, aplicándose la norma NFPA-780 para el cálculo de sus radios de protección.
3. Los sistemas de apantallamiento no convencional con pararrayos PDC ofrecen menores costos ya que se requieren un número menor de ellos para cubrir una misma área en comparación con los pararrayos convencionales.

### **RECOMENDACIONES**

1. El modelo de la estructura tripolar de las nubes de tormenta ha desplazado a los modelos de convección y de precipitación, como el más aceptado, al explicar cómo se distribuyen las cargas en las nubes, para provocar descargas atmosféricas del tipo positivas o negativas.
2. El proceso de descarga del rayo puede repetirse varias veces, produciendo descargas múltiples (al menos el 50% de los rayos son múltiples), con intervalos entre descargas entre los 0.0005 a 0.5 segundos.
3. La mayor cantidad de rayos son del tipo negativos (90% - Descarga Nube - Tierra) y en menor cantidad los del tipo positivos.
4. No hay argumentos suficientes que sustente la posibilidad de evitar mediante un dispositivo CTS que un rayo haga impacto en una estructura, a lo sumo se puede confiar en ellas en calidad de captores convencionales.
5. Para los pararrayos tipo ESE o PDC no existe una norma internacional que avale su funcionamiento, esto porque la comunidad científica a la fecha no ha llegado a un acuerdo de aceptarla. Solo existen normas nacionales que dan fe de su funcionamiento, como la empleada como referencia en este informe, la norma francesa NFC 17-102.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Rakov, V., Uman, M. "Lightning", 687 pp. Cambridge 2005, UK ISBN 0-521-58327-6.
- [2] Mackerras, D., Darveniza, M., Liew, A. C. "Review of Claimed Enhanced Lightning protection of Buildings by Early Streamer Emission Air Terminals" IEE Proc. –Sci. Meas. Technol. Vol 144. N° 1, Enero 1997.
- [3] Moore, C. B., Aulich, G. and Rison, W. "Responses of Lightning Rods to Nearby Lightning" International Conference on Lightning and Static Electricity, Aerospace Congress and Exhibiton, Seattle, USA, 10-14 de Setiembre, 2001.
- [4] National Fire Protection Association. "NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems" Edición 2004.
- [5] International Electrotechnical Comission."International Standard CEIIEC 62305-1. to 4 Protection Against Lightning" 2006.
- [6] Ramírez, J. "Instalaciones Eléctricas Generales", 3era Edición, España 1975.
- [7] Thompson, P; O'Brien, R. "Fenómenos Atmosféricos", 1ra Edición, Editorial Offset Multicolor, México, 1970.
- [8] Comité 33 de la CIGRE. "Comité de Coordinación del Aislamiento", 2000.
- [9] Golde, R.H. "Lightning Protection", 1ra Edición, Editorial E. Arnold, Inglaterra, 1975
- [10] Carlos Felipe Ramírez, Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión, 2da Edición, 1991.
- [11] C. Briozzo y M. Simon, "Pararrayos no Convencionales", Senior Member, IEEE
- [12] Mousa A. "The Applicability of Lightning Elimination Devices to Substations and Power Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 13, N° 4, Octubre 1998.
- [13] Cooray,V. and Zitnik,M, "On Attempts to Protect a Structure from Lightning Strikes by Enhanced Space Charge Generation", 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.
- [14] Zipse, Donald W., "Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37 N° 2, Marzo - Abril 2001.