

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas

### 1. Descargas atmosféricas.

Se han desarrollado numerosas teorías en cuanto a la formación de las cargas en las nubes. Se trata de un proceso complicado, del cual adoptaremos las conclusiones (verificadas mediante experimentación) que las descargas atmosféricas se deben a la formación de nubes cargadas con electricidad estática, generalmente carga negativa en la parte inferior, y carga positiva en la parte superior de la nube. Como consecuencia de estas cargas, se genera un campo eléctrico cada vez más intenso entre nubes vecinas, así como entre las nubes y tierra.

El rayo es una descarga transitoria de elevada intensidad, donde la mitad de estos rayos ocurren en el interior de la nube, y la otra mitad se dan entre nube y tierra.

Las descargas atmosféricas tienen su origen en las nubes llamadas Cúmulos Nimbus, con pisos cercanos a los 1000 metros y techos en los 12000 metros. Dentro de la nube hay producción de vientos de hasta 220 Km/h y hielo que constituirá el granizo, con formaciones de diferentes tamaños. Estos vientos producen, en la generalidad de los casos y como ya hemos anticipado, cargas eléctricas en las nubes, positivas en la parte superior y negativas en su parte inferior.

En el estudio y cálculo de sobretensiones, un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad tanto como positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, 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). 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 de 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. En la figura 1.1 se pueden ver las diferencias entre las cuatro categorías comentadas.

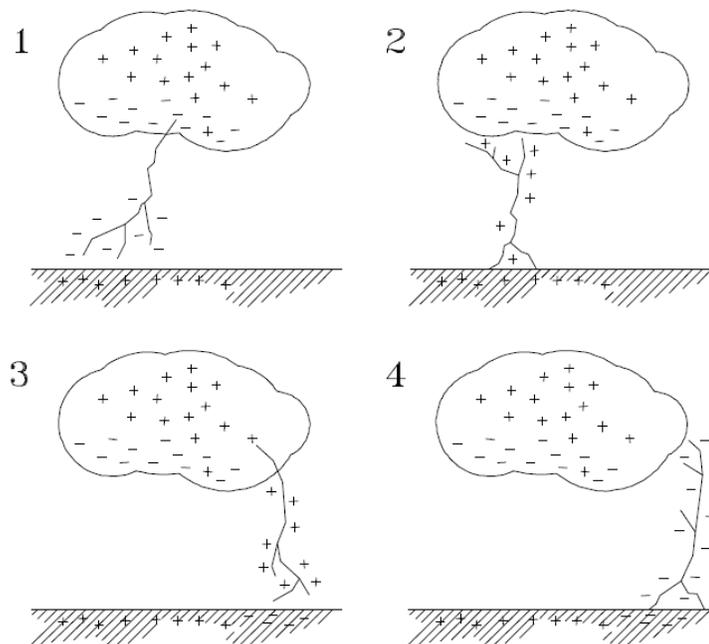


Figura 1.1 – Tipos de rayo entre nube y tierra.

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 2 - Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Los rayos procedentes de una nube, tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de este área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20 % de que una segunda descarga caiga a 2, 3, o 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3,5 km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario un elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución.

La Figura 1.2 describe el proceso completo de un rayo. En una primera fase el canal se propaga desde la nube hasta tierra en una serie de pasos discretos (descarga guía, o leader stroke, o stepped leader). El canal se ha iniciado en el interior de la nube a partir de un proceso preliminar de ruptura dieléctrica, aunque no existe en la actualidad un acuerdo sobre la forma exacta y localización de este proceso. El canal se propaga en direcciones aleatorias, con saltos discretos de 10 a 80 m de longitud, a una velocidad media de aproximadamente  $1,5 \text{ a } 2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ . La corriente media del canal se encuentra entre 100 y 1000 A. Mientras la punta del canal se acerca a tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos de tierra o en irregularidades de la superficie aumenta hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del aire. En ese momento se inician descargas desde esos puntos hasta que contactan con el canal. Una vez el canal ha contactado con tierra, comienza a descargarse por medio de una onda ionizante que se propaga hacia la nube a lo largo del canal previamente ionizado. Este proceso se conoce como primera descarga de retorno (o return stroke). La velocidad de la corriente de retorno del rayo típicamente toma valores de  $1/5 \text{ a } 1/3$  de la velocidad de la luz en el vacío, variando con las condiciones atmosféricas, y decreciendo con la altura. El tiempo total transcurrido en la propagación de tierra a la nube es del orden de  $70 \mu\text{s}$ . La primera descarga de retorno produce un pico de corriente del orden de 30 kA. Cuando la descarga de retorno cesa, el proceso que envuelve al rayo, incluyendo varios procesos de descarga en el interior de la nube, podría finalizar. En este caso, este proceso es llamado rayo de un único impacto. Por otro lado, si la nube dispone todavía de carga adicional, otro canal continuo puede propagarse hacia abajo a lo largo del primer canal residual e iniciar otra descarga de retorno. Algunos de estos segundos canales actúan como los primeros porque no siguen el canal de retorno previo. Los segundos canales y las subsiguientes descargas de retorno normalmente no están ramificados.

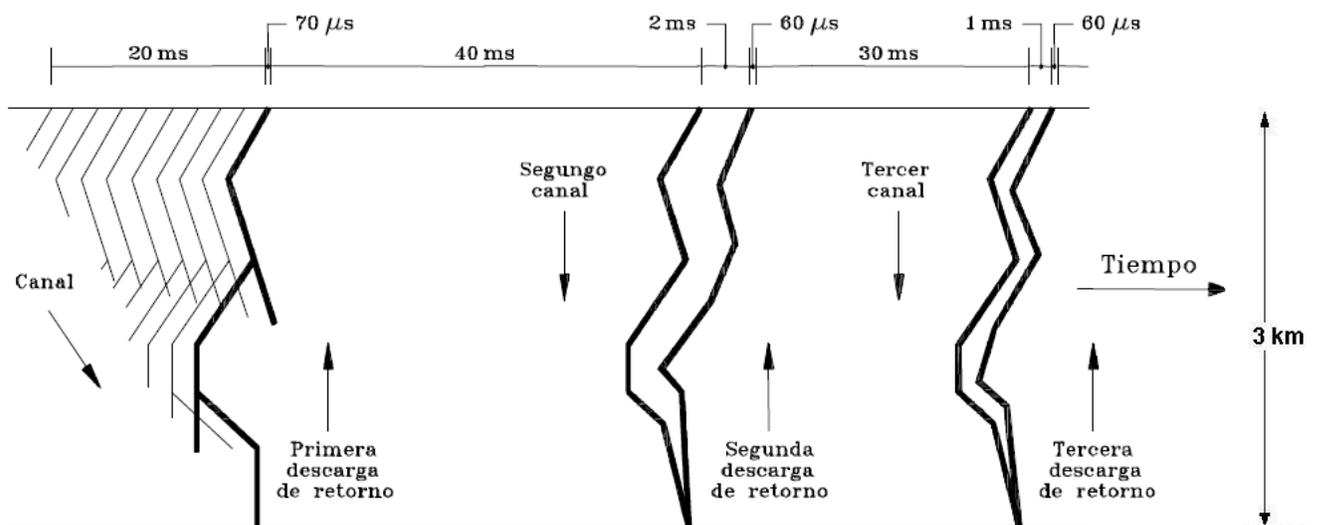


Figura 1.2 – Fases de un rayo.

### 1.1 Forma de Onda de la corriente de un Rayo.

Desafortunadamente, todas las descargas de un rayo, o descargas en diferentes rayos, no tienen igual severidad. Sus amplitudes y formas de onda varían estadísticamente. La forma de onda de la corriente de retorno depende fuertemente de la polaridad del rayo. En rayos de polaridad negativa, la segunda descarga tiene una forma de onda diferente de la primera, presentando generalmente un frente más rápido y una duración menor. Los impulsos positivos tienen un frente de onda más lento y una duración más prolongada que los negativos.

Se han realizado numerosas medidas experimentales sobre la corriente en la base del canal de una descarga. La Figura 1.3 muestra la forma de onda de la corriente de retorno (definida por Anderson y Eriksson durante sus estudios en el año 1980<sup>1</sup>), donde  $T_{10}$  es el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente de pico del rayo, y  $T_{30}$  es el intervalo de tiempo entre el 30% y el 90% de la corriente de pico. Los valores de corriente se encuentran normalizados.

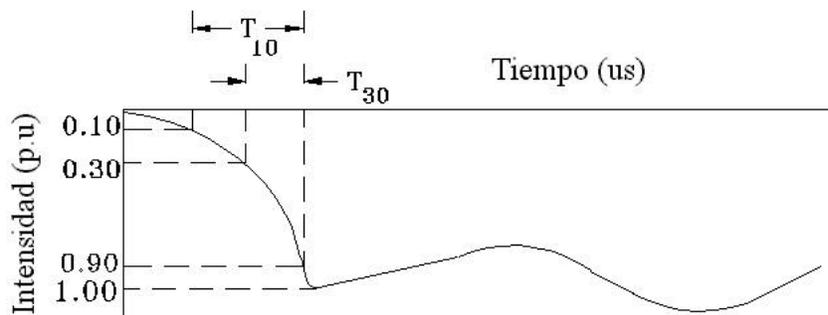


Figura 1.3 – Típica forma de onda de la corriente de retorno de un rayo.

De manera simplificada se puede utilizar una onda con forma en doble rampa para la corriente del rayo (ver Figura 1.4).

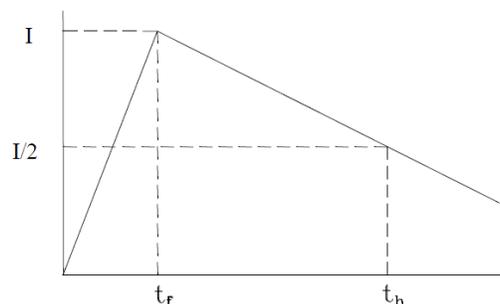


Figura 1.4 – Onda de descarga en doble rampa.

En este apunte se ha asumido que el primer pico de la forma de onda presentada en la Figura 1.3 coincide con el pico de la onda de corriente idealizada con forma en doble rampa de la Figura 1.4. El tiempo de frente equivalente  $t_f$  se obtiene a partir de  $T_{30}$ ,  $t_f = T_{30}/0,6$ .

Para los cálculos de protecciones contra descargas atmosféricas, puede asumirse una forma de onda positiva para la corriente de retorno del rayo y además se va a considerar que la forma de onda permanece constante durante todo el proceso de descarga (los valores de sus parámetros

<sup>1</sup> Anderson RB, Eriksson AJ. Lightning parameters for engineering application. Electra 1980.

## ***Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 4 -***

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

característicos: corriente de pico, tiempo de frente y tiempo al valor medio de la corriente de pico permanecerán constantes).

Normalmente se define esta onda mediante tres parámetros (ver Figura 1.4):

- a) Su valor máximo o de pico, 1 a 400 kA, 30 kA es el más representativo.
- b) El frente de onda, o tiempo de frente, o tiempo de subida  $t_f$  necesario para alcanzar este valor de pico. Es muy breve, variando entre 1 y 30  $\mu$ s, 2  $\mu$ s es el más representativo.
- c) El tiempo de decrecimiento, o cola de onda, o tiempo a valor medio de la corriente de pico (o tiempo  $t_h$ ) necesario para que la onda disminuya a un 50% de su valor máximo. Varía entre 10 a 250 ms, siendo 50 ms el valor más representativo.
- d) Descargas por rayo: 1 a 26, valor medio 4.

### **1.2 Función de Probabilidad del Rayo.**

La función de distribución acumulada de la corriente de pico de una descarga puede aproximarse mediante una distribución fraccional. Así, la probabilidad de que la corriente de pico  $I_p$  sea mayor que un valor  $I_0$  se puede obtener según la siguiente expresión:

$$F(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}} \quad [1]$$

La función de densidad de probabilidad de la corriente de pico, que representa la probabilidad de que el valor de pico de la corriente inyectada por el rayo sea igual a  $I$ , es la derivada de la ecuación anterior:

$$f(I) = \frac{n_c}{I_{50}^{n_c}} \cdot \frac{I^{n_c-1}}{\left[1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}\right]^2} \quad [2]$$

Donde  $n_c$  e  $I_{50}$  pueden obtenerse según los valores recomendados para el estudio de líneas de distribución, estructuras y pararrayos (IEEE Std 1410) y son  $n_c=2,6$  e  $I_{50}=31$  kA; y para el estudio del impacto en Subestaciones (o Estaciones Transformadoras) (IEEE Std 998) se propone un valor medio de  $I_{50}=24$  kA para descargas en tierra. La función de distribución acumulada de la corriente de pico de descarga para el estudio del impacto en subestaciones se muestra en la siguiente curva:

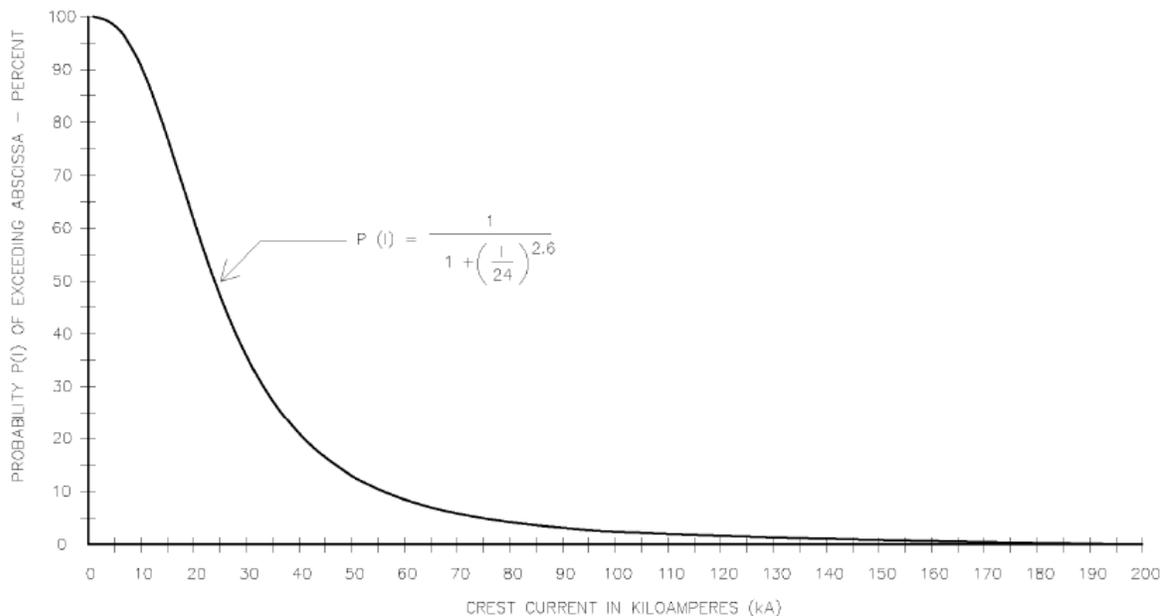


Figura 1.5 – Probabilidad que la corriente pico de descarga de retorno exceda los valores de abscisa para terreno llano.

### 1.3 Nivel Cerámico.

La probabilidad de caída de rayos en una determinada zona se mide mediante el nivel cerámico, es decir, la cantidad de días en promedio en el año durante los cuales en un lugar dado ocurren tormentas eléctricas, o al menos se escuchan truenos ( $T_d$ [días/año]), de un lugar del planeta. Se suele representar en forma de curvas isocerámicas, que grafican los peligros potenciales de una determinada zona. Estos niveles son comparativamente bajos en el caso del sur argentino, y deben de considerarse en la zona centro y norte noreste (ver Figuras 1.6 a y b). La densidad cerámica es el número promedio anual de rayos a tierra (o impacto de rayos) que “caen” en un área de 1 km<sup>2</sup>:  $N_g$  (rayos/km<sup>2</sup>.año).

En la siguiente ecuación [3], si  $a$  designa el ancho (en metros) de la faja de terreno cubierta por una línea dada, y  $T_d$  es el nivel cerámico de la zona, la cantidad de descargas atmosféricas a que podrían estar sujetos 100 km de línea sería:

$$D = 0,01 \cdot a \cdot T_d \text{ [(descargas/año)/100 km]} \quad [3]$$

En caso de no estar disponible la densidad  $N_g$ , se la puede estimar mediante la siguiente fórmula (Según CIGRE - Anderson - Eriksson):

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \left[ \frac{\text{rayos a tierra}}{\text{km}^2 \cdot \text{año}} \right] \quad [4]$$

En las siguientes figuras se muestran los mapas de Argentina para niveles isocerámicos (Figura a) y densidades cerámicas (Figura b), y un mapa mundial de niveles isocerámicos.

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 6 -**  
**Cátedra:** Transmisión y Distribución de la Energía

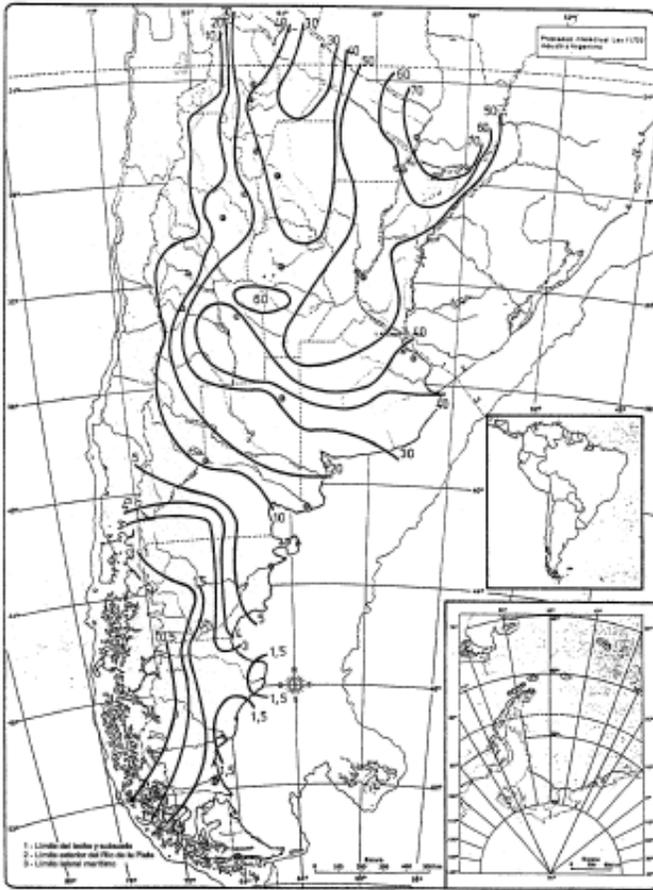


Figura a

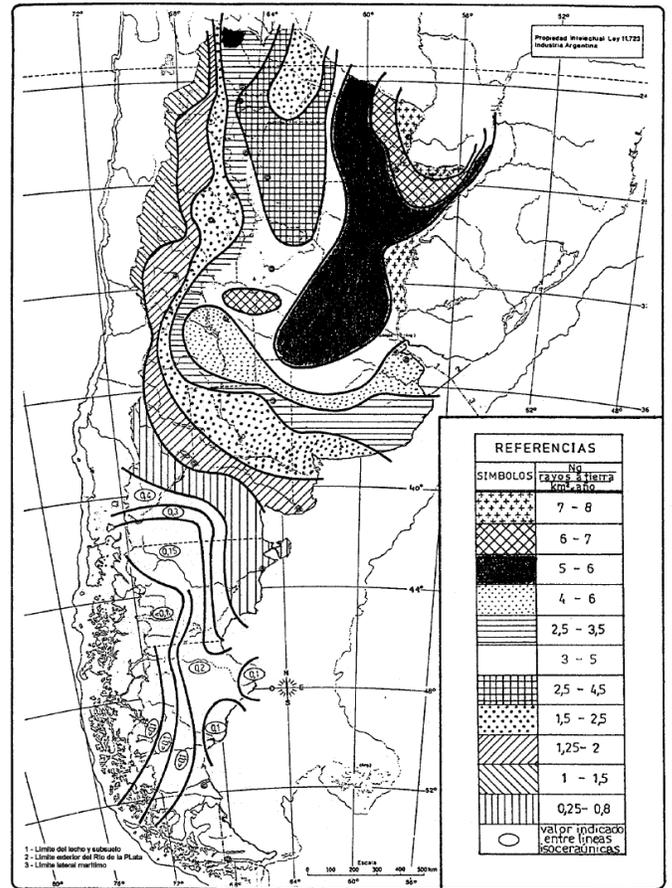
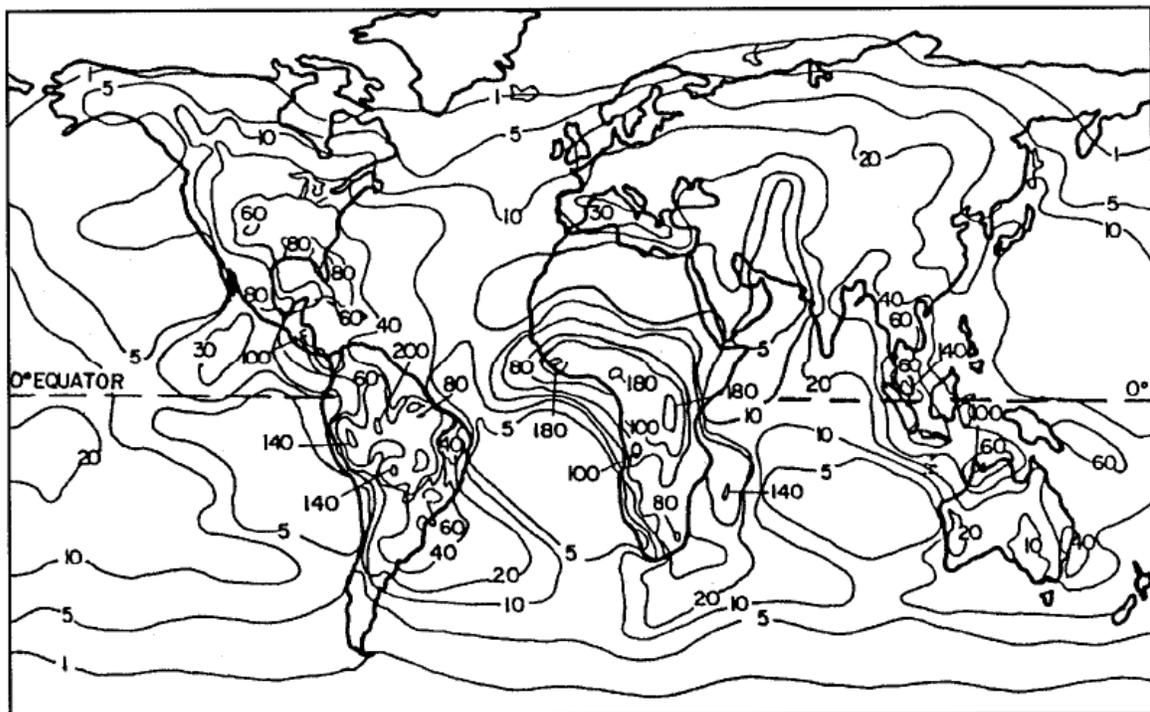


Figura b

Figura 1.6 – Niveles isocerámicos (Figura a), Densidades cerámicas Ng (Figura b), y Niveles isocerámicos en el mundo (debajo).



## ***Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 7 -***

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

### **1.4 Efectos debido a los rayos.**

Las sobretensiones y corrientes introducidas por el golpe de rayo, se propagan por las líneas y pueden penetrar Estaciones provocando:

- a. Efectos térmicos: Fusión de componentes, incendios, explosiones.
- b. Esfuerzos mecánicos debido a esfuerzos electrodinámicos entre conductores.
- c. Choque eléctrico por sobretensiones provocadas por incrementos del potencial en la propagación de la onda.
- d. De contorneos derivando en pérdidas de aislamiento y cortocircuitos o perforación de aislamientos.
- e. Peligrosa elevación de los potenciales de las tomas de tierra.
- f. Efectos electromagnéticos por la alta frecuencia, o de radiación e inducción.
- g. Efectos electroquímicos, acústicos y fisiológicos

Consecuentemente se tiene:

- ✓ Degradación de los materiales aislantes en forma brutal, provocando perforación del dieléctrico, o su envejecimiento prematuro, y posterior perforación.
- ✓ Perturbaciones en los circuitos de corrientes débiles ya sea de mandos o comunicaciones.
- ✓ Interrupción del servicio, cuando provocan fallas. Largas por reposición de componentes, o cortas por actuación de automatismos.

Peligro a seres vivos. Las tensiones de paso pueden provocar electrización y causar electrocución.

**2. Métodos de protección contra las Descargas atmosféricas.**

**2.1. Métodos Empíricos.**

**Angulo Fijo:** Utiliza ángulos verticales para determinar el número, la posición, y la altura de los cables de guarda, o de los pararrayos (ver Figuras 2.1 y 2.2).

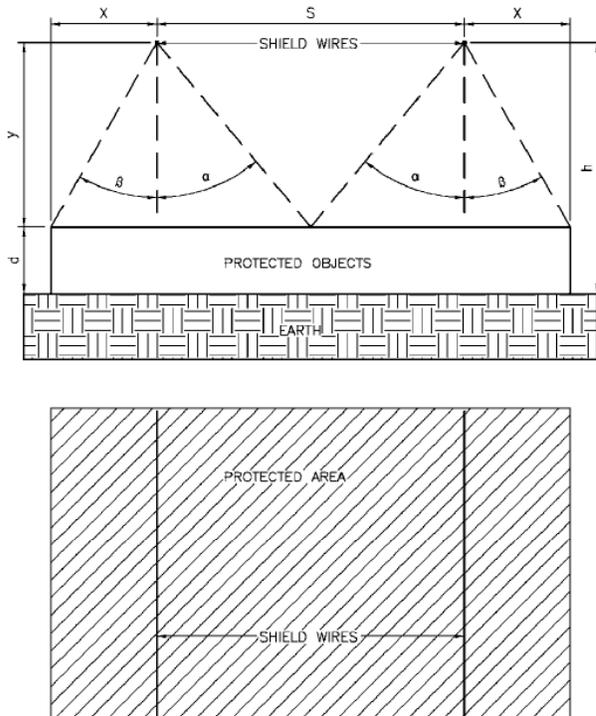


Figura 2.1 – Ángulo fijo para cables de guarda.

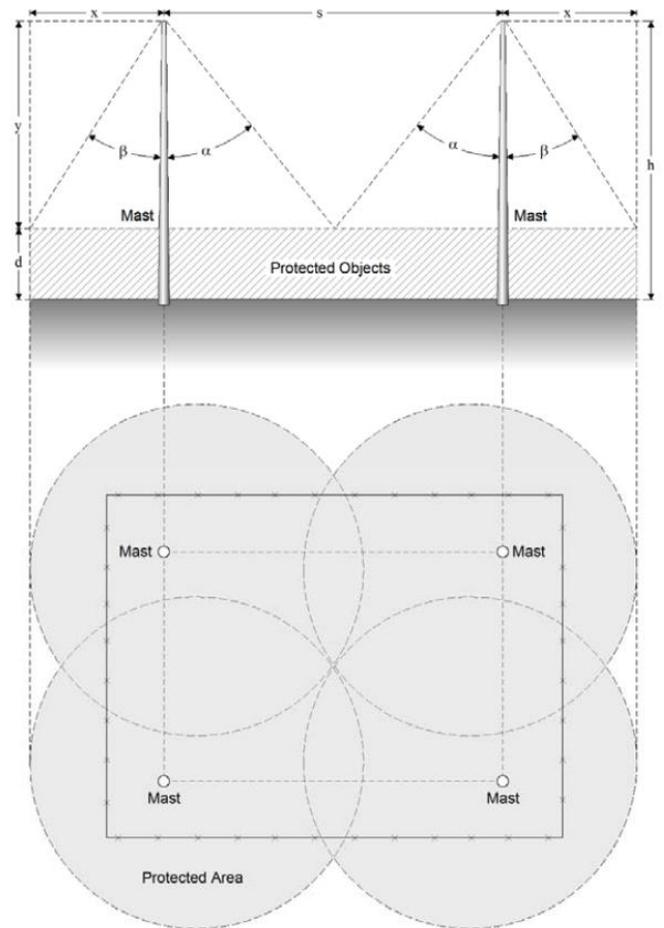
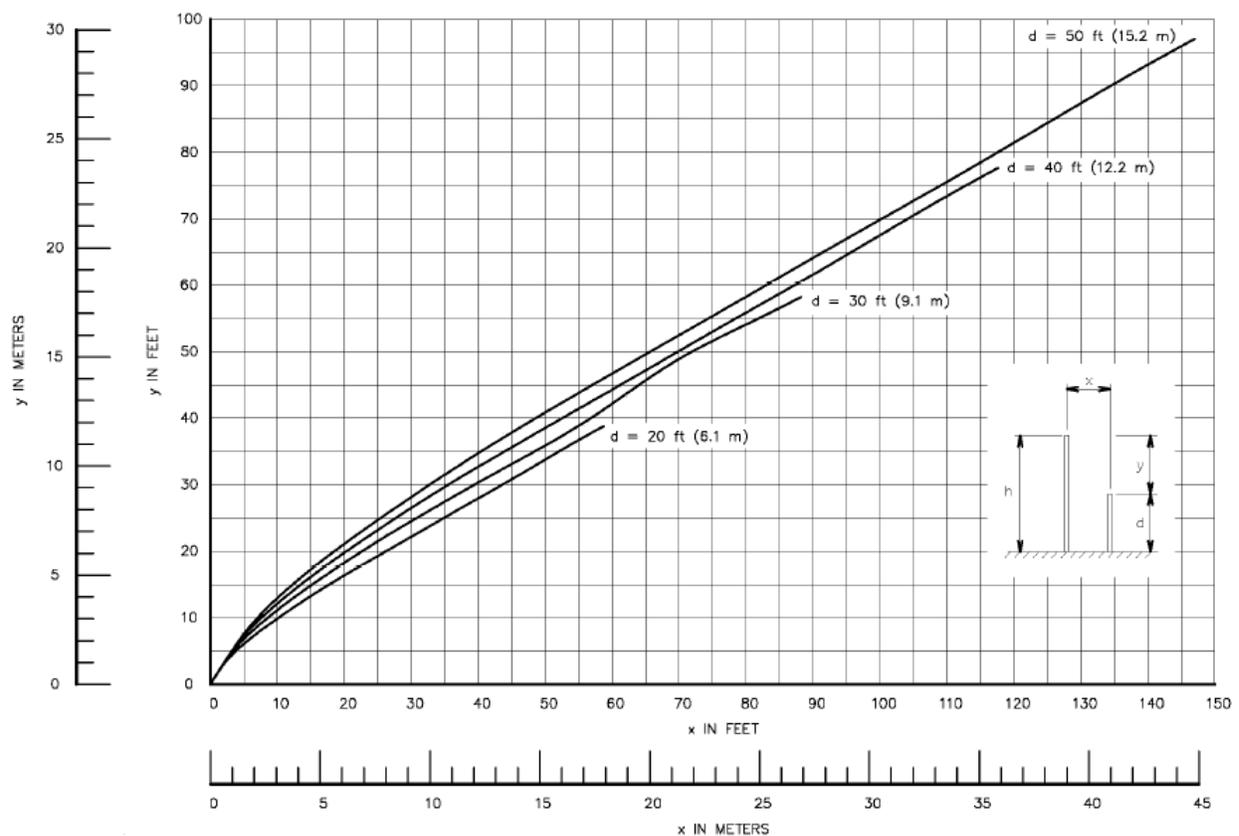


Figura 2.2 – Ángulo fijo para pararrayos.

Los ángulos dependerán del grado de exposición a los rayos, la importancia de la instalación a proteger, y el área física que ocupa dicha instalación. Haciendo referencia a las figuras 2.1 y 2.2, los ángulos comúnmente usados son:  $\alpha=45^\circ$  y  $\beta=30^\circ$  (según IEEE 998-2012).

**Curvas empíricas:** A través de experimentos, se obtuvieron una serie de curvas que relacionan la altura y el espaciado de los cables de guarda y pararrayos para diferentes tasas de fallas (0,1%, 1%, 5%, 10% y 15%). Comúnmente se utiliza una tasa de fallas de 0,1% para el diseño de los sistemas de protección de Estaciones Transformadoras.



**Figura 2.3 – Curva empírica para la protección mediante un único pararrayos y 0,1% de tasa de exposición.**

En la Figura 2.3 se muestra como se obtiene a través de las curvas empíricas, la altura del pararrayos  $h$ , para una determinada tasa de fallas, en función de la altura a proteger ( $d$ ) y la separación horizontal ( $x$ ) y vertical ( $y$ ) entre ellos. Existen otras curvas, contemplando un “aro” de protección alrededor del mástil, ó 2 mástiles (con y sin solapamiento), conductores horizontales de guarda (simples o dobles). A modo de ejemplo, colocamos en la Figura 2.3 y 2.5 sólo dos de estas gráficas, y el resto de las curvas se presentan en la Norma IEEE Std 998 – 2012.

**Áreas protegidas por pararrayos (en el punto 2.3.2.b hay una ampliación de este tema):**

La siguiente Figura 2.4(a) muestra un área que puede ser protegida por sólo 2 o más pararrayos. Si se utilizan 2, a partir de las curvas empíricas de la Figura 2.5, se obtiene información de la protección para el punto B (medio entre los mástiles), y para los puntos en los semicírculos alrededor de los mástiles, con radio  $x$ . A partir de las curvas, pueden obtenerse los valores para asegurar un área de protección, con tasa de fallas  $< 0,1\%$  de exposición (en la Figura 2.4 (b) se utilizan 4 pararrayos espaciados la misma distancia que en el caso de 2 mástiles). El área protegida puede ser mejorada, con el acercamiento de los mástiles y el solapamiento de las regiones.

# Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 10 - Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

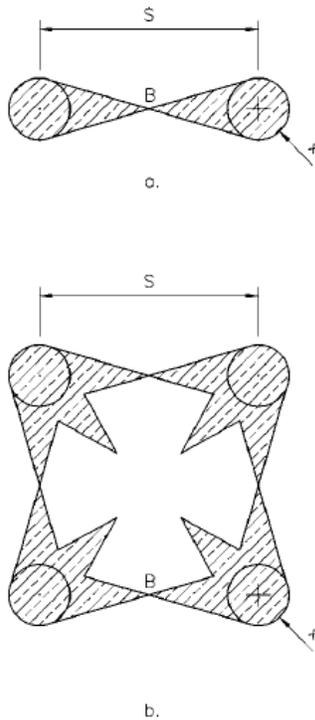


Figura 2.4 – Áreas protegidas con (a) 2 pararrayos, y (b) 4 pararrayos.

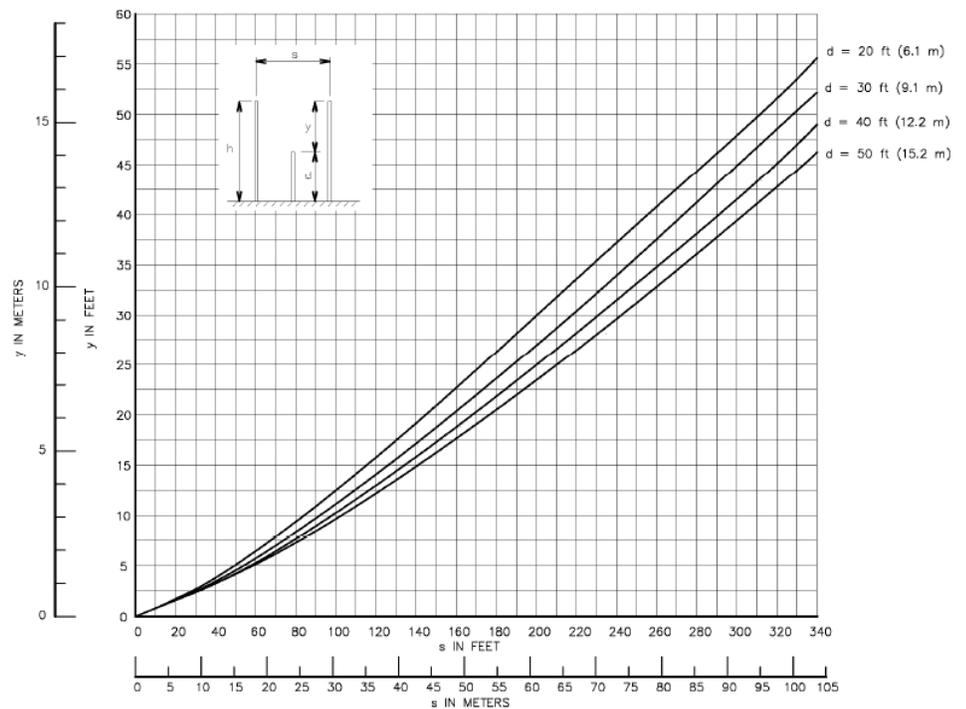


Figura 2.5 – Curva empírica para la protección mediante 2 pararrayos, sin solapar, y 0,1% de tasa de exposición.

## 2.2. Método Clásico.

### Generalidades

Las Estaciones Transformadoras tipo exterior y las líneas de transmisión deben protegerse contra las descargas atmosféricas directas e indirectas.

Dichas descargas afectan a las Estaciones en dos formas sustancialmente distintas; por una parte las descargas producidas sobre las líneas que llegan o salen de la Estación provocan ondas viajeras que se dirigen hacia ella, solicitando la aislación de los equipos que la componen. Por otra parte, deben considerarse las descargas que caen directamente sobre la Estación y eluden la acción del blindaje, incidiendo directamente sobre el equipamiento.

Por tales razones, en el diseño de la protección de una Estación se deben tener en cuenta ambos efectos, cada uno de los cuales necesita ser tratado en forma diferente.

El primero de los efectos mencionados, se evita mediante la instalación de descargadores de sobretensión convenientemente ubicados.

Las descargas directas provocan solicitaciones exigentes para las aislaciones de los equipos, debiéndose disminuir al mínimo posible el número de las mismas, con un costo económico razonable. Es práctica común utilizar hilos de guarda como sistema de protección.

**a) Sistema de protección por hilo de guarda**

Los hilos de guarda de Estaciones y líneas desempeñan dos funciones importantes:

- Proteger las líneas aéreas contra descargas atmosféricas siendo su objetivo primordial
  - Reducir la tensión inducida en la línea aérea por los rayos que caen en las cercanías,
  - Proteger los conductores de fase, absorbiendo las descargas atmosféricas,
  - Reducir la acción devastadora del rayo descargado directamente en la línea aérea.Para todo lo cual, tiene mera importancia la disposición con respecto a los conductores.
- Reducir el efecto de la corriente de cortocircuito y participando por lo tanto en la disminución de la resistencia de tierra, y disminuyendo las tensiones de paso que puedan poner en peligro a las personas o animales.

Al disminuir la resistencia de tierra se tiene una disminución en la influencia sobre los circuitos de telecomunicación situados cerca de la línea, en caso de producirse cortocircuito a tierra.

La acción protectora del hilo de guarda se determina por “zonas de protección” o también conocidos como “ángulos de protección”. Dichas zonas son fundamentales en la configuración de líneas eléctricas aéreas y Estaciones de Transformación, dado que la misma influye considerablemente sobre su diseño.

Inicialmente se había considerado la acción protectora del hilo de guarda teniendo en cuenta que la carga del conductor de fase (debido a la influencia atmosférica), estaba limitada por la vecindad y la capacidad que existía con dicho conductor. En base a esto, se habían ubicado los hilos de guarda al lado de los conductores de fase. Investigaciones realizadas considerando características y desarrollo del rayo, han demostrado que el principal peligro no se debe buscar en las pequeñas cargas por intermedio de los denominados golpes indirectos y la vecindad de las líneas eléctricas aéreas, sino en la magnitud de la carga producida por los golpes directos en los conductores. Con esto se ha decidido claramente que solamente los hilos de guarda, que en forma de una jaula de Faraday, protegen los conductores contra las nubes; efectuando una protección eficaz debiéndose ubicar los mismos sobre los conductores y no al lado de ellos. El costo consiste no solamente en el hilo de guarda propiamente dicho, sino también tienen importancia los gastos por alargamiento y refuerzo de los soportes.

Los hilos de guarda o hilos de tierra se colocan 1 o 2 sobre los conductores de fase en la parte más alta de los soportes y conectados a tierra (figura 2.6a y 2.6b). Suele utilizarse como hilo de guarda el cable de acero galvanizado de 50 o 70 mm<sup>2</sup> o bien el cable de Al/Ac (la sección es únicamente por razones mecánicas). Para el dimensionado de los hilos de Al/Ac, se aplica una regla práctica aproximada la cual determina que la sección del hilo de guarda en acero es aproximadamente igual a la sección del alma de acero del conductor.

La descarga del rayo se produce cuando el gradiente eléctrico entre las nubes y el objeto que el rayo alcanza, sobrepasa el gradiente correspondiente a la rigidez dieléctrica del aire. El campo electrostático formado entre nubes y el suelo es uniforme, de modo que las superficies equipotenciales son planos paralelos a la superficie de la tierra, la que siempre tiene el potencial cero (Figura 2.7). El hilo de guarda colocado en el extremo del soporte a una cierta altura  $H$ , corresponde a un potencial  $V_H = E_0 \cdot H$ .

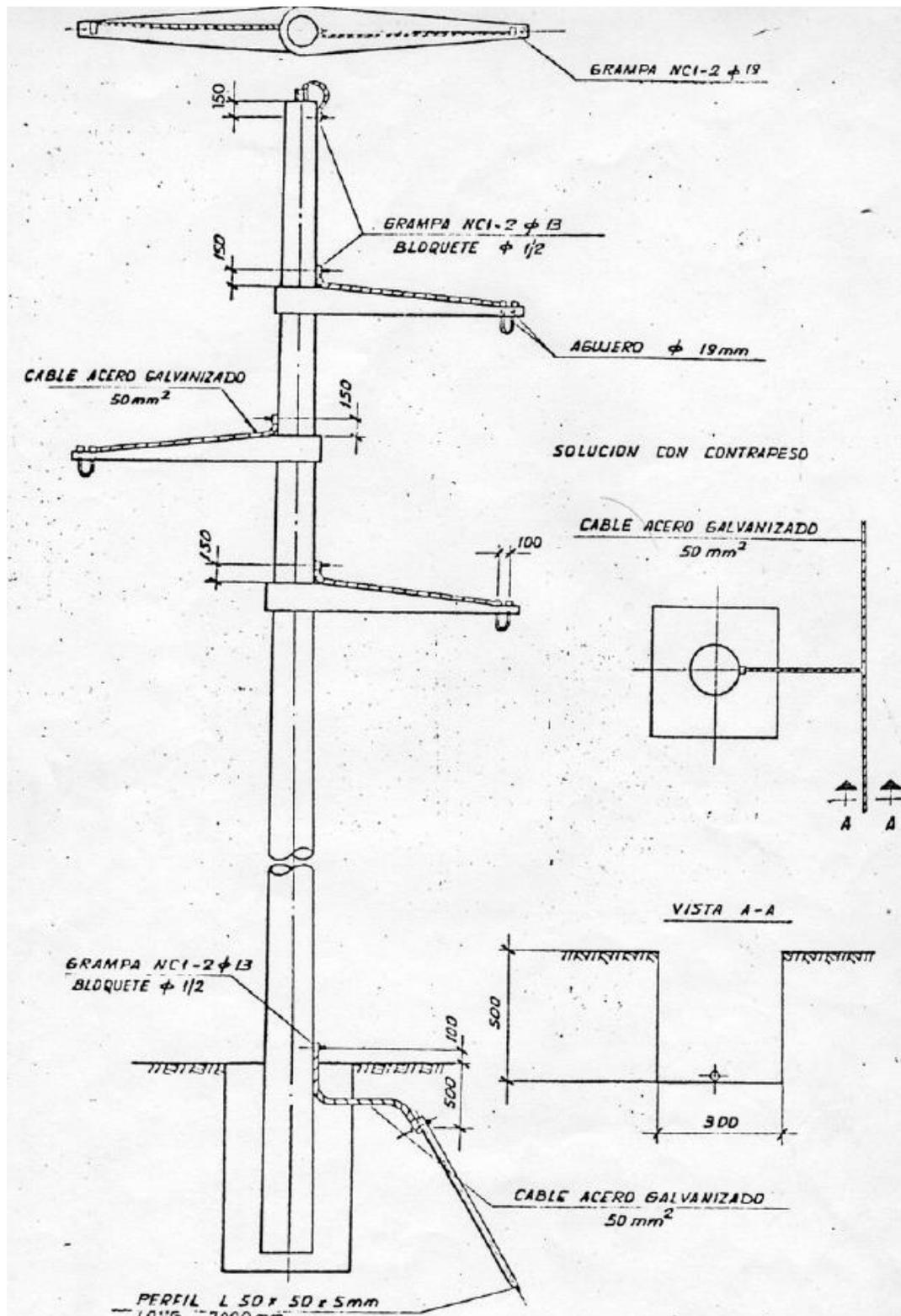


Figura 2.6b – Puesta a tierra del hilo de guarda y soporte.

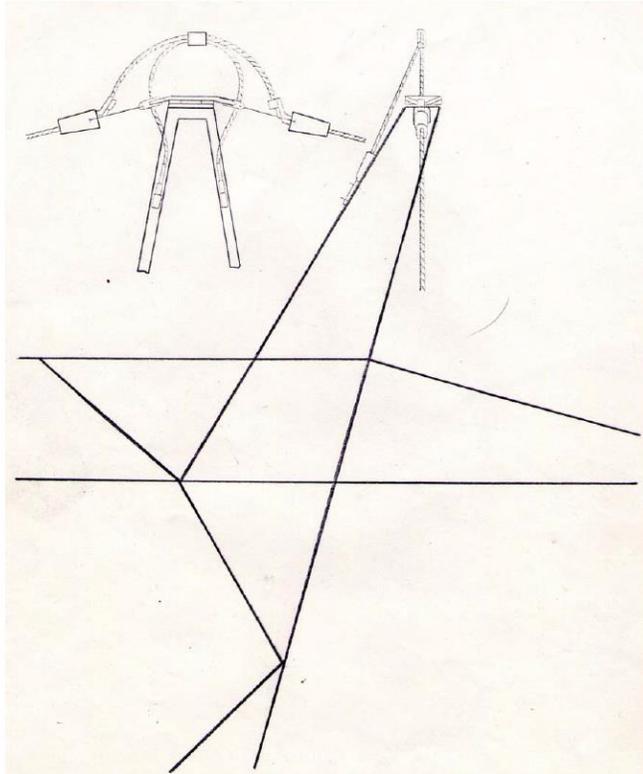


Figura 2.6a – Amarre del hilo de guarda.

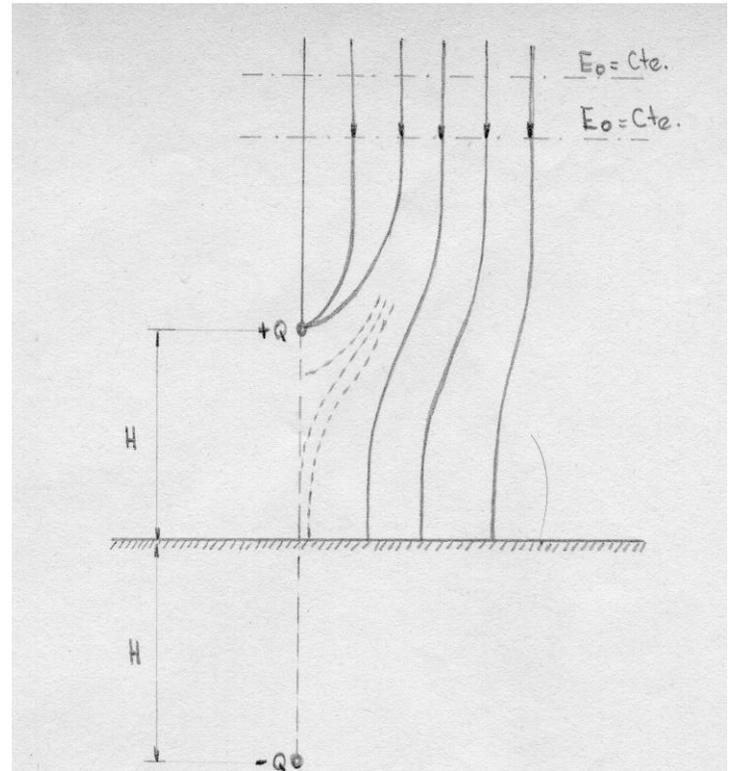


Figura 2.7 – Influencia del hilo de guarda en el campo electrostático de la atmósfera.

El problema de cómo colocar el hilo de guarda para conseguir una protección total contra las descargas directas de los rayos a los conductores ha sido muy discutido, no llegándose hasta ahora a ningún resultado definitivo. Por ello se enuncian las principales propuestas para resolver el problema, a fin de elegir una solución adecuada que garantice el funcionamiento seguro de la línea y que sea económicamente aceptable. En la Figura 2.8 se muestran las distintas propuestas, las cuales se analizan a continuación.

1. BEWLEY: Asume que el rayo choca siempre el objeto más próximo a la nube cargada y deduce de esta hipótesis las fórmulas para la colocación de los hilos de guarda. Estas fórmulas dependen de la altura de las nubes cargadas, lo que es un factor difícil de determinar. Bewley llega a la conclusión de que, para las nubes de una altura de 5 a 30 veces la altura de los hilos de guarda sobre la tierra, el ángulo protector es de  $55^\circ$  a  $75^\circ$ .
2. WAGNER: En base a ensayos de laboratorio, recomienda adoptar un ángulo protector del hilo de guarda de  $30^\circ$  a  $40^\circ$  para los conductores externos y de  $70^\circ$  a  $80^\circ$  para los colocados entre los hilos de guarda.
3. GOLDE: Llega a la conclusión de que el ángulo protector del hilo de guarda es aproximadamente  $64^\circ$  y aumenta con la intensidad de la corriente del rayo.
4. LEWIS: Recomienda para conductores dispuestos horizontalmente, la aplicación de 2 hilos de guarda, colocados sobre los conductores a una altura igual a  $\frac{2}{3}$  de la distancia entre los conductores. La distancia entre los hilos de guarda debe ser igual a la existente entre los conductores. El ángulo protector resulta de  $36^\circ$  (Figura 2.9).

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 14 -**  
Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

5. SCHWAIGER: Determina la zona protectora del hilo de guarda como la zona incluida entre la vertical que pasa por el cable y el arco que pasa por el mismo cable y es tangente a la tierra. El radio del arco es igual a la altura del hilo sobre tierra. La zona de protección entre 2 hilos de guarda es la semicircunferencia de diámetro C igual a la distancia entre los mismos y cuyos puntos extremos coinciden con dichos hilos de guarda. Más claramente, la zona protegida por los hilos de guarda, está determinada por círculos de radios iguales a la altura sobre el suelo del hilo de guarda. La zona propiamente protegida, está aún disminuida por una zona de dispersión que hay que tomar en cuenta con un ancho del 2 al 4 % del radio correspondiente (Figura 2.10).
6. LANGREHR: Determina la zona protegida por el hilo de guarda de manera similar a Schwaiger, solamente que los centros de los arcos deben ser el doble de la altura del hilo de guarda sobre tierra.
7. GRÜNEWALD: Recomienda asumir el ángulo protector de 32°.

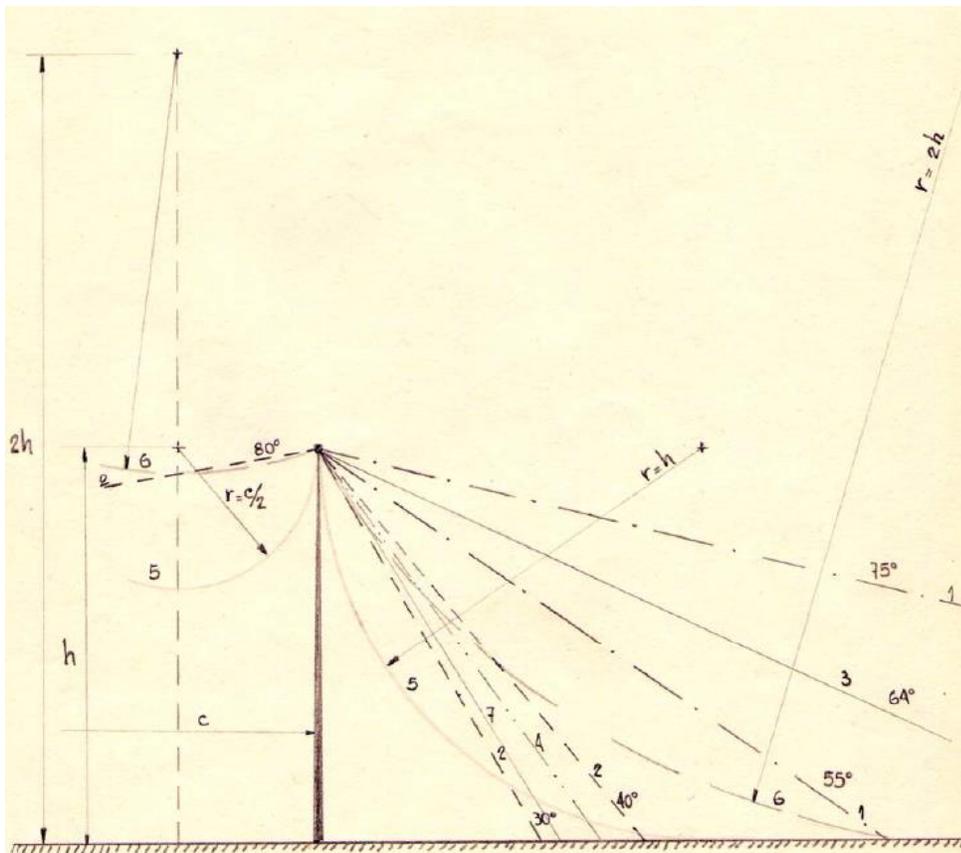


Figura 2.8 – Zona de protección de los hilos de guarda.

1.-	Zona protegida según	Bewley	(75° - 55°)
2.-	"	"	Wagner (30° - 40°)
3.-	"	"	Golde (64°)
4.-	"	"	Lewis (36°)
5.-	"	"	Schwaiger
6.-	"	"	Langrehr
7.-	"	"	Grünewald (32°)

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 15 -**  
Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

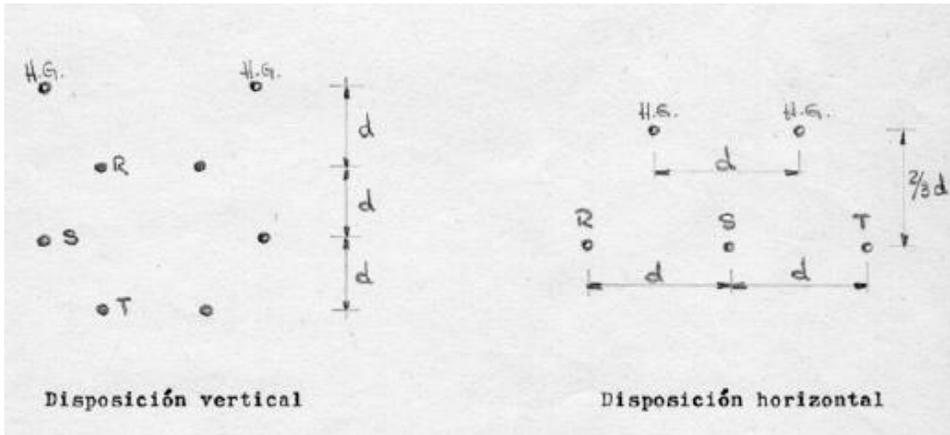


Figura 2.9 – Protección de una línea aérea de doble y simple terna según Lewis.

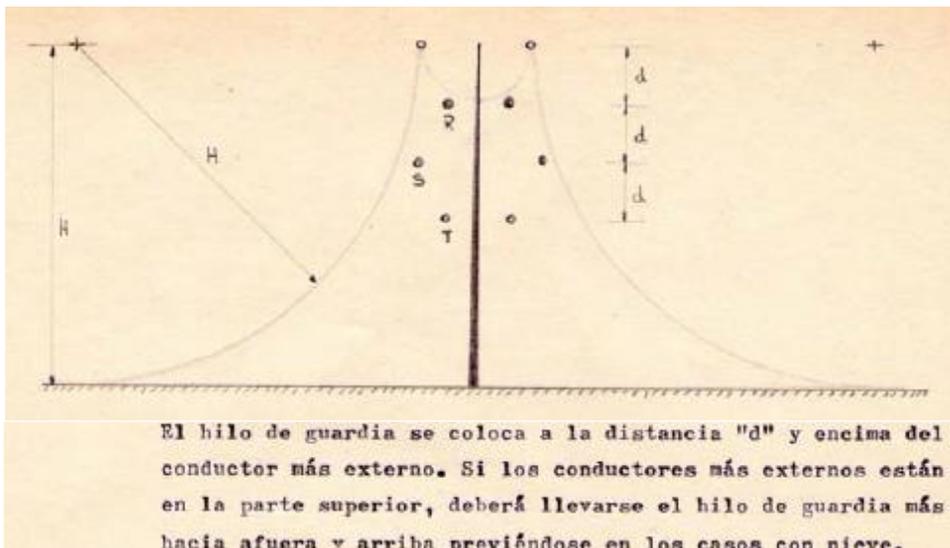


Figura 2.10 – Protección de una línea aérea de doble terna según Schwaiger.

El hilo de guardia se coloca a la distancia "d" y encima del conductor más externo. Si los conductores más externos están en la parte superior, deberá llevarse el hilo de guardia más hacia afuera y arriba previéndose en los casos con nieve.

Actualmente, por ofrecer adecuada protección y ser económicamente justificable, el método más utilizado es el de **Langrehr**.

De acuerdo a la Figura 2.11 se tiene:

$$d \geq 1,1 \left( \frac{x^2}{2h} + x \sqrt{\frac{2h}{H}} \right) \quad [6]$$

# Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 16 -

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

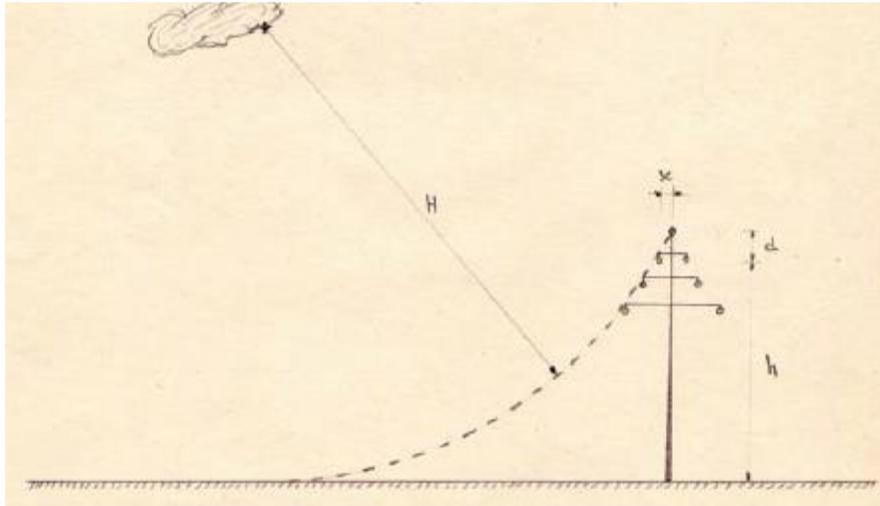


Figura 2.11 – Determinación de la posición del hilo de guarda según Langrehr.

Se ha demostrado experimentalmente que el espacio protegido por un cable de tierra está aproximadamente delimitado, por un arco circular de radio igual a la altura del cable de tierra sobre el suelo (Figura 2.12).

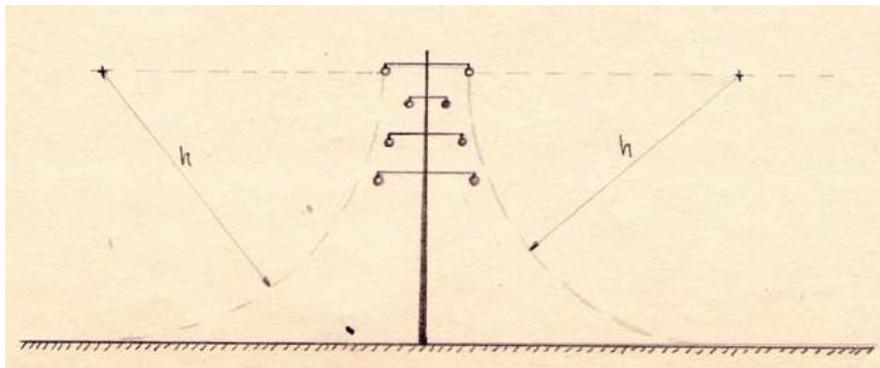


Figura 2.12 – Determinación del espacio protegido por el hilo de guarda según Schwaiger.

Con lo expuesto, quedan definidos los criterios para la disposición de los conductores y de los hilos de guarda; pero los hilos de guarda colocados sobre los conductores de línea, aún si soportan el golpe del rayo, no garantizan por sí mismo una eficaz protección del sistema si la aislación de la línea no se ajusta a las consecuencias que produce el golpe del rayo en el hilo de guarda. Como ya se dijo, el rayo da origen a corriente del orden de hasta 100 KA. Esta corriente que fluye a tierra, se distribuye sobre varios soportes de línea (Figura 2.13), y si la línea esta provista de hilo de guarda, soporte y puesta a tierra, existirá una caída de tensión debida a la resistencia de estos elementos.

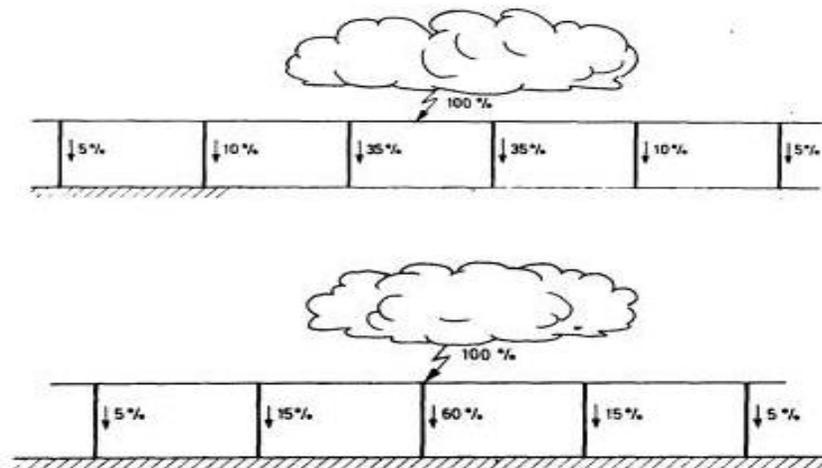


Figura 2.13 – Distribución de la corriente del rayo en una línea con hilos de guarda.

**b) Sistema de protección por descargadores de sobretensión**

El dispositivo de protección que se utiliza, debe asegurar que la sobretensión máxima a que va a estar sometido sea siempre inferior a la tensión soportada por sus aislamientos; por lo tanto el dispositivo de protección debe actuar siempre que sea necesario reducir una sobretensión susceptible de provocar una falla del aislamiento.

Surge el inconveniente de que la tensión soportada por un aislamiento no puede definirse por un solo número, ya que es función de la forma de la onda aplicada; puede decirse que un aislamiento soporta mejor una determinada tensión cuanto menos tiempo está aplicada. La tensión soportada por un material se da así mejor mediante una curva de tensión – duración (a) tal como la indicada en la Figura 2.14. Se observa que presenta un crecimiento para tiempos pequeños que corresponden a ondas de tensión aplicadas de gran pendiente.

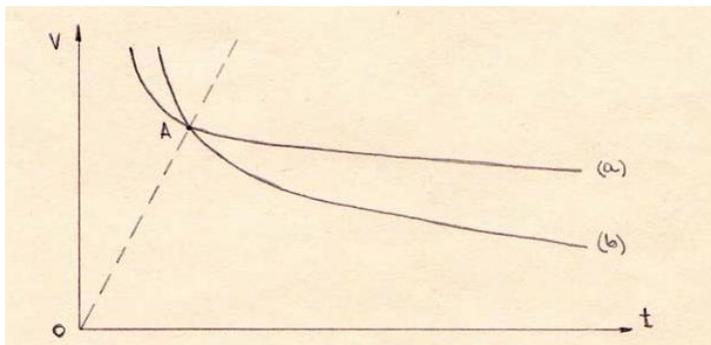


Figura 2.14 – Curva de tensión vs duración que soporta un aislamiento.

Los dispositivos de protección presentan una curva tensión-duración de características parecidas a la indicada. Por ejemplo, la de un simple explosor de varillas es del tipo de la curva (b) de la Figura 2.14; en este caso la forma de la curva se interpreta de la siguiente forma: aquí la falla del aislamiento entre varillas (aire) precisa de la formación de un fenómeno de avalancha provocada por los iones libres en el aire acelerados por el campo eléctrico entre las varillas; el desarrollo de este fenómeno exige (naturalmente), un cierto tiempo, tanto más pequeño cuanto más elevada es la tensión aplicada al explosor. La Figura 2.15 da la curva real medida en un explosor de 50 cm. Debido al fenómeno aleatorio de la descarga, es de esperar una cierta dispersión en los resultados obtenidos al trazar estas curvas y en realidad así sucede, dándose normalmente para cada dispositivo una banda en lugar de una curva, o bien la curva límite superior de esta banda. Además la tensión de descarga en el aire depende mucho del grado de humedad y la presión.

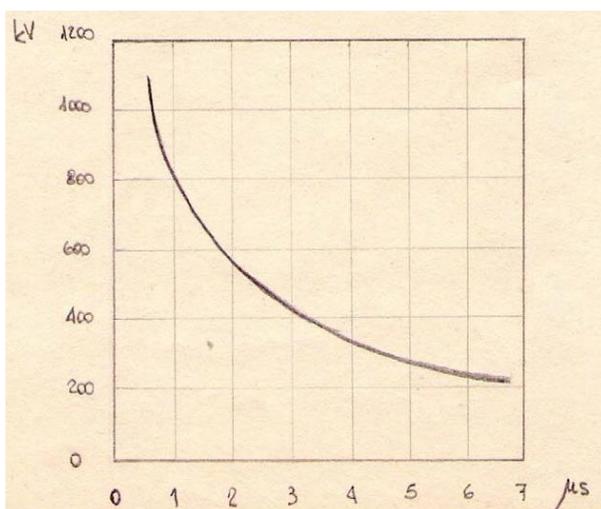


Figura 2.15 – Curva de tensión vs duración para un explosor de 50 cm.

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 18 - Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Para que el dispositivo de protección pueda mantener la tensión en bornes del aparato protegido por debajo de un determinado valor, deben cumplirse ciertos requisitos:

- i. Debe existir una coordinación entre las curvas tensión – duración del equipo protegido y el dispositivo de protección en el sentido de que la curva de este último esté siempre por debajo de la del equipo protegido, a fin de asegurar que se produce la actuación de la protección antes de que falle el aislamiento. Consideremos las curvas de la Figura 2.14 y supongamos que la curva (a) corresponde a un transformador y la (b) a un explosor de varillas que la protege; si a la instalación llega una onda de tensión de pendiente inferior a la recta  $OA$ , se cebaría el arco con el explosor y no fallará el transformador, pero si la pendiente fuera mayor, se produciría una falla en el transformador antes de cebarse el explosor. La solución en este caso sería acortar la distancia entre varillas del explosor, con lo cual la curva (b) baja hasta quedar permanentemente debajo de la (a). En contrapartida, se originarían mayores números de cebado del explosor para tensiones que antes no lo cebaban, dando lugar en este caso a cortocircuitos que serían necesarios eliminar.
- ii. Otro requisito se refiere a la tensión residual en el dispositivo de protección, correspondiente a la caída de tensión en su resistencia al paso de la corriente de descarga. Se comprende que esta tensión debe ser también inferior a la que puede soportar el material protegido. En la Figura 2.16 se representa el esquema equivalente del circuito, donde  $z_c$  es la impedancia de onda de la línea,  $z$  la del equipo a proteger y  $z_p$  la del dispositivo de protección una vez cebado, lo que se representa por el cierre del interruptor. Si es  $u_c$  la tensión de cebado, por Thevenin se tiene la corriente de descarga:

$$i_p = \frac{u_c}{z_p + \frac{z_c z}{z_c + z}} \quad [7]$$

y la tensión en bornes de  $Z$  resulta:

$$u_r = i_p z_p = \frac{z_p u_c}{z_p + \frac{z_c z}{z_c + z}} \quad [8]$$

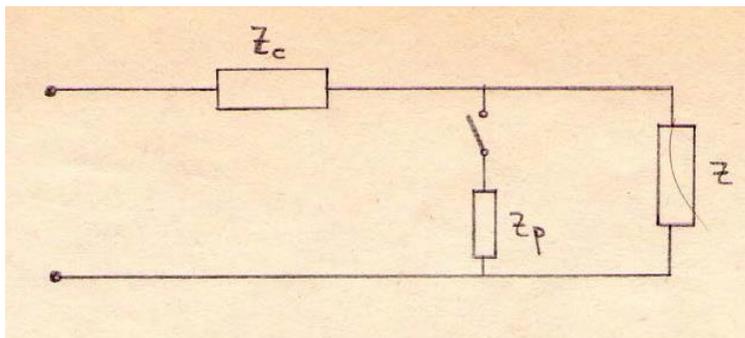


Figura 2.16 – Modelo equivalente de la línea, equipo a proteger, y dispositivo de protección.

- iii. Otro requisito que debe cumplir el dispositivo de protección es que sea capaz de disipar la energía liberada por el paso de la corriente de descarga a través del mismo. Esta energía depende de la duración de la descarga y del valor de la corriente.

## **Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 19 -**

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

El explosor de varillas se ha mencionado como un dispositivo de protección contra sobre tensiones. Tales explosores tienen la ventaja de ser económicos pero con varios inconvenientes, el más importante de los cuales es que cuando actúan producen una falla en el circuito. Ello puede solucionarse abriendo un interruptor y volver a activar la línea después de descargar el explosor. Sería conveniente evitar este fenómeno, para lo cual debe contarse con un dispositivo que pueda efectuar la limitación de tensión sin provocar ese efecto. Una resistencia variable puede ser ese dispositivo.

Estas resistencias tienen la propiedad de que su valor disminuye rápidamente a medida que aumenta la tensión entre sus extremos: Esta característica se expresa generalmente como:  $i = ku^n$

$n$ : coeficiente de no-linealidad. Varía entre 2 y 6 normalmente, determinando una relación entre tensión y corriente no lineal.

$k$ : es un factor geométrico para cada material, dependiendo de las dimensiones de la resistencia.

Se construyen como varillas y discos hasta alcanzar un valor deseado. El material básicamente utilizado es carbono de silicio.

Estas resistencias se conectan entre los bornes de los aparatos a proteger, sometándose permanentemente a la tensión de servicio, condiciones en las cuales su resistencia es muy elevada y la corriente por ella es pequeña. Cuando llega una sobre tensión, su resistencia disminuye muy rápidamente aumentando bruscamente la corriente drenada; la tensión en bornes del aparato a proteger, quedará así reducida con respecto a la correspondiente sin la resistencia variable. Una vez que la tensión ha alcanzado su valor normal, la resistencia vuelve a ser muy elevada y el sistema está de nuevo en las condiciones anteriores a la sobre tensión. La capacidad de disipación de energía de estos dispositivos viene determinada por su tamaño, pues el corto periodo de tiempo en que tal energía se desarrolla impide ningún tipo de intercambio de calor con el exterior. La utilización de estas resistencias está limitada a los casos en que existe una gran diferencia entre la máxima tensión admisible y la tensión de servicio y ello debido a que la variación de la resistencia con la tensión no es tan rápida como sería deseable.

El problema de obtener una tensión de protección no muy superior a la de servicio (2 a 3 veces), puede resolverse mediante la utilización de un dispositivo de protección que utiliza las propiedades de las resistencias variables junto con las de los explosores. Estos dispositivos se denominan pararrayos de resistencia variable o autovalvulares.

Funcionamiento e indicaciones de los mismos se detallan en bibliografías como ser:

- Zoppetti: "Estaciones Transformadoras y Distribución".
- C.E.A.C.: "Estaciones Transformadoras".
- Roth: "Técnicas de A.T."
- Buchhold – Happoldt: "Centrales y Redes Eléctricas".

No obstante ello, mediante la Figura 2.17 se muestra el funcionamiento de un pararrayo. Cuando una sobretensión transitoria llega al pararrayos y alcanza un determinado valor  $u_c$ , denominado tensión de cebado, se ceban los explosores A, estableciéndose la corriente de descarga a través de los elementos de resistencia variable R y de las bobinas de soplado B. Normalmente, los explosores se construyen de forma que entre sus electrodos exista un numero de electrones libres superior al normal mediante la creación de un punto de campo eléctrico muy elevado entre los electrodos, de esta forma el cebado de los explosores es muy rápido. La variación rápida de la corriente de descarga  $i_p$  hace que se genere en las bobinas una fem elevada que produce el cebado de los explosores F, que cortocircuitan las bobinas (fase b), dejando solo en el circuito de descarga a los elementos resistivos R. Durante esta fase la tensión en bornes del pararrayos es igual al producto  $R \cdot i_p$  y se denomina tensión residual del pararrayo  $u_r$  al valor máximo del producto. Cuando la onda de sobre tensión se ha extinguido y se restablece en

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 20 - Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

bornes del pararrayos la tensión de servicio, la corriente de descarga que sigue o corriente subsiguiente  $i_s$ , de variación más lenta y de valor más pequeña que  $i_p$ , hace que los explosores de cortocircuito de las bobinas se apaguen espontáneamente, pasando ahora la corriente por estas bobinas. Se crea entonces un campo magnético longitudinal que produce el alargamiento del arco de los explosores de sellado, llevándolo hacia una zona fría de la pared de la cámara del explosor (fase c) y aumentando su resistencia equivalente, este aumento hace disminuir  $i_s$  lo cual provoca un aumento de las resistencias  $R$  y así sucesivamente hasta que  $i_s$  se anula y el arco en los explosores se extingue (fase a). Nos encontramos de nuevo en las condiciones iniciales con el pararrayo dispuesto para proteger contra otra nueva sobretensión.

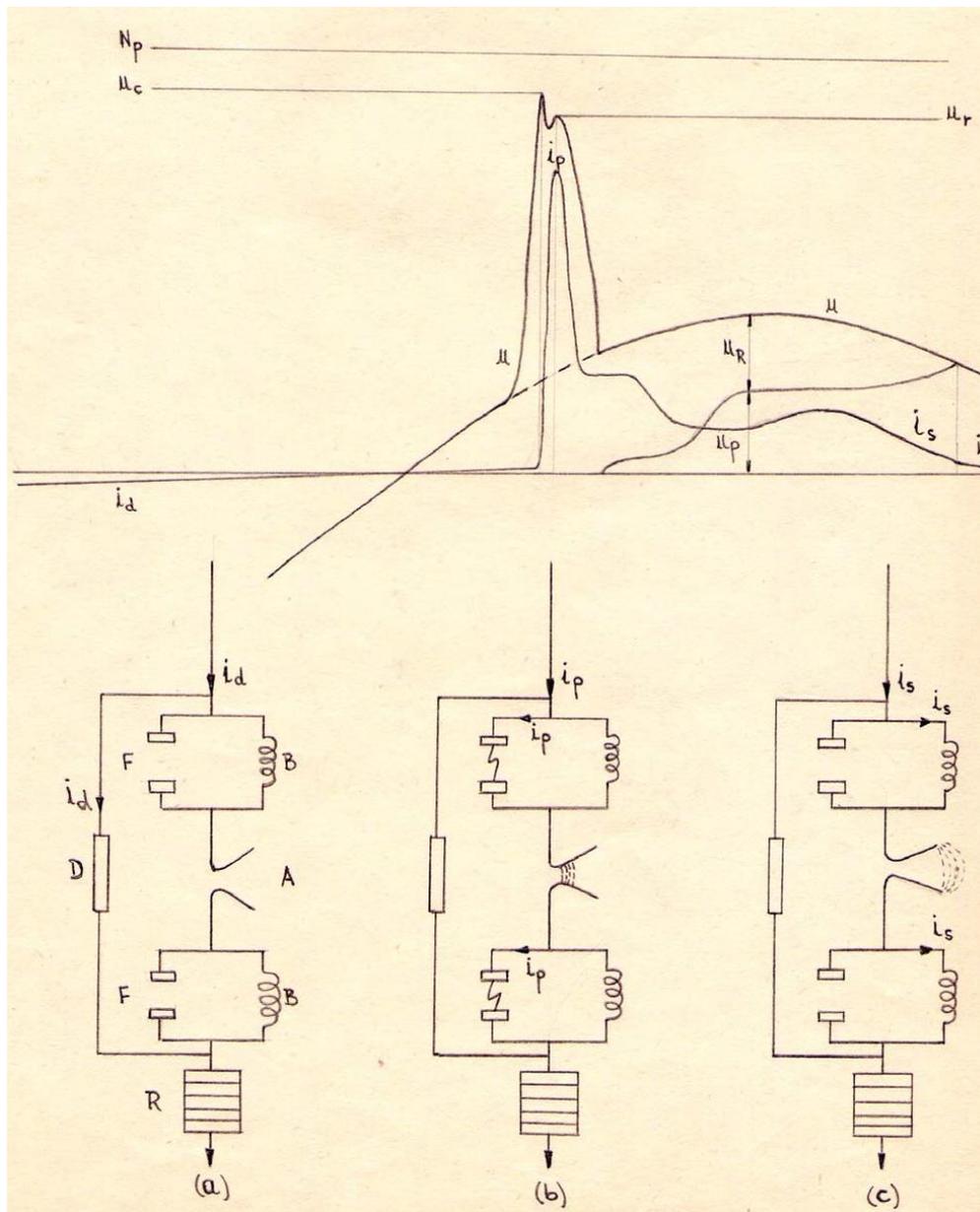


Figura 2.17 – Funcionamiento de pararrayo autovalvular o de resistencia variable.

La utilización correcta de los pararrayos exige no solamente cumplir los requisitos de coordinación, tensión residual y capacidad de disipación de energía en la descarga, sino que también es preciso situarlos lo más cerca posible de los aparatos a proteger para evitar fenómenos de reflexión de ondas que puedan originar tensiones en estos aparatos superiores a la máxima tensión garantizada en bornes del pararrayos, lo que se denomina nivel de protección. Es necesario también que las conexiones a tierra y a la línea sean lo más corta posible, para no sumar a la resistencia propia del pararrayo una resistencia excesiva de las conexiones que produzcan un valor  $R_{ip}$  demasiado grande.

### **2.3. Método Electrogeométrico (EGM).**

#### **2.3.1 Apantallamiento de Líneas Aéreas.**

Existen dos teorías principales:

- a. Teoría de la altura de la descarga. (Supone que la traza del rayo en su último recorrido, es vertical). Esta teoría se desarrolló en los puntos anteriores a través del “método clásico”.
- b. Teoría de la intensidad de la descarga. (Fundamento del modelo electrogeométrico).

La teoría que mejor establece la zona protegida por el apantallado, es la desarrollada como “**modelo electrogeométrico**”. Este modelo sirvió para comparar con métodos sugeridos por distintos investigadores, basados fundamentalmente en la experiencia de los resultados obtenidos. Hoy día el modelo electrogeométrico permite convalidar la eficacia de algunos de ellos.

#### **a) *Distancia crítica.***

La probabilidad de que un rayo impacte sobre un conductor de fase o en un cable de guarda, es una variable aleatoria que puede relacionarse con la geometría del sistema (altura y posición del cable de guarda respecto a los conductores de fase) y con el valor de la corriente de primera descarga de retorno del rayo. En general se considera que existe una distancia (distancia crítica) alrededor del conductor de fase y del cable de guarda formando un “radio atractivo”, de forma que los rayos cuyo último paso se encuentre más cercano que esta distancia, impactarán sobre el conductor correspondiente. El lugar geométrico de los puntos equidistantes del conductor de fase o cable de guarda, es un círculo cuyo radio (llamado distancia crítica) es función de la intensidad de pico de la descarga ( $I_d$ ), de manera que a mayor intensidad de pico le corresponde una distancia crítica mayor. La probabilidad de que un rayo impacte en tierra, en un conductor de fase o en un cable de guarda depende de la corriente de pico de la descarga, de la altura del conductor de fase y de la localización del cable de guarda con respecto al de fase. La siguiente Figura 4.1 presenta las distancias críticas del conductor de fase  $r_c$ , del cable de guarda  $r_s$  y tierra  $r_g$ .

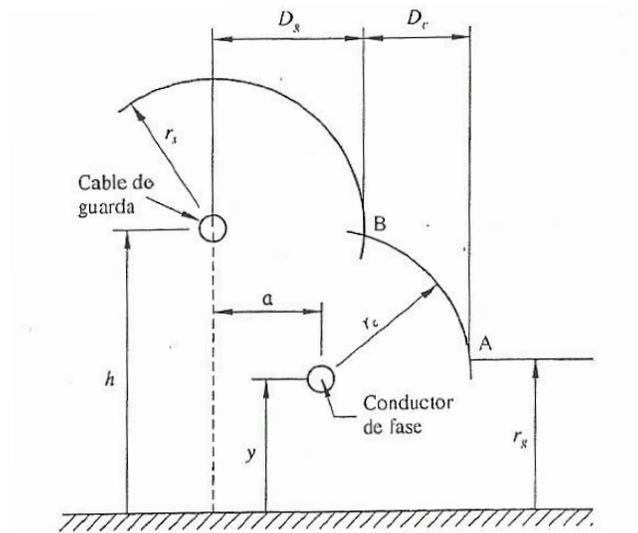


Figura 4.1 – Distancias críticas del cable de guarda, conductor de fase y tierra.

Existen diferentes ecuaciones para determinar las distancias críticas. En este apunte se utilizan las propuestas en IEEE Std 998 – 1996. Su valor depende de la corriente de pico de descarga  $I$  (expresada en kA), y suele expresarse en función de la distancia crítica a tierra ( $r_g$ ) según:

$$r_s = \gamma_s \cdot r_g \quad [9]$$

$$r_c = \gamma_c \cdot r_g$$

Los valores de los parámetros, de acuerdo con IEEE Std 998-2010:

$$r_g = 8 \cdot I^{0,65} \quad [10]$$

$$\gamma_s = \gamma_c = 1$$

(Factores que están en función de la altura del cable de guarda del conductor de fase)

La ecuación [10] puede reescribirse de la forma:

$$I = 0,041 \cdot r_g^{1,54} \quad [11]$$

Esta relación se muestra en la siguiente curva:

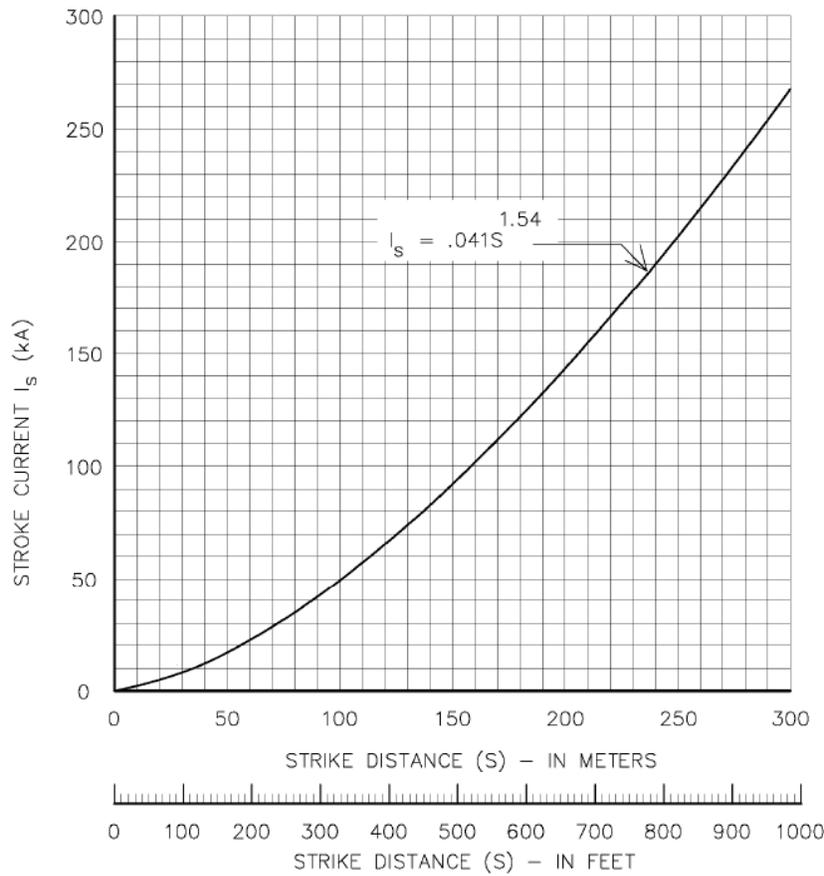


Figura 4.2 – Corriente de descarga vs distancia crítica.

Eriksson reescribió los cálculos para distancia crítica en 1980, introduciendo la dependencia con la altura, que se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$S = 0.84I^{0.74}H^{0.6} \quad \text{Si está protegido por pararrayos} \quad [12]$$

$$S = 0.67I^{0.74}H^{0.6} \quad \text{Si está protegido por cables de guarda} \quad [13]$$

Siendo H la altura de la estructura (en m).

Luego, tanto en líneas con o sin cable de guarda, en todos los cálculos la altura de los conductores y la altura del cable de tierra pueden ser corregidas teniendo en cuenta sus respectivas flechas según las expresiones:

$$f_c = 0.0014 \cdot \frac{I^2}{20} \quad [14]$$

$$f_{ct} = 0.0009 \cdot \frac{I^2}{20} \quad [15]$$

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 24 -

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Donde  $f_c$  es la flecha del conductor,  $f_{ct}$  es la flecha del cable de tierra, y  $l$  es la longitud media de un vano de la línea.

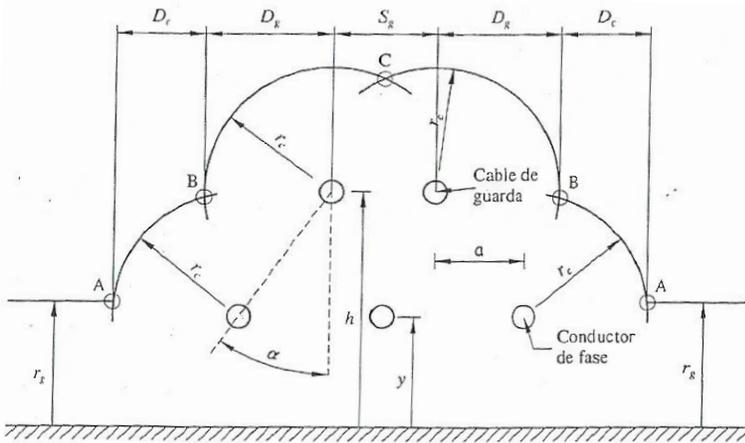
### b) Análisis del modelo geométrico.

El esquema de la Figura 5.2 corresponde a una línea aérea trifásica protegida por dos cables de guarda (pero puede aplicarse todo el análisis posterior a una línea protegida por un solo cable de guarda, considerando que la distancia de separación entre cables de guarda  $S_g=0$ ).

Se trazan arcos con centro en los conductores de fase y en los cables de guarda, considerando un radio  $r_c$  para ambos casos. Según lo visto en el punto 1.4, la distancia crítica  $r_c$  depende de la intensidad de descarga del rayo  $I_d$ . La altura trazada a partir del suelo  $r_g$  determina la zona de influencia de tierra (también depende de la intensidad de pico de la descarga del rayo) (a mayor  $I_d$ , mayores  $r_c$  y  $r_g$ ).

Las descargas de intensidad  $I_d$  que alcancen el arco entre A y B (ver Figura 5.2) impactarán sobre el conductor de fase, y las que alcancen el arco entre B y C lo harán sobre el cable de guarda, y el resto de las descargas impactarán sobre tierra.

A medida que aumenta  $I_d$ , aumentarán las distancias críticas  $r_c$  y  $r_g$ , y disminuirá el arco AB. La intensidad máxima de falla de apantallamiento ( $I_m$ ), será aquella donde todas las distancias críticas coinciden en un punto (A coincide con B). Las descargas cuya corriente sea superior a  $I_m$  impactarán contra el cable de guarda o contra tierra, pero no contra una parte activa (sistema completamente apantallado para esas corrientes de pico). Para corrientes menores, existe la posibilidad de contacto contra un conductor de fase.



Considerando sólo descargas verticales, para un rayo de intensidad de pico  $I_d$ , las distancias  $D_c$  y  $D_g$  de la Figura 5.2 son las distancias de exposición del conductor de fase y del cable de guarda, respectivamente.

Figura 5.2 – El modelo geométrico: definición de ángulos y distancias.

Por lo tanto, si un rayo cae en la línea, la probabilidad de impactar en el cable de guarda es:

$$P_{\text{cable guarda}} = \frac{2 \cdot D_g + S_g}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} = \frac{D_g + \frac{S_g}{2}}{D_c + D_g + \frac{S_g}{2}} \quad [16]$$

Y la probabilidad de que impacto sobre el conductor de fase es:

$$P_{\text{conductor}} = \frac{2 \cdot D_c}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} = \frac{D_c}{D_c + D_g + \frac{S_g}{2}} \quad [17]$$

## **Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 25 -**

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Se define la probabilidad o tasa de fallo de apantallamiento de una línea ( $SFR(I_d)$ ), para una intensidad de pico fija  $I_d$ , como el número de descargas de valor  $I_d$  que impactarán sobre los conductores de fase de esa línea durante un año:

$$SFR(I_d) = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot D_c(I_d) \cdot f(I_d) \quad [18]$$

donde  $L$  es la longitud de la línea (en km),  $D_c$  es la distancia de exposición al rayo de un conductor de fase calculada para una intensidad  $I_d$ ,  $f(I_d)$  es la probabilidad de que la descarga tenga una intensidad de pico  $I_d$ , y  $N_g$  es la densidad de rayos en la zona (medida en rayos/km<sup>2</sup>/año).  $N_g$  puede estimarse a partir del nivel cerámico o número de días de tormenta al año ( $T_d$ ), mediante la siguiente expresión:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25} \quad [19]$$

La tasa total de fallos de apantallamiento ( $SFR$ , Shielding Failure Rate), es decir, la suma de las tasas de fallo de apantallamiento para todas las intensidades, se calcula según:

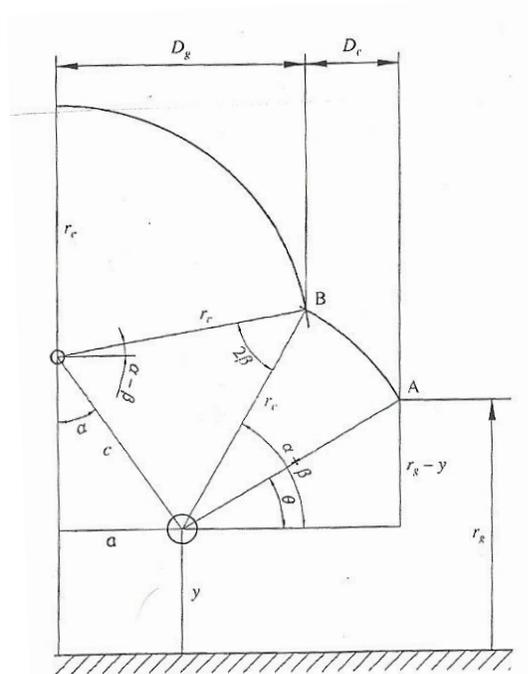
$$SFR = \int_0^{\infty} SFR(I) \cdot dI \quad [20]$$

El límite de integración inferior es 3 kA debido a que es el valor mínimo de intensidad de descarga que CIGRE ha registrado. El límite superior se establece en la intensidad máxima de fallo de apantallamiento, puesto que para intensidades mayores el rayo no impacta en un conductor de fase porque la distancia  $D_c$  es nula. De esta forma, la tasa total de fallos de apantallamiento resulta ser:

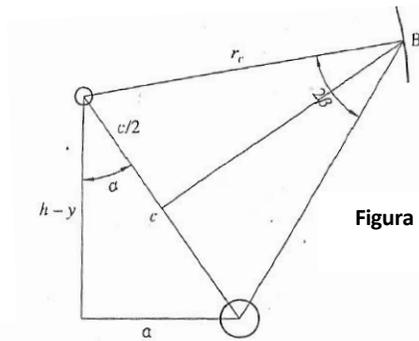
$$SFR = \int_3^{I_m} SFR(I) \cdot dI = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_3^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \quad [21]$$

La integral de la ecuación anterior representa la probabilidad de que cualquier rayo que caiga en la línea impacte sobre el conductor de fase. Multiplicando por la densidad de rayos en la zona ( $N_g$ ) y por la longitud de la línea ( $L$ ) se obtiene el número de descargas anuales que impactarán sobre un conductor de fase.

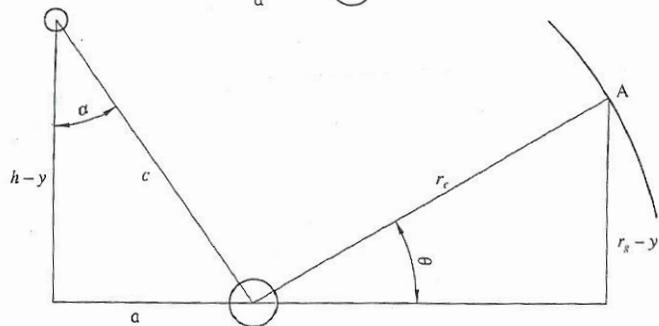
**c) Cálculo de las distancias de exposición de los conductores de fase ( $D_c$ ) y de los cables de guarda ( $D_g$ ).**



**Figura 5.3 – Vista ampliada de la Figura 5.2.**



**Figura 5.4 – Vista ampliada de la Figura 5.3.**



**Figura 5.5 – Cálculo de  $\alpha$  y  $\theta$ .**

Para calcular  $D_c$  y  $D_g$ , calculamos primero los principales ángulos (según las Figuras 5.4 y 5.5):

$$\beta = \text{sen}^{-1} \frac{c}{2 \cdot r_c} = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{a + (h-y)^2}}{2 \cdot r_c} = \text{sen}^{-1} \frac{h-y}{2 \cdot r_c \cdot \cos \alpha} \quad \theta = \text{sen}^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \quad \alpha = \text{tg}^{-1} \frac{a}{h-y} \quad [23]$$

$$D_c = r_c \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad \text{para } r_g \leq a \Rightarrow \theta = 0 \quad [24]$$

$$D_g = r_c \cdot \cos(\alpha - \beta)$$

Considerando valores de intensidad de descarga superiores a la intensidad máxima de fallo de apantallamiento ( $I > I_m$ ), se tiene que la distancia horizontal  $D_c = 0$ , resultando que la distancia  $D_g$  vale (considerando la Figura 5.6):

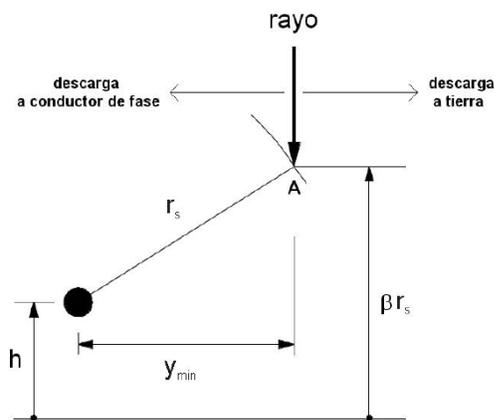
$$D'_g = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad \text{para } r_g \geq h$$

$$D'_g = r_s + a \quad \text{para } r_g < h \quad [25]$$

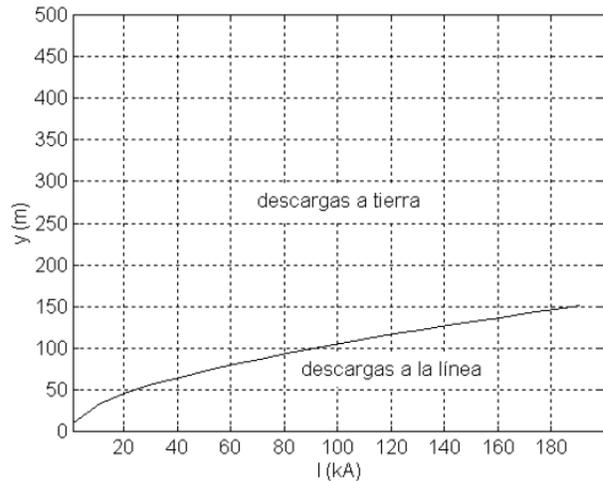
**Nota 1:**

Para el caso de una línea sin apantallar, puede utilizarse el mismo cálculo que en el caso de una línea con cable de guarda, donde habrá una distancia mínima ( $y_{\min}$  en la Figura A siguiente;  $D'_g$  en la Ecuación [25]) por la cual el rayo caerá directamente en la línea, o lo hará en la tierra

(dependiendo de la  $I$  máxima de descarga y de la distancia perpendicular entre descarga y línea). La única diferencia es que no se tiene en cuenta la zona de atracción del cable de guarda.



**Figura A - Modelo Electrogeométrico (Línea sin apantallar).**



**Figura B - Modelo Electrogeométrico (Línea sin apantallar). Variación de  $y_{min}$  respecto a la  $I$  de descarga para una línea particular.**

La Figura B muestra como varía la distancia mínima  $y_{min}$ , calculada según la expresión:

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (\beta \cdot r_s - h)^2} \quad \text{para } \beta \cdot r_s > h$$

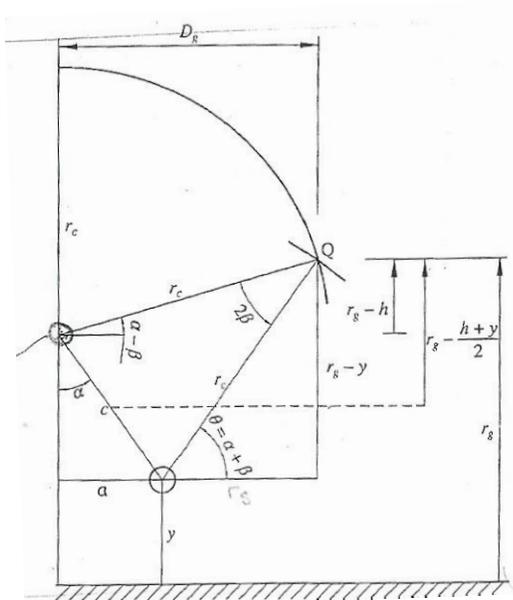
$$y_{min} = r_s \quad \text{para } \beta \cdot r_s \leq h$$

$\alpha = 10, \beta = 0.9, \gamma = 0.65$

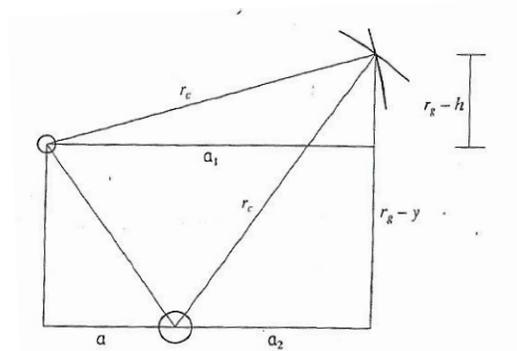
con la intensidad de la descarga  $I$  (kA), para una línea con conductores situados a una altura media de 10 m respecto de tierra y distancia horizontal de 3 m entre los conductores más externos. A partir de esta figura se pueden deducir para este caso concreto qué impactos irán a parar a la línea y cuáles irán a parar a tierra dependiendo de la intensidad máxima de la descarga y de la distancia perpendicular entre descarga y línea.

**d) Intensidad máxima de fallo de apantallamiento.**

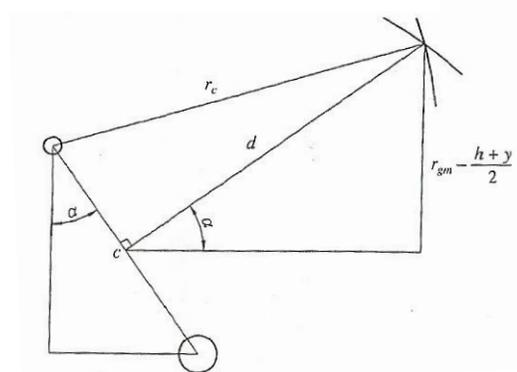
$I_m$  es aquella intensidad para la cual todas las distancias críticas coinciden en un punto. La figura siguiente muestra la coincidencia de los puntos A y B en uno solo llamado Q, donde se define la Intensidad máxima de apantallamiento ( $I_m$ ).



**Figura 5.6 – Buscando  $l_m$  y el ángulo de apantallamiento perfecto.**



**Figura 5.7 – Detalle de Figura 5.6.**



**Figura 5.8 – Detalle de Figura 5.6.**

A partir de la Figura 5.7 se puede calcular la distancia horizontal  $a$ , entre el cable de guarda y el conductor de fase más desfavorable. Luego puede calcularse  $r_{gm}$ , que es la distancia crítica a tierra para la intensidad máxima de apantallamiento  $I_m$ . Además obtenemos el ángulo  $\alpha$  para  $I_m$ :

$$\begin{aligned} a &= a_1 - a_2 \\ a_1 &= \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \\ a_2 &= \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \\ \text{sen } \alpha &= \frac{r_{gm} - \frac{h+y}{2}}{\sqrt{r_{cm}^2 - \frac{c^2}{4}}} \end{aligned} \quad [26]$$

Se cumple generalmente  $r_{cm}^2 \gg \frac{c^2}{4}$  y por lo tanto una buena aproximación a la distancia crítica a tierra para la intensidad máxima de apantallamiento  $I_m$ :

$$r_{gm} = \frac{(h+y)/2}{1 - \gamma \cdot \text{sen } \alpha} \quad [27]$$

**e) Tasa de cebados.**

**Tasa de cebados directos (SFFOR, Shielding Failure FlashOver Rate)**

La tasa total de fallos de apantallamiento (SFR) es el número de descargas que impactan sobre un conductor de fase; sin embargo, no todas ellas acaban en un cebado del aislador, sino solamente aquellas que produzcan una sobretensión que supere el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo (CFO) del aislador (El CFO es aquel valor de tensión en el cual una aislación autoregenerativa tiene una probabilidad de ruptura del 50%)<sup>2</sup>. De esta forma, el SFR incluye todos los impactos que caen en el conductor de fase (los que producen cebado del aislador y los que no). Para calcular la tasa de cebados directos se tiene que calcular la tensión que produce un rayo al impactar sobre una línea. De la Figura 5.9 se obtiene:

$$V = \frac{I_d}{2} \cdot Z_c \quad [28]$$

Donde  $I_d$  es la intensidad de descarga del rayo que impacta sobre la fase activa, y  $Z_c$  la impedancia del conductor de fase.

La impedancia característica de un conductor se encuentra en función de su altura media  $h$  y de su radio  $r_c$ , y se puede calcular de la siguiente forma:

$$Z_c = 60 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right) \quad [29]$$

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento. Si  $K$  es el factor de acoplamiento entre 2 fases, la tensión máxima inducida en otra fase será:

$$V_{c2} = K V_{c1} = K Z_c I / 2 \quad [30]$$

El contorneo en la línea puede originarse entre conductores de fase, si la diferencia de tensiones:

$$V_{c1} - V_{c2} = (1 - K) Z_c I / 2 \quad [31]$$

es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores. O puede originarse en la cadena de aisladores más próxima al impacto, si las tensiones que se propagan desde el punto del impacto superan la tensión cebado.

Para calcular la intensidad crítica ( $I_c$ ) para la cual se produce un cebado del aislador, se fija la sobretensión ( $V$ ) que produce el impacto del rayo en la línea igual al nivel de aislamiento a impulso tipo rayo del aislador (para una línea de tensión máxima de servicio de 145 kV, siendo  $L$  la longitud del aislador o de la cadena de aisladores):

---

<sup>2</sup> **BIL:** Basic Lightning impulse insulation Level: Nivel de aislación en términos de valor de pico que una aislación es capaz de soportar sin “romperse” cuando se le aplica una sobretensión de rayo (NBA). **BSL:** Basic Switching impulse insulation Level: Nivel de aislación en términos de valor de pico que una aislación es capaz de soportar sin “romperse” cuando se le aplica una sobretensión de maniobra (NBM). Tanto el BIL como el BSL se pueden ser estadísticos o “convencionales” (si se omite el calificativo, se asume que es “convencional”). Si es estadístico, la aislación no presentará descargas disruptivas el 90% de las veces que se le aplique una sobretensión que tenga el valor del BIL (10% de falla). Si es convencional, lo hará el 100% de las veces que se le aplique la sobretensión.

$$I_c = \frac{2 \cdot (CFO)}{Z_c} \quad [32]$$

$$CFO \approx L \cdot 605 \text{ kV/m}$$

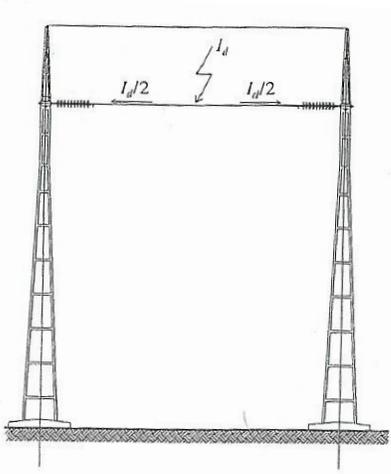


Figura 5.9 – Impacto de una descarga en un conductor de fase.

A partir de este valor se obtiene la tasa de cebados directos de una línea según la expresión:

$$SFFOR = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_{I_c}^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \quad [33]$$

La tasa de cebados directos por cada 100 km, se expresa:

$$N_D = 0,2 \cdot N_g \cdot \int_{I_c}^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \quad [34]$$

La integral representará la probabilidad de que un rayo que caiga en la línea impacte un conductor de fase y además ceba el aislador. Dicha probabilidad multiplicada por la densidad de descargas de la zona ( $N_g$ ) y por la longitud de la línea ( $L$ ) da como resultado el número de descargas al año que impactan en un conductor de fase y además ceban los aisladores. Los aisladores sólo se cebarán si la intensidad del rayo es mayor que la intensidad crítica, y menor que la intensidad máxima de fallo de apantallamiento; de ahí los límites de la integral.

La siguiente Figura C muestra como varían las distancias mínimas  $y_{ct}$  e  $y_{min}$  con la intensidad de la descarga. Este ejemplo se ha realizado nuevamente con una línea horizontal de altura 10 m y distancia exterior de 3 m entre los conductores más externos (Ver **Nota 1** en **2.3.1.c**). Se puede observar que la línea se encuentra completamente apantallada por el cable de tierra para intensidades de la descarga más grandes que 14 kA sea cual sea la posición de impacto del rayo (intensidad máxima de fallo de apantallamiento).

## Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 31 - Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

El cálculo de la anchura de una línea sin apantallar expuesta a descargas directas también se puede obtener mediante un modelo basado en el radio atractivo de un objeto, según el cual un objeto de altura  $h$  apantalla una zona de radio  $r$ , de tal forma que si alguna descarga perpendicular cae en esta zona terminará alcanzando este objeto. La Figura D muestra los principios en los que se basa este modelo. A la siguiente expresión:

$$r = 14 \cdot h^{0.6}$$

se la conoce como modelo de Eriksson, y ha sido adoptado por el IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines.

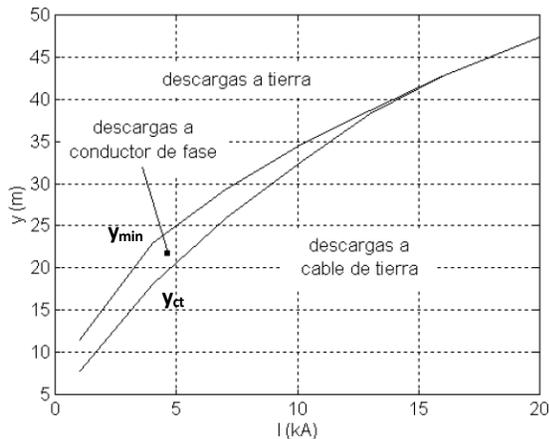


Figura C - Modelo Electrogeométrico (Línea apantallada). Variación de  $y_{min}$  respecto a la  $I$  de descarga para una línea particular.

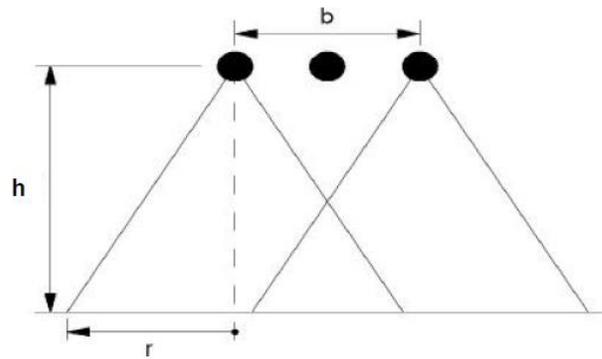


Figura D - Modelo de radio atractivo.

### Tasa de cebados inversos (BFR, Backflashover Rate)

Cuando una descarga impacta en un cable de guarda, una parte de su intensidad deriva a tierra (véase la figura 5.10) a través de la impedancia del apoyo ( $Z_T$ ) y de la impedancia de puesta a tierra del mismo ( $Z_{PAT}$ ).

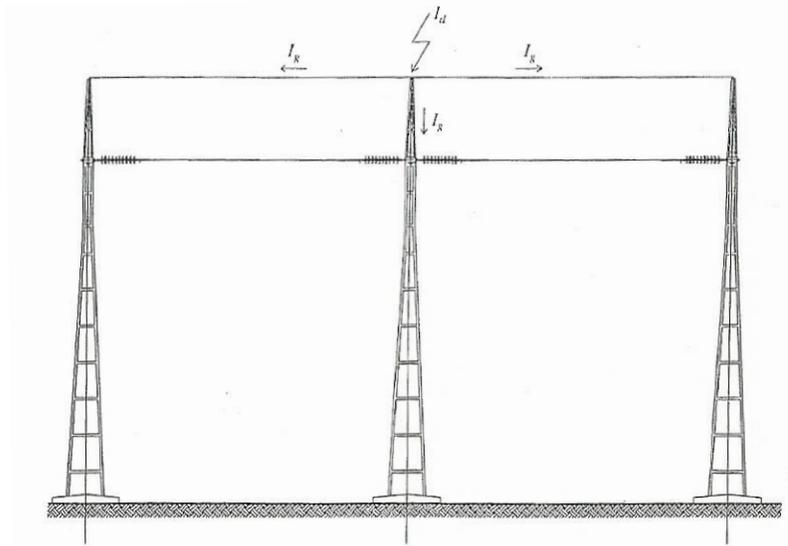


Figura 5.10. Para el cebado, el voltaje debe ser mayor que el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo de los aisladores.

Dependiendo de los valores de  $Z_T$  y de  $Z_{PAT}$ , las sobretensiones en los aisladores (medidas desde el apoyo hacia el conductor de fase) pueden producir el cebado de los mismos, esto se conoce como cebado inverso. Para que ocurra un cebado inverso, la sobretensión a través del aislador debe ser mayor o igual a su aislamiento a impulso tipo rayo (CFO). El caso más desfavorable de cebado inverso tiene lugar cuando la descarga impacta en el apoyo; en este caso la impedancia efectiva equivalente resultante es el paralelo de la impedancia de dicho apoyo con el paralelo de las impedancias correspondientes a las dos direcciones de propagación del conductor de tierra; y ambas en serie con la resistencia de puesta a tierra, siendo su valor:

$$Z_{eq} = \frac{Z_T \cdot Z_g}{2 \cdot Z_T + Z_g} + Z_{PAT} \quad [35]$$

si la línea tiene un único cable de guarda, y

$$Z_{eq} = \frac{Z_T \cdot Z_g}{4 \cdot Z_T + Z_g} + Z_{PAT} \quad [36]$$

si la línea tiene dos cables de guarda; donde  $Z_T$ ; es la impedancia del apoyo y  $Z_g$  es la impedancia característica del cable de guarda.

La intensidad crítica  $I_c$ , para la cual se produce el cebado inverso es la intensidad que produce una sobretensión en el apoyo que supera el nivel de aislamiento del aislador.

$$I_c = \frac{CFO}{Z_{eq}} \quad [37]$$

La tasa de cebados inversos por cada 100 km se expresa:

$$N_{INV} = 0,2 \cdot N_g \left[ \int_{I_c}^{I_m} D_g' \cdot p(I) \cdot dI + \int_{I_m}^{\infty} D_g' \cdot p(I) \cdot dI + S_g \right] \quad [38]$$

Puesto que lo habitual es que la intensidad para la cual se produce cebado inverso ( $I_c$ ) sea mayor que la intensidad máxima de fallo de apantallamiento ( $I_m$ ), la ecuación anterior queda:

$$N_{INV} = 0,2 \cdot N_g \cdot \left[ \int_{I_c}^{\infty} D_g' \cdot p(I) \cdot dI + S_g \right] \quad [39]$$

### **Tasa de cebados inducidos (IVFOR, Induced Voltage FlashOver Rate)**

Quando el rayo no cae en el conductor de fase ni en el cable de guarda, sino que cae en tierra, se induce una sobretensión en la línea cuyo valor, en algunos casos, puede superar al nivel de aislamiento de los aisladores y provocar su cebado. Para el estudio de las sobretensiones inducidas existen diferentes modelos en la literatura; en este trabajo se emplea el modelo de **Rusck**<sup>3</sup>.

Para la configuración de la Figura 5.11, y despreciando la distancia de separación del conductor de fase al apoyo ( $a$ ) frente a la distancia de impacto ( $x$ ), la sobretensión inducida entre el conductor de fase y el cable de guarda (que está conectado a tierra) viene dada por la expresión:

$$U_{ind} = \frac{30 \cdot I \cdot K_v}{x} \left[ y - \frac{Z_m + 2R}{Z_g + 2R} \cdot h \right] \quad [40]$$

Donde  $x$  es la distancia perpendicular entre el punto de caída del rayo y la línea,  $h$  es la altura del cable de guarda,  $I$  es el valor de pico de la corriente de rayo (kA),  $Z_g$  es la impedancia característica del cable de guarda ( $\Omega$ ),  $Z_m$  es la impedancia mutua entre el cable de guarda y el conductor de fase ( $\Omega$ ),  $R$  es la resistencia de puesta a tierra del apoyo ( $\Omega$ ) y  $K_v$  es una constante que se obtiene según la siguiente expresión:

$$K_v = 1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \quad [41]$$

donde  $v$  es la velocidad del rayo (en tanto por uno respecto de la luz), que puede estimarse mediante:

$$v = \frac{0,486}{1 + \frac{27,3}{I}} \quad [42]$$

(generalmente es 1/3 de la velocidad de la luz)

El valor 30 en la ecuación [40], es la impedancia que se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Z_0 = (1/4\pi) \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)} = 30 \Omega \quad [43]$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{N}{A^2} \right] \quad \text{Permeabilidad magnética del vacío} \quad [44]$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right] \quad \text{Permitividad del vacío} \quad [45]$$

<sup>3</sup> Rusck publica en 1975 el primer modelo de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas aéreas, donde considera que la línea aérea es infinitamente larga, de un solo conductor, y el canal de la descarga atmosférica es recto y perpendicular al plano de tierra (considerando el suelo como conductor ideal).

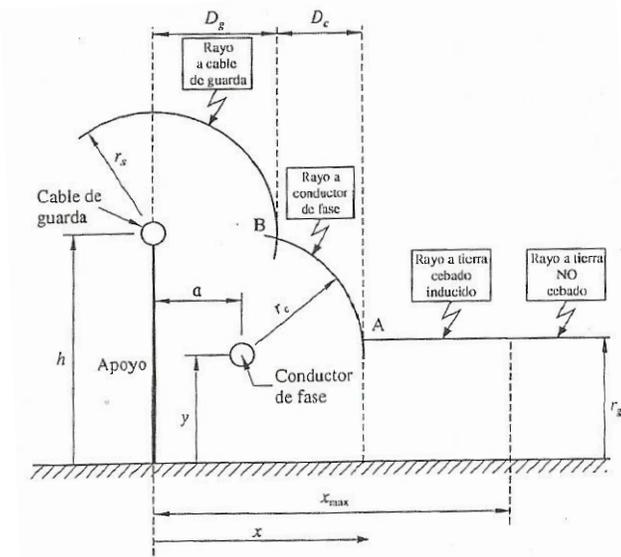


Figura 5.11. Cebados inducidos.

Para una configuración determinada de línea, dada la altura del conductor ( $y$ ), hay para cada intensidad  $I$  una distancia máxima de caída del rayo ( $x_{max}$ ) para la cual la tensión inducida será exactamente la tensión de cebado ( $U_{ind} = CFO$ ),

$$x_{max} = \frac{30 \cdot I \cdot K_v}{CFO} \left[ y - \frac{Z_m + 2R}{Z_g + 2R} \cdot h \right] \quad [46]$$

El cebado por sobretensiones inducidas se produce cuando el rayo cae a una distancia  $x$  tal que  $D_g + D_c < x < x_{max}$ . De esta forma, se tiene que la tasa de cebados inducidos por cada 100 km es:

$$N_{IND} = 0,2 \cdot N_g \cdot \left[ \int_{l_{min}}^{l_m} (x_{max} - D_g - D_c) \cdot f(I) \cdot dI + \int_{l_m}^{\infty} (x_{max} - D'_g) \cdot f(I) \cdot dI \right] \quad [47]$$

**Nota 2:**

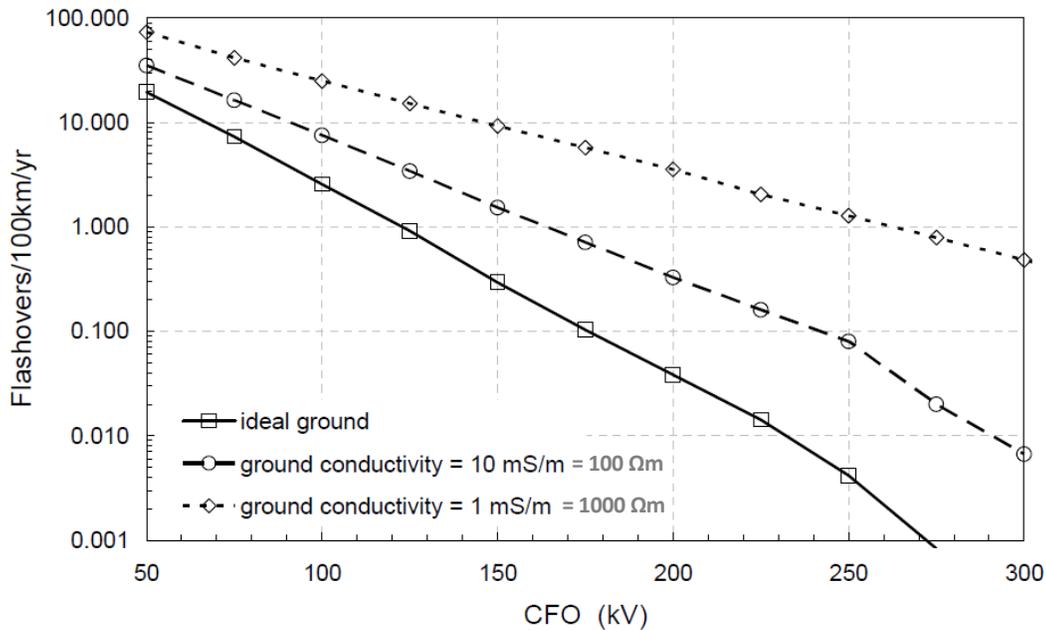
La filosofía para proteger una línea de distribución/transmisión contra descargas atmosféricas debe tener en cuenta:

- El uso de cable de guarda reduce el riesgo de descargas directas en los conductores de fase, pero aumenta los riesgos de cebados inversos. La reducción del riesgo de descargas directas se producirá, siempre y cuando, la conductividad del suelo sea elevada y las puestas a tierra correctas (el valor deseado de PAT dependerá del CFO, y generalmente se recomienda sea menor que  $[CFO (kV)/15 \text{ kA}]$  para lograr una efectividad del 25% contra descargas atmosféricas (hay que tener en cuenta también que en algunas áreas puede ser impráctico conseguir estos valores tan reducidos de PAT)).
- Pueden colocarse descargadores en todas las fases, en algunos puntos de la línea, para reducir la tasa de fallos (limitan los picos de las sobretensiones y reducen las tasas de cebado inverso).

## ***Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 35 -***

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

- La influencia de objetos cercanos a las líneas dependerá de cuán altos sean estos objetos y a qué distancia se encuentren de la línea. En cualquier caso, el efecto del objeto será de “cubrir” a la línea de la descarga atmosférica, aunque también aumentará las posibilidades de cebados inducidos (cuando el CFO de la línea es mayor a 300 kV, se reducen considerablemente estas posibilidades).
- Con valores reducidos de CFO en líneas con tensiones menores a 69 kV, los cables de guarda serán menos efectivos, o inefectivos.
- Según Rusck, la tensión inducida en un conductor de fase debido a descargas que caen a tierra en las cercanías de la línea, se ve reducida por la presencia de un cable puesto a tierra a través de los postes. En este caso, el cable de tierra tiene el mismo efecto tanto si se coloca por encima como por debajo del conductor de fase (en ambos casos, el efecto será más importante si suponemos una conductividad ideal del suelo, y espaciamientos horizontales entre columnas no superiores a los 30 m).
- La siguiente figura presenta la frecuencia del cebado inverso como función de la tensión crítica de cebado inverso (CFO), de una línea de longitud infinita, unifilar, de altura 10 m, sobre suelo conductor. Los valores están normalizados para una densidad cerámica  $N_g$  de 1 rayos/km<sup>2</sup>.año, y puede ser escalada linealmente para diferentes valores de densidad.



**Figura E – Número de descargas de tensión inducida vs nivel de aislación de una línea de distribución.**

- Según IEEE 1410 - 2010<sup>4</sup>, existe una actualización del modelo de Rusck que tiene en cuenta la conductividad del terreno y el tiempo del frente de onda de la descarga. Además, este modelo contempla el método estadístico de Chowdhuri, para poder tener en cuenta la distribución estadística del tiempo de frente de onda de la descarga y su correlación con el valor de pico.

La máxima distancia para la corriente de descarga que produce un cebado inverso de la aislación se obtiene para el valor de tensión de disrupción máxima  $V_{m\acute{a}x} = 1,5 \times CFO$ . El valor de 1,5 es una aproximación que se tiene en cuenta para el aumento en la curva tensión-tiempo de la aislación. Esta aproximación es utilizada para la tensión inducida, cable de guarda de líneas aéreas, y cálculos de espaciamiento de descargadores, y se supone que estas tensiones tienen duraciones mucho menores que el frente de onda de un rayo de 1,2/50  $\mu$ seg.

La mínima distancia  $y_{min}$  para la cual las descargas no afectarán la línea se calculan por medio de:

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (\text{ver Ecuación [25]})$$

<sup>4</sup> IEEE Std 1410 – 2010 “Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”.

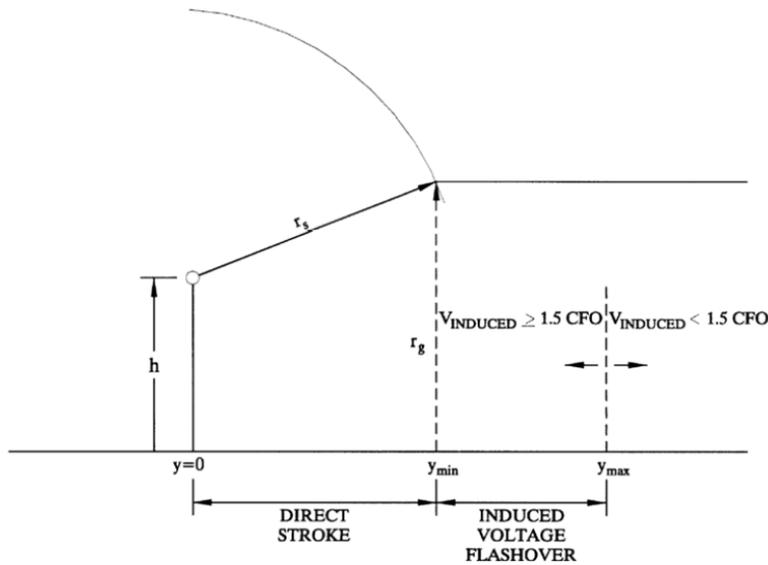


Figura E – Uso del modelo electrogeométrico y modelo Rusck para determinar si es una descarga directa o voltaje inducido.

Ejemplo: para un CFO de 150 kV, y un intervalo de corriente de 49 a 50 kA,  $y_{\text{máx}}$  será 84,6 m, e  $y_{\text{mín}}$  72,5 m.

Otra forma de realizar un análisis de las tensiones inducidas por rayos que caen a tierra en las cercanías de una línea es mediante el método de **Chowdhuri**. Este procedimiento utiliza como modelo de retorno de la corriente del rayo el llamado modelo de Schonland.

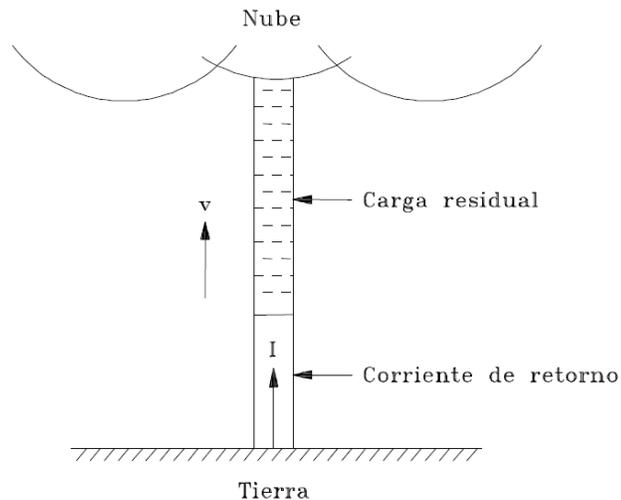


Figura E - Modelo de Schonland.

Tal como muestra la Figura E, la corriente de retorno progresa hacia arriba con velocidad  $v$  neutralizando la carga negativa acumulada en el canal durante el proceso de caída del rayo. El canal del rayo está formado por una columna vertical, la parte baja contiene la corriente y la parte alta la carga residual. De acuerdo con este modelo, el campo eléctrico total  $E$ , creado por el canal del rayo viene expresado por:

$$E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} = E_e + E_m$$

donde  $\Phi$  es el potencial electrostático creado por la carga residual negativa acumulada en la parte alta del canal, y  $A$  es el potencial vector creado por la corriente de retorno del rayo. Si se considera la caída del rayo vertical, la componente  $E_m$  creada por la corriente de retorno es vertical porque el potencial vector  $A$  es vertical.

De acuerdo con este modelo, el campo electromagnético en cualquier punto del espacio producido por el canal del rayo viene dado por dos fuentes: la parte alta de la columna produce la componente electrostática, y la parte baja produce la componente magnética.

Es muy importante tener en cuenta que los efectos durante el proceso de caída se consideran despreciables debido a la baja velocidad con la que se mueve el rayo. No obstante, la carga residual almacenada en la parte alta del canal juega un papel importante en la fase de retorno del rayo, debido a su rápida neutralización por la corriente en su movimiento hacia la nube.

**f) Ángulo de apantallamiento total.**

Se define como apantallamiento total aquel con el cual la tasa de cebados (SFFOR) es nula. El ángulo de apantallamiento perfecto es el máximo

ángulo  $\alpha$  que debe formar la línea que une el cable de guarda y la fase más desfavorable con respecto a una línea vertical. Esto se puede lograr cuando la intensidad crítica y la intensidad máxima de fallo de apantallamiento son iguales. De la Figura 5.12 se obtiene el ángulo de apantallamiento perfecto ( $\alpha_p$ )

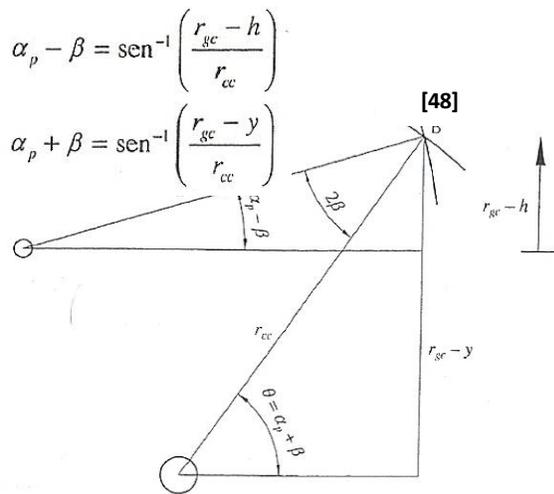


Figura 5.12. Apantallamiento perfecto.

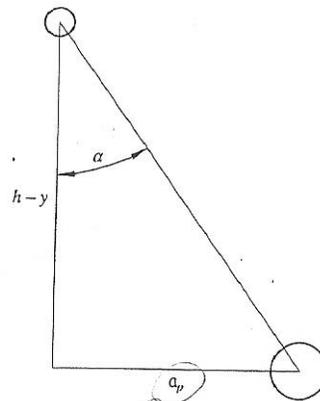


Figura 5.13. Detalle de la Figura 5.6.

donde  $r_{gc}$  y  $r_{cc}$  son respectivamente la distancia crítica de tierra y la distancia crítica de conductor correspondientes a la intensidad crítica ( $I_c$ ).

Sumando las ecuaciones anteriores se obtiene el ángulo de apantallamiento perfecto:

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \cdot \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{r_{gc} - h}{r_{cc}} \right) + \text{sen}^{-1} \left( \frac{r_{gc} - y}{r_{cc}} \right) \right] \quad [49]$$

Otra forma de calcular este ángulo se basa en determinar la distancia horizontal para el apantallamiento perfecto ( $\alpha_p$ )

$$a_p = \sqrt{r_{cc}^2 - (r_{gc} - h)^2} - \sqrt{r_{cc}^2 - (r_{gc} - y)^2} \quad [50]$$

Según la Figura 5.13, el ángulo de apantallamiento perfecto será entonces:

$$\alpha_p = \text{tg}^{-1} \frac{a_p}{h - y} \quad [51]$$

**g) Otros métodos para determinar el apantallamiento.**

Método de BURGSDORF-KOSTENKO

El Número de fallas de una línea de transmisión viene dada por la siguiente expresión:

$$N_{SF} = N_S * P_1 * P_0 * 10^{-4} \quad [52]$$

Donde:

$N_{SF}$ : Número de Salidas/100km/año.

$P_1$ : Probabilidad que la corriente del rayo exceda un valor determinado.

$P_0$ : Probabilidad de Falla de apantallamiento.

$N_S$ : Número de descargas/100km/año

El valor de  $N_S$  define el total de descargas atmosféricas/100 km/año, en función de la densidad de descarga  $N_g$ , altura y separación de los conductores de guarda, y viene dado por la siguiente expresión:

$$N_S = N_g * \left( \frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad [53]$$

Donde:

$N_g$ : Densidad de descarga a tierra por  $\text{km}^2$  al año.

$b$ : Distancia de separación de los cables de guarda (m).

$h$ : Altura de los cables de guarda (m).

El cálculo de la densidad de descargas a tierra:

$$N_g = 0,04 * TD^{1,25} \quad [54]$$

La probabilidad de falla del apantallamiento del hilo de guarda ( $P_0$ ) se expresa en función del ángulo de protección y de la altura, mediante la siguiente expresión:

## **Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 40 -**

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

$$\text{Log}_{10} P_0 = \theta * \sqrt{h} / 90 - 2 \quad [55]$$

Donde:

h: Altura del conductor de guarda (m).

$\theta$ : Angulo de protección en Grados entre la vertical y la recta que une la guarda con el conductor.

La probabilidad  $P_1$  se refiere a la probabilidad que la corriente del rayo  $I_R$  exceda un valor determinado en la Ec. [53], y se define como:

$$P(I_R > I) = \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{I}{I_{first}} \right)^{2.6}} \right) \quad [56]$$

La Ec. [56] representa una curva llamada la Curva de Anderson-Eriksson, cuya probabilidad disminuye a medida que la corriente del rayo aumenta. Para el caso de una corriente de 10 kA, se obtiene un valor de  $P_1$  de 95%, lo que significa que existe el 95% de probabilidad que la corriente del rayo exceda los 10 kA (es decir, el 95% de los rayos que caen, son de una corriente de por lo menos 10 kA). Aquí se origina la necesidad, de determinar el valor de corriente que una vez impactado sobre el conductor, puede originar contorneo, y es llamada Corriente Crítica de Cebado ( $I_c$ ). Este concepto está claramente definido como:

$$I_c = \frac{CFO}{\frac{Z_{surge}}{2}} \quad [57]$$

Donde:

CFO: Voltaje crítico que produce cebado de sus siglas en inglés "Critical Flash Over".

$Z_{surge}$ : Impedancia del conductor ante el frente de onda atmosférico.

El valor de CFO es la tensión crítica de impulso suministrada por el fabricante de aisladores.

La  $Z_{surge}$  se calcula mediante la expresión:

$$Z_{surge} = 60 * \sqrt{\text{Ln} \frac{2h}{R} \text{Ln} \frac{2h}{R_c}} \quad [58]$$

Donde:

h: Altura promedio del conductor bajo estudio (m).

R: Radio del conductor (m).

$R_c$ : Radio por efecto corona del conductor para un gradiente de potencial  $E_0=1500$  kV/m.

Si no se tiene en cuenta el efecto corona, puede utilizarse la siguiente expresión:

$$Z_{surge} = 60 * \text{Ln} \frac{2h}{d} \quad [59]$$

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 41 -**  
Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Para el cálculo de  $R_c$  se usa la siguiente expresión, demostrada como:

$$R_c * \ln \frac{2h}{R_c} = \frac{V}{E_0} \quad [60]$$

Para obtener el valor de  $R_c$ , deben realizarse iteraciones para  $h$ ,  $V$  y  $E_0$ .

Finalmente, con los valores calculados se obtiene el  $N_{SF}$ : Número de Salidas/100km/año. Si se lo multiplica por la longitud de la línea, se obtiene la tasa  $T_s$  de salidas de la línea:

$$T_s = N_{SF} * \text{Longitud de la línea} \quad [61]$$

Método de WHITEHEAD

El ángulo de apantallamiento está definido como el formado por la recta entre el hilo de guarda y tierra, y la recta entre el hilo de guarda y el conductor, tal como se muestra en la Fig. 2, el cual será negativo o positivo, dependiendo de la posición relativa entre el hilo de guarda y el conductor de fase.

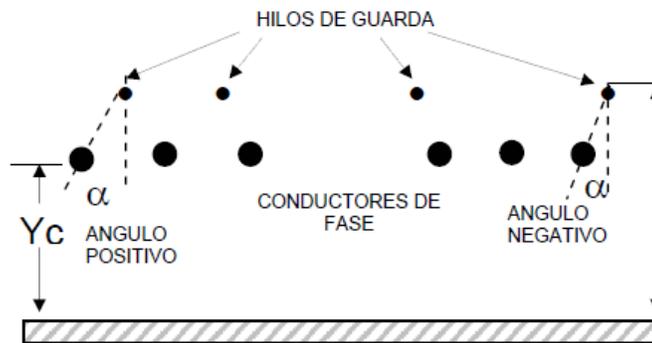


Fig 2. Angulo de Apantallamiento

Este método se basa en el modelo geométrico de la línea (Fig. 3) y es de naturaleza analítica, definiéndose una distancia disruptiva  $r_c$  para lo cual la descarga piloto del rayo puede alcanzar y exceder el gradiente crítico de ruptura en su trayecto hacia un objeto a tierra, en este caso el hilo de guarda. Esta distancia  $r_c$  es directamente proporcional al valor de la corriente del rayo incidente y viene dado por la expresión:

$$r_c = 10 * I^{0,65} \quad [62]$$

Donde  $I$  es el valor de la corriente del rayo.

Se define la distancia  $r_g$  (para el caso de una torre menor de 40 m) como:

$$r_g = (3,6 + 1,7 \ln (43 - Y_c)) * I^{0,65} \quad [63]$$

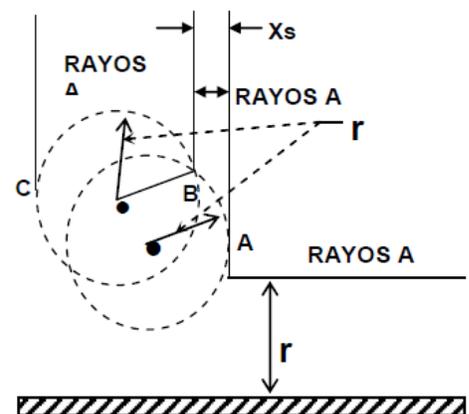


Fig. 3. Modelo electro-geométrico

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 42 -**  
Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Donde  $Y_c$  es la altura promedio del conductor.

Otros autores definen el valor de  $r_g = \beta \cdot r_c$ , donde consideran el valor de  $\beta = 0,9$ .

En la fig. 4, se definen el arco PQ como la ventana de atracción al rayo, la cual es menor a medida que la corriente del rayo aumenta, haciendo que el rayo caiga en el hilo de guarda o directamente a tierra. La proyección de esta ventana al plano de tierra se define como  $X_s$ , la cual se demuestra, y se calcula como:

Si  $r_g > Y_c$ :

$$X_s = r_c \cdot [\cos \theta + \sin(\alpha - \omega)] \quad [64]$$

$$\omega = \arccos \frac{D_{gc}}{2 \cdot r_c} \quad [66]$$

$$\theta = \arcsen \frac{r_g - Y_c}{r_c} \quad [65]$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{X_c - X_g}{h - Y_c} \right) \quad [67]$$

Donde:

- $Y_c$ : Altura promedio del conductor (m).
- $D_{gc}$ : Distancia entre la guarda y el conductor (m).
- $X_c$ : Coordenada del conductor en el plano X (m).
- $X_g$ : Coordenada del hilo de guarda en el plano Y (m).
- $h$ : Coordenada del hilo de guarda en el plano Y (m).

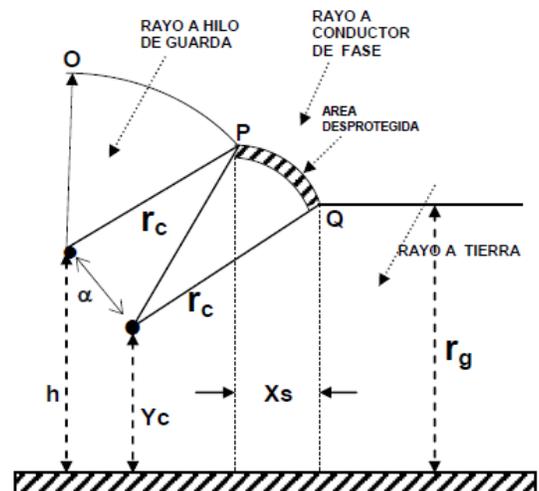


Fig.4. Ventana de Atracción al rayo.

Si  $r_g < Y_c$ , entonces  $\cos \theta = 1$  y la Ec. [64], se convierte en:

$$X_s = r_c \cdot [1 + \sin(\alpha - \omega)]$$

El valor de  $X_s$  máximo se obtiene para el caso de que  $r_g = Y_c$  ( $r_g =$  altura promedio del conductor).

A medida que la corriente del rayo aumenta, se debe obtener el valor de corriente para la cual la ventana de atracción es cero ( $X_s = 0$ ). Esto puede realizarse haciendo cálculos iterativos, o bien Anderson (1975) describe un método gráfico para obtener esta corriente máxima, la cual utiliza una pendiente  $m$  como:

$$m = \tan \alpha$$

Con este valor de  $m$  y con el valor de

$$\beta = r_c / r_g = 0,9$$

En la fig. 5 obtenemos el valor de  $S_p$ , el cual se multiplica por un valor de

$$Y_0 = (Y_g + Y_c) / 2$$

obteniéndose el valor de  $S_{MAX}$ .

$$I_{MAX} = 0,029 * S_{MAX}^{1,54}$$

El número de Salidas/100km/año de la línea viene dado, según Anderson, como:

$$N_{SF} = N_g * X_{S_{MAX}} / 2 * (P_{min} - P_{max})$$

Donde:

$N_g$ : Densidad de descargas/km<sup>2</sup>/año.

$X_{S_{MAX}}$ : Es el área máxima desprotegida (m).

$P_{min}$ : Es la probabilidad de que el rayo exceda  $I_{min}$ .

$P_{max}$ : Es la probabilidad de que el rayo exceda  $I_{max}$ .

Según Anderson, este valor de  $NSF$  es para un solo hilo de guarda y un conductor. Si existen más conductores de fase expuestos o más hilo de guarda, se deben calcular separadamente la contribución de  $NSF$  para cada caso y sumarla al final.

#### Método gráfico para determinar el ángulo de apantallamiento

Se presenta una forma práctica de verificar o diseñar un ángulo de apantallamiento en función de la densidad de descargas atmosféricas y altura del conductor de guarda, para obtener un valor de  $NSF=0,05$  salidas/100km/año (Considerado Aceptable) como se muestra en la Fig. 6.

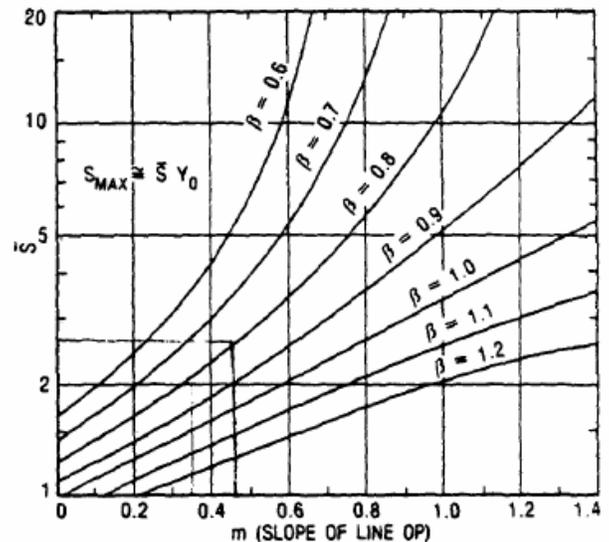


Fig. 5. Factor para hallas  $S_p$ .

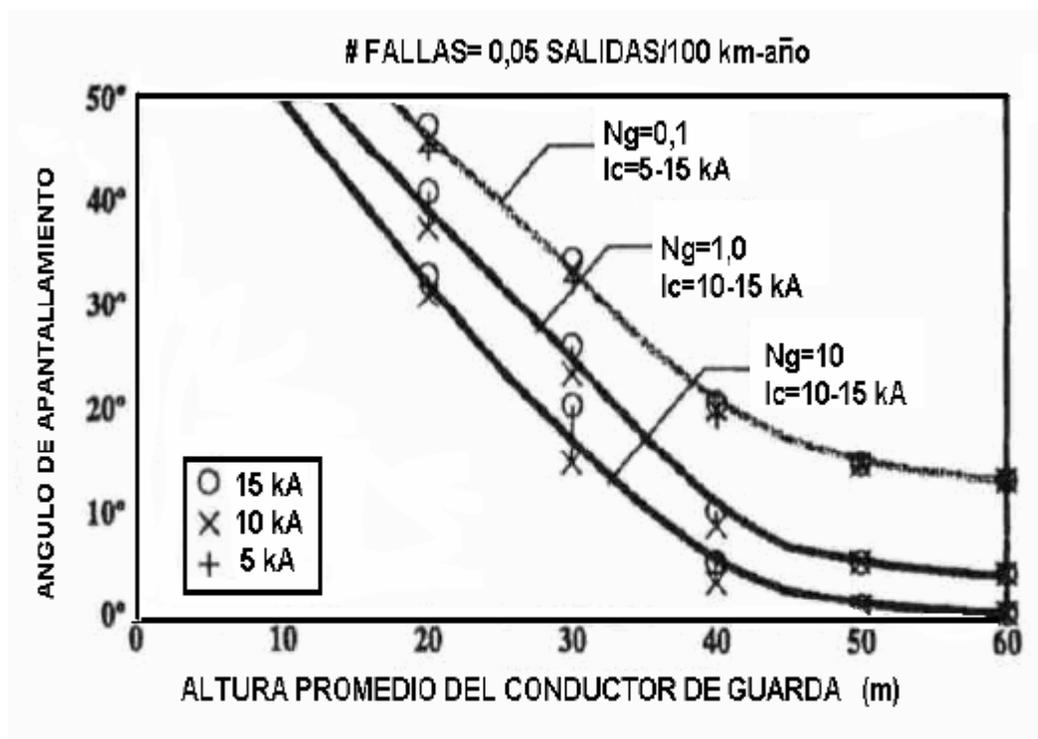


Fig. 6. Método gráfico para determinar falla de apantallamiento

### 2.3.2 Apantallamiento de Estaciones Transformadoras.

Las descargas que alcanzan las EE.TT. y los tramos de línea próximos a ellas, son las más peligrosas, ya que las sobretensiones no son amortiguadas por la longitud de línea.

Existen 3 opciones para proteger las Estaciones contra descargas atmosféricas: la instalación de cables de guarda, la instalación de pararrayos, (descargadores?) y un método mixto.

El apantallamiento con cables de guarda consiste en la unión de los diferentes extremos de los pórticos de la subestación mediante cables de guarda, los cuales atraen las descargas atmosféricas y las derivan a tierra.

Para proteger la subestación con pararrayos éstas se instalan en puntos elevados cercanos a las instalaciones más críticas de la subestación (transformadores, interruptores, etc.) para que las posibles descargas vayan a tierra a través de ellas.

El método mixto consiste en apantallar parte de la subestación con cables de guarda, e instalar pararrayos en lugares especialmente críticos. Por ejemplo, puede apantallarse la parte más elevada de la subestación (llegada de las líneas) y proteger con pararrayos los transformadores. También puede apantallarse totalmente la Estación y además instalar pararrayos en puntos donde quiera reforzarse la seguridad.

El diseño del apantallamiento de subestaciones se basa en principios del diseño de corriente. Al igual que en el apantallamiento de líneas eléctricas, para el cálculo de las distancias críticas se utilizan las ecuaciones de IEEE Std 998-1996:

$$r_s = \gamma_s \cdot r_g$$

$$r_c = \gamma_c \cdot r_g \quad [52]$$

Con los parámetros:

$$r_g = 8 \cdot I^{0,65} \quad [53]$$

$$\gamma_s = \gamma_c = 1$$

**a) Apantallamiento de Estaciones Transformadoras con cable de guarda.**

En la Figura 5.16 se determinan las zonas de apantallamiento cuando los dos cables de guarda están muy alejados uno de otro; de tal manera que los arcos trazados con centro en el cable de guarda con radio  $r_s$ , no se cortan o si lo hacen es por debajo de la horizontal trazada a una distancia  $r_g$  desde el suelo.

Para construir estas zonas de apantallamiento, se traza un arco con centro en los cables de guarda con un radio  $r_s$ , hasta que corte con la distancia crítica  $r_g$ . Con centro en esta intersección se dibuja un arco de radio  $r_c$ , y así cualquier objeto situado por debajo de este cono está protegido. La zona de apantallamiento es la misma que en el caso de protección de líneas eléctricas con un único cable de guarda. Al igual que en secciones anteriores, el valor de  $a$  de la Figura 5.16 viene dado por:

$$a = a_0 - R_{PO}$$

$$a_0 = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad [54]$$

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}$$

La Figura 5.17 muestra la zona de apantallamiento cuando los cables de guarda están lo suficientemente próximos, de forma que los arcos trazados con centro en los cables de guarda y de radio  $r_s$  se cortan en un punto por encima de la horizontal a una distancia  $r_g$  del suelo. En este caso la descarga de un rayo entre los dos cables de guarda impactará siempre en los cables de guarda. La zona de protección está descrita por un simple arco de radio  $r_c$  con centro en la intersección de los dos arcos de los cables de guarda como se ve en la Figura 5.17.

La zona de protección entre los cables de guarda está definida por las distancias  $a_c$  o  $R_{PC}$ , cuyas expresiones se deducen a partir de la geometría de la Figura 5.18.

$$R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - \left( h - y + \sqrt{r_s^2 - R_C^2} \right)^2} \quad [55]$$

$$a_c = R_C - R_{PC}$$

Donde  $R_C$  es la mitad de la distancia horizontal entre los cables de guarda  $S_g$ .

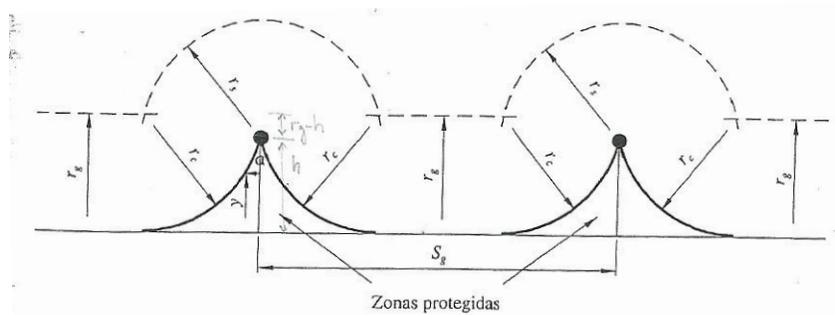


Figura 5.16. Zona de apantallamiento para dos cables de guarda remotos.

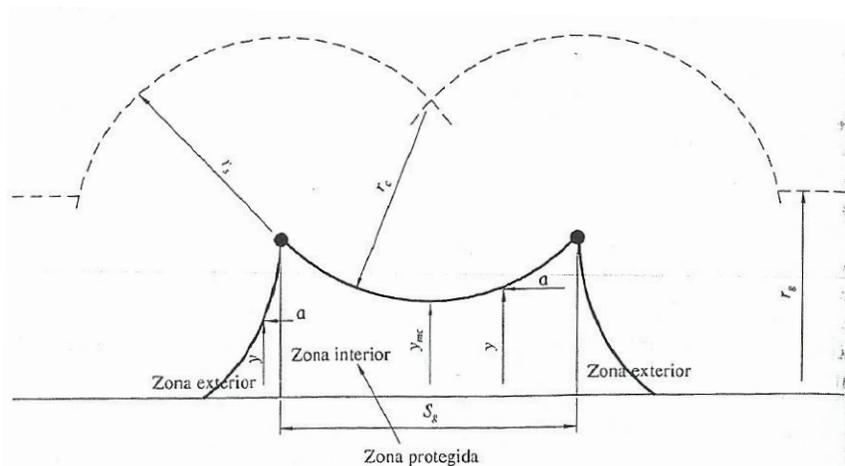


Figura 5.17. Zona de apantallamiento acortando la distancia de separación entre cables.

La altura mínima de apantallamiento  $y_{mc}$  como se observa en la Figura 5.17, tiene lugar en la mitad de la distancia horizontal entre los cables de guarda, y puede calcularse igualando  $R_{PC}$  a cero en la ecuación (5.4) o bien directamente de la Figura 5.18 como

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad [56]$$

donde  $h$  es la altura de los cables de guarda,  $r_c$  es la distancia crítica del objeto a proteger,  $r_s$  es la distancia crítica del cable de guarda y  $R_c$  es la mitad de la distancia horizontal entre los cables de guarda ( $S_g$ ).

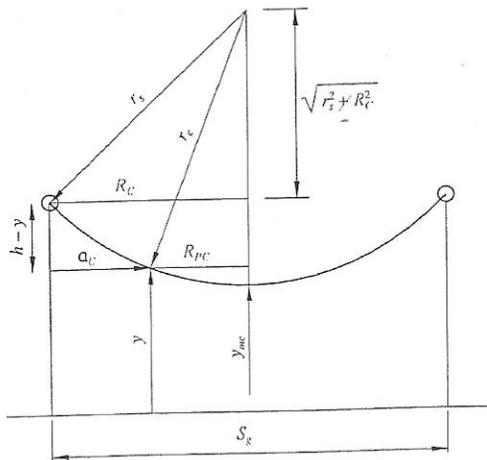


Figura 5.18. Diagrama de apantallamiento con dos cables de guarda.

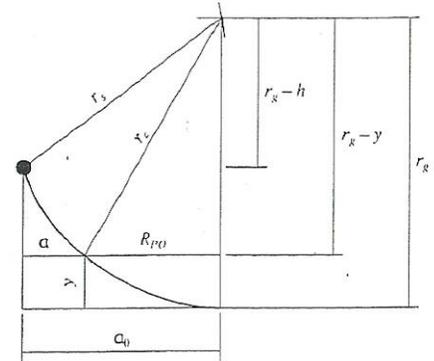


Figura 5.19. Apantallamiento fuera de los cables de guarda.

La zona de apantallamiento exterior a los cables de guarda viene descrita por la ecuación:

$$r_s = \gamma_s \cdot r_g$$

$$r_c = \gamma_c \cdot r_g$$

que es exactamente igual a la zona de protección de un único cable de guarda, como se indica en la Figura 5.19.

Comparando la Figura 5.16 y la Figura 5.17 se observa que la zona de apantallamiento es considerablemente mayor en este segundo caso.

**b) Apantallamiento de Estaciones Transformadoras mediante pararrayos.**

Al igual que ocurre con los cables de guarda, los pararrayos no trabajan de la misma forma en solitario que acompañadas por otros pararrayos, debido a que interactúan entre ellos y tierra para ofrecer una mejor zona de protección. De esta forma se pueden dar tres casos fundamentales de protección: con un único pararrayos, con dos, y con tres.

**Un pararrayos:**

El apantallamiento basado en una única pararrayo está descrito con las mismas ecuaciones que en el caso de pantalla con un único cable de guarda:

$$a = a_0 - R_{p0}$$

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$$

$$R_{p0} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}$$

[57]

Ahora, a diferencia del caso con un único cable de guarda, las cantidades a y a<sub>0</sub> son radios de círculos como se muestra en la vista de planta de la Figura 5.20. En particular, a<sub>0</sub> es el radio de la zona de apantallamiento para un objeto de altura nula y a es el radio de la zona de apantallamiento de ese mismo objeto situado a una altura y.

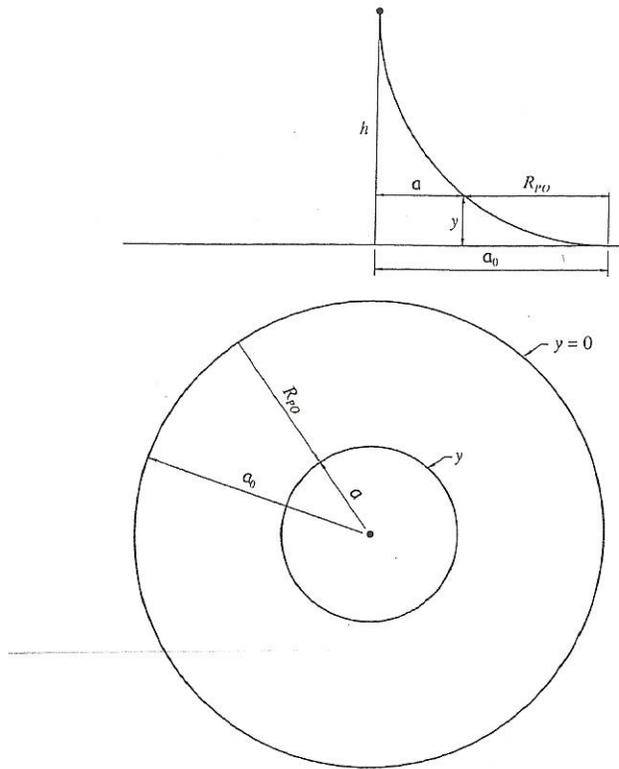


Figura 5.20. Zona de apantallamiento para una única punta Franklin.

### **Dos pararrayos:**

El análisis del apantallamiento con dos o más pararrayos es un problema tridimensional, cuya visualización es difícil.

Las zonas de acción de los pararrayos tienen forma esférica de radio  $r_s$ , y centro en cada pararrayo. El plano a una altura  $r_g$  del suelo representa la zona de actuación de tierra. Si los pararrayos están lo suficientemente próximos entre sí, ambas esferas determinan una zona de protección en la que el efecto de tierra está todavía presente, como ilustra la Figura 5.21, al contrario de lo que pasaba con la zona apantallada por dos cables de guarda.

Las intersecciones críticas (puntos A y A' de la Figura 5.22) se encuentran donde ambas esferas de radio  $r_s$ , cortan con el plano paralelo a tierra a una altura  $r_g$  del suelo. Estos puntos determinan el radio  $a_0$  que es la separación máxima de los pararrayos a la que se debe encontrar un objeto de altura nula para que esté apantallado por los dos pararrayos (Figura 5.22).

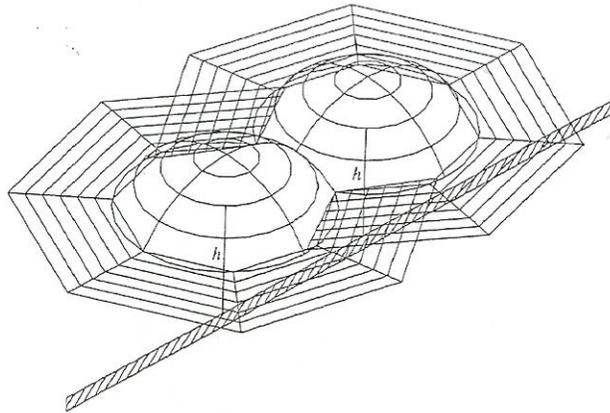


Figura 5.21. Vista tridimensional del apantallamiento debajo de dos puntas Franklin.

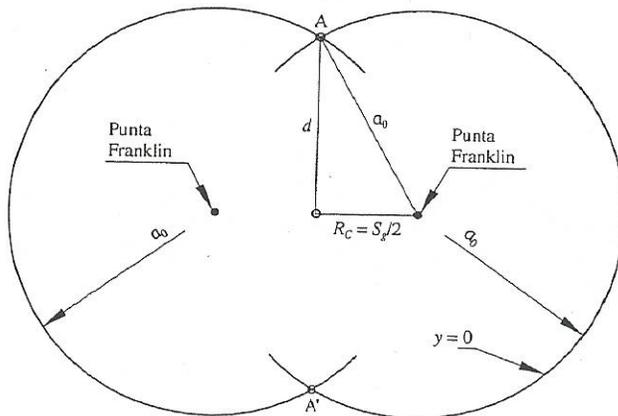


Figura 5.22. Vista en planta de la zona apantallada por dos puntas Franklin.

La Figura 5.23 muestra la intersección crítica (punto A) con las distancias críticas, de donde

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad [58]$$

que es idéntica a la distancia  $a_0$  calculada para el caso de un único cable de guarda y para la zona exterior del apantallamiento con dos cables de guarda.

Asimismo, la distancia  $d$  (distancia de los puntos críticos A y A' a la recta que une los pararrayos) está dada por:

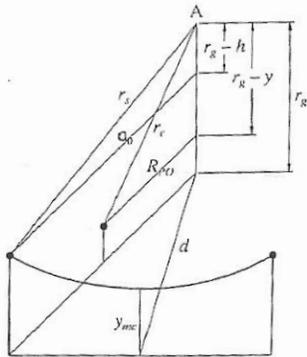


Figura 5.23. Esquema del problema de dos puntas Franklin.

$$d = \sqrt{a_0^2 - R_c^2} \quad [59]$$

$$h = r_g - \sqrt{r_s^2 - R_c^2 - d^2} = r_g - \sqrt{r_s^2 - a_0^2}$$

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}$$

$$y_{m2} = r_g - \sqrt{r_c^2 - a_0^2 + R_c^2}$$

donde  $R_c$  es la mitad de la distancia entre los pararrayos. Combinando las dos últimas ecuaciones se obtiene la altura  $h$  a la que han de estar los pararrayos. El radio de apantallamiento  $R_{PO}$  es la mínima distancia de los puntos críticos (A y A') a la que debe situarse un objeto de altura  $y$  para que se encuentre apantallado. Esta distancia  $R_{PO}$  se obtiene de la Figura 5.23. La distancia  $y_{m2}$  es la mínima altura de protección en la línea que une los dos pararrayos. Esta se da en el medio de dicha línea y se obtiene igualando el radio de apantallamiento ( $R_{PO}$ ) a la distancia  $d$ .

En la Figura 5.24 se muestra la zona de apantallamiento que resulta de una protección con dos pararrayos descrita por líneas de igual altura que el elemento que se protege ( $y$ ); así a lo largo de cada línea un elemento está protegido siempre y cuando su altura sea igual o menor que la indicada por dicha línea.

La zona de protección en el exterior de los pararrayos, donde las zonas de acción de ambas puntas no se cortan, es idéntica a la que se obtiene en el caso de un único pararrayo.

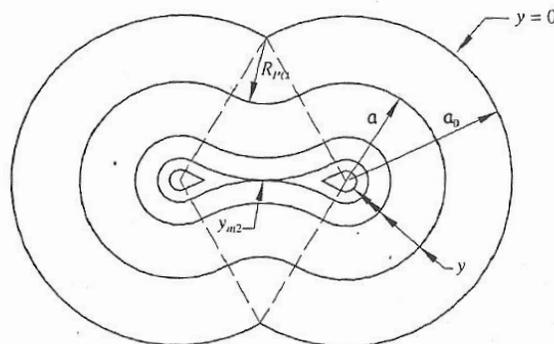


Figura 5.24. Zona apantallada para dos puntas Franklin.

### Tres pararrayos:

Asumiendo que la altura de las tres pararrayos colocadas en las esquinas de un triángulo son iguales, como se muestra en la Figura 5.25, las zonas de acción representadas por tres esferas de radio  $r_s$  y centradas en las puntas se deben cortar en el medio del triángulo, siendo  $R_c$  la distancia horizontal de dicho punto a cada uno de los vértices del triángulo. Dicho valor, como se muestra en la Figura 5.26, es:

**Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 51 -**  
**Cátedra:** Transmisión y Distribución de la Energía

$$R_c = \frac{a \cdot c}{2 \cdot h_b} = \frac{a}{2 \cdot \text{sen } \alpha}$$

[60]

Como en el caso de apantallamiento con dos cables de guarda, la distancia crítica de tierra  $r_g$  no interviene para nada mientras la distancia del punto de corte entre las esferas y tierra sea mayor que  $r_g$ .

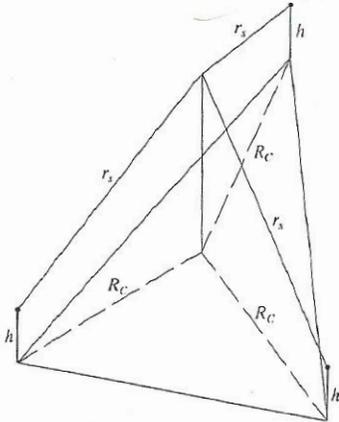


Figura 5.25.  $R_c$  es la distancia al punto central.

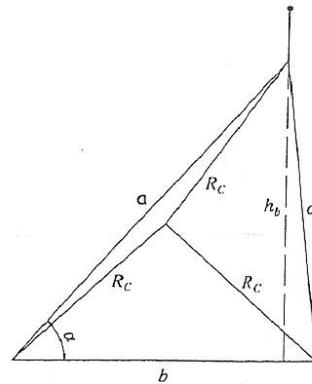


Figura 5.26. Calculando la distancia  $R_c$ .

De las Figuras 5.27 y 5.13 se calcula la altura mínima  $Y_{mc}$ , así como el radio de apantallamiento  $R_{PO}$ :

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2}$$

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2}$$

[60]

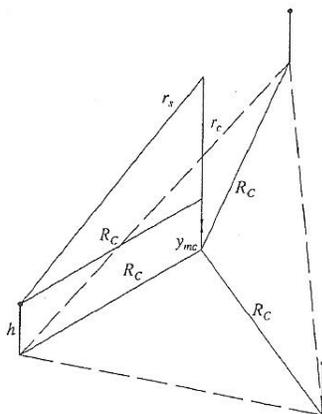


Figura 5.27. Buscando  $y_{mc}$ .

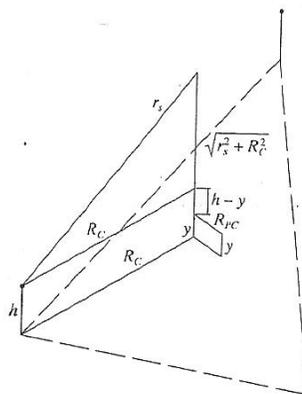


Figura 5.28. Apantallamiento dentro del triángulo.

La distancia  $R_{PC}$  es el radio de un círculo centrado en la mitad del triángulo descrito por los pararrayos. Como se muestra en la Figura 5.29, la altura mínima de la zona de apantallamiento es  $Y_{mc}$  y se encuentra en el centro del triángulo. Desde este punto se dibujan círculos de radio  $R_{PC}$  para calcular las zonas de protección para objetos de diferentes alturas ( $Y_2 > Y_1 > Y_{mc}$ ).

La zona de protección resultante de un apantallamiento con tres pararrayos es la mostrada en la Figura 5.29. Para la zona exterior al triángulo se considera el caso de dos pararrayos, por lo que ya interviene la influencia de la tierra.

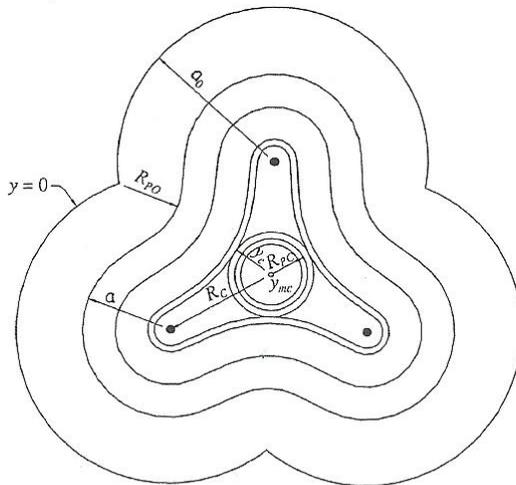


Figura 5.29. Vista en planta de la zona de apantallamiento para tres puntas Franklin.

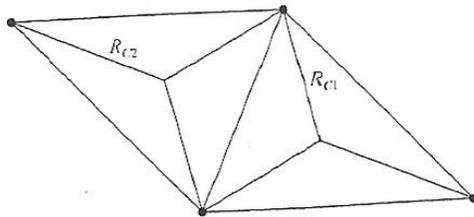


Figura 5.30. Un caso con cuatro puntas Franklin se puede dividir en dos casos de tres puntas Franklin.

### **Más de tres pararrayos:**

El caso de tres pararrayos representa el problema básico porque, si existen más de tres pararrayos, el problema se trata como series de tres pararrayos. Así el problema mostrado en la Figura 5.30 se descompone en dos configuraciones de tres pararrayos diferentes cada una con su propio valor de  $R_C$ . En el caso de configuraciones en forma rectangular o trapezoidal, que se dan en la práctica frecuentemente, los dos triángulos en los se puede descomponer la figura son iguales, por lo que las distancias de las diagonales coinciden un único valor  $R_C$ . Para otros casos especiales de cuatro pararrayos, se deberá consultar bibliografía, ya que este apunte no se extenderá más en este tema particular.

**Casos especiales de apantallamientos de Estaciones:**

Debido a las irregularidades que se encuentran en las formas constructivas de la Estaciones (pórticos de diferentes alturas, distribuciones en planta irregulares, etc.) se dan en ocasiones casos especiales de apantallamientos.

Estos casos especiales son:

- Pararrayos a diferentes alturas,
- Cables de guarda soportados por pórticos de altura diferente,
- Cables de guarda no paralelos,
- Cables de guarda junto con pararrayos, etc.

En este apunte se hace mención de estos casos especiales, pero no se hará un desarrollo de los mismos, dejando al interesado la bibliografía de consulta, para poder profundizarlo si así lo desea.

**Comparativa entre Pararrayos y Cables de guarda:**

Generalmente los pararrayos son más seguros ante fallas debido a roturas, y más económicos que los cables de guarda. Sin embargo, estos últimos tienen mayor versatilidad de colocación dentro de la Estación pudiendo apantallar mejor en zonas lejanas de los pórticos.

Como todas las Estaciones no son iguales, tampoco los sistemas de apantallamiento protegen por igual. Debido a esto se hace necesario un estudio detallado para cada caso y así conseguir el apantallamiento óptimo (buenas zonas de apantallamiento, seguridad ante posibles roturas, y diseño económico).

**2.4. Método de la esfera rodante.**

En la Norma IRAM 2184-1 (Año 2006) "Protección de las estructuras contra descargas atmosféricas", obtenida a partir de la Norma Internacional IEC 61024-1 (Año 1990), se dictan los principios generales para el diseño, instalación, inspección, y mantenimiento de sistemas eficaces de protección contra rayos, para estructuras comunes de hasta 60m de altura. Es importante aclarar que la Norma no cubre los sistemas de protección contra rayos destinados a (entre otros):

- Sistemas (redes) de generación, transporte y distribución de energía eléctrica, exteriores a un edificio.

Para encontrar las zonas de protección contra descargas atmosféricas, utilizando ya sea pararrayos o hilo de guarda, se utiliza el método de la esfera rodante (o ficticia).

Cuando se utiliza este método, la disposición del dispositivo captor es adecuada, si ningún punto del volumen a proteger está en contacto con la esfera R que rueda sobre el suelo, alrededor y sobre la estructura en todas las direcciones posibles. Por esta razón, la esfera no podrá tocar más que el suelo y/o cada dispositivo captor (ver la Figura A.1 siguiente). El radio R es función del nivel de protección (ver la Tabla 1 de este capítulo). Los dispositivos captadores se disponen en todo punto o segmento de tal modo que entren en contacto con la esfera rodante cuyo radio R deberá corresponder al nivel de protección elegido.

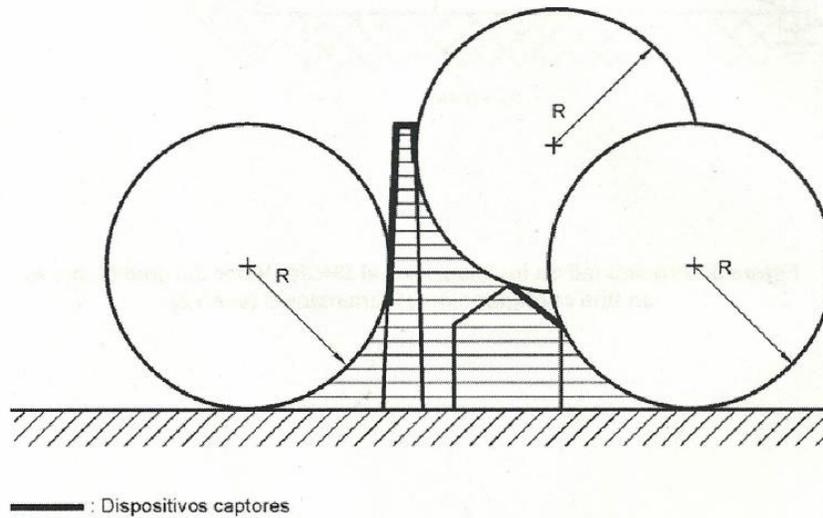
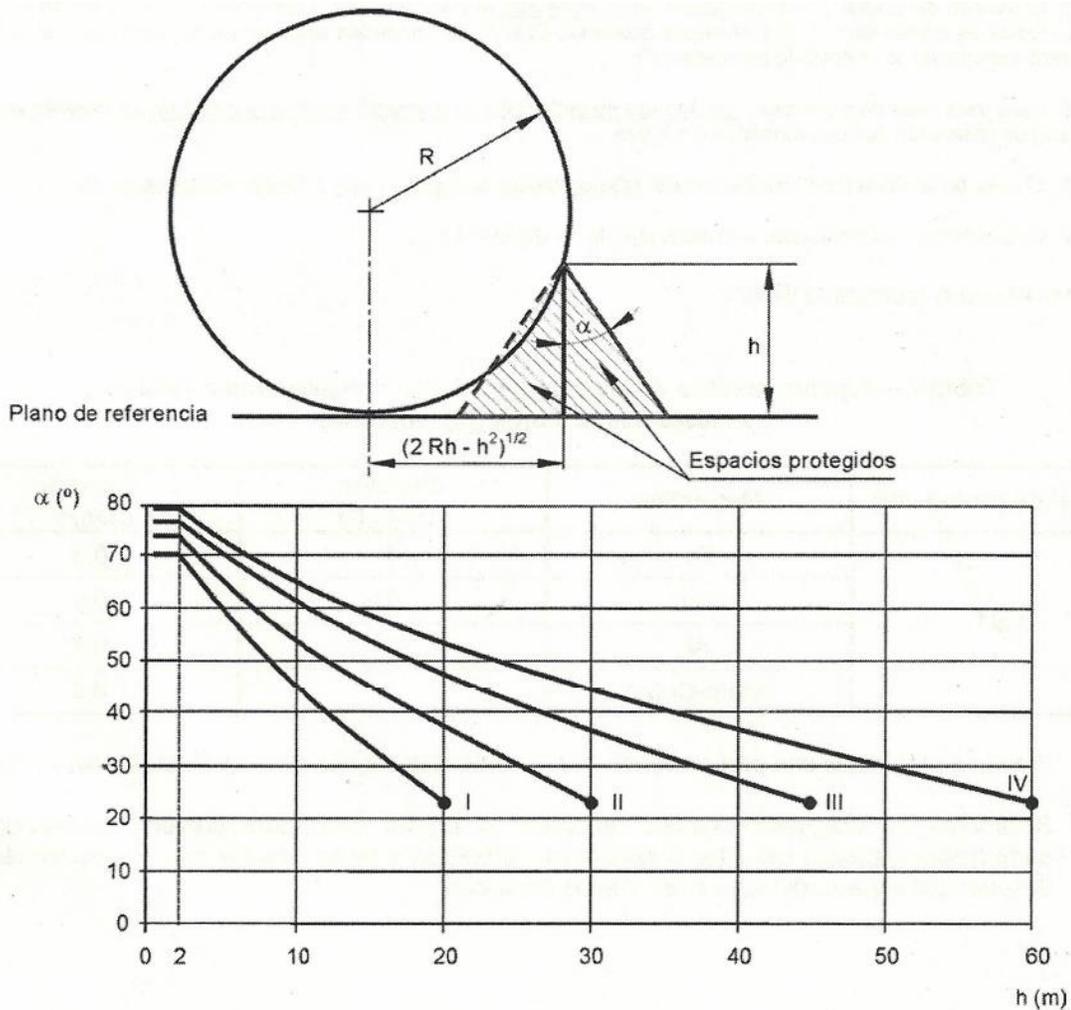


Figura A.1 – Diseño de dispositivos captadores por el método de la esfera rodante

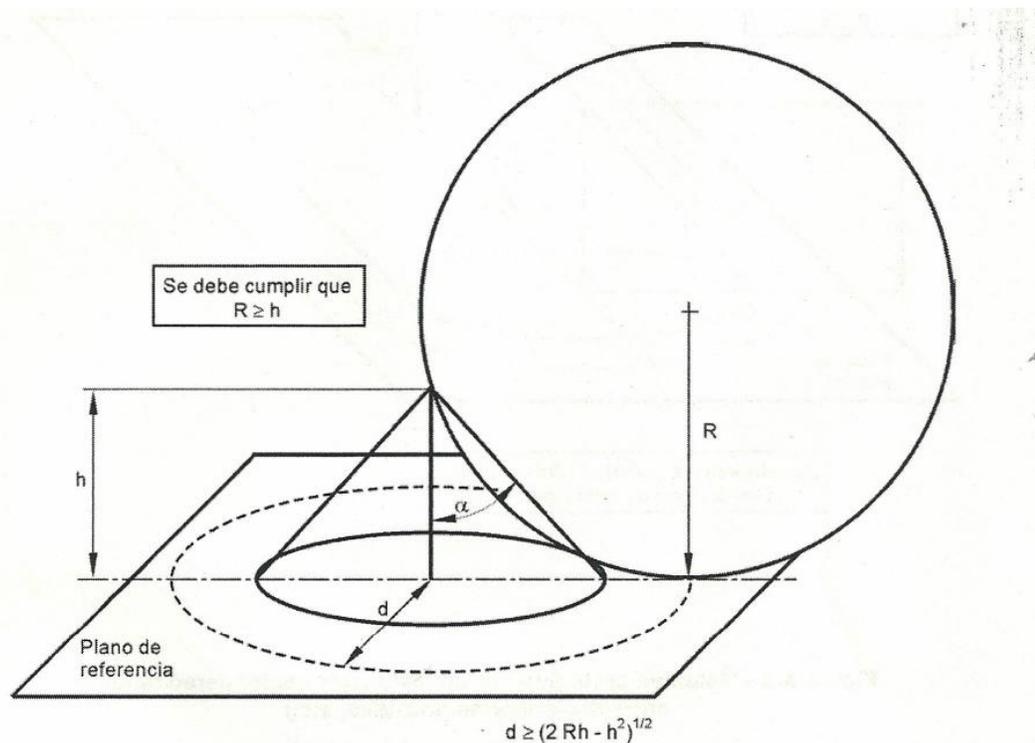
Tabla 1 - Colocación del dispositivo captador en función del nivel de protección

Nivel de protección	Métodos de protección		
	De la esfera rodante	De las mallas	Del ángulo $\alpha$ de protección
	Radio R [m]	Dimensiones máximas [m x m]	Valores de $\alpha$ ( $^{\circ}$ )
I	20	5 x 5	Véanse la figura y el gráfico debajo de esta tabla
II	30	10 x 10	
III	45	15 x 15	
IV	60	20 x 20	



**Volumen protegido por un conductor vertical (ej.: pararrayos)**

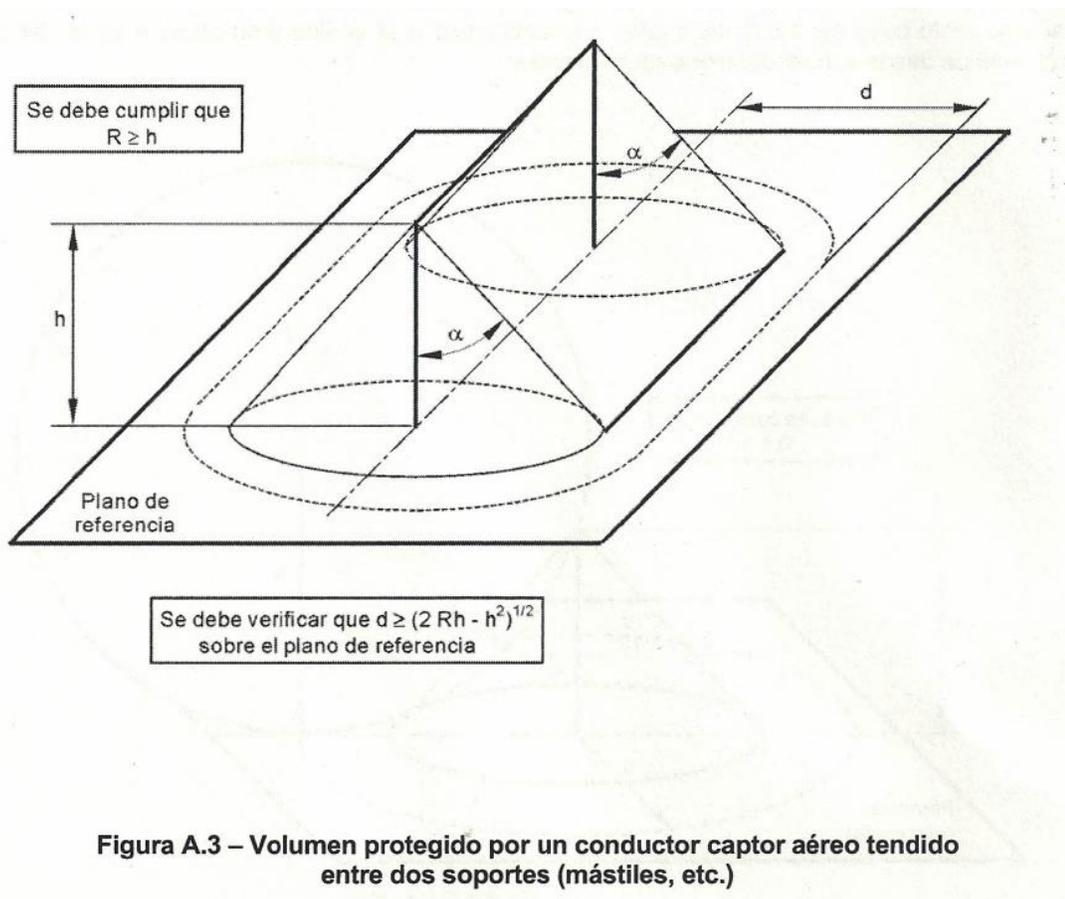
Puede aplicarse el método de la esfera rodante. En aquellos casos que el ángulo  $\alpha$  (función del nivel de protección y de la altura) se encuentre en el gráfico de la Figura A.1 y en el gráfico de la Tabla 1, el volumen protegido por el captor vertical se considera como el volumen de un cono recto cuyo eje es el del captor, su semiángulo  $\alpha$  al vértice y su altura  $h$  es la del captor vertical, medida desde el nivel del plano de referencia.



**Figura A.2 – Volumen protegido por un captor vertical**

***Volumen protegido por un conductor (hilo) tendido entre 2 soportes***

El volumen protegido por un conductor tendido está definido por la composición de los volúmenes protegidos por los captosres verticales virtuales cuyos vértices están en el conductor. Un ejemplo de volumen protegido se da en la Figura A.3. (Ver la Tabla 1).



### ***Volumen protegido por mallas de conductores captadores horizontales***

El volumen protegido por mallas de conductores se define por:

- El volumen incluido en las mallas,
- El volumen generado por el desplazamiento de la esfera rodante del captor vertical virtual a lo largo del conductor periférico de la (s) malla (s).

En aquellos casos en que el ángulo  $\alpha$  (función del nivel de protección y de la altura  $h$ ) se encuentre en el gráfico y la figura de la Tabla 1, se podrá considerar el volumen obtenido de la aplicación del método del cono.

Un ejemplo de volumen protegido por mallas de conductores captadores horizontales se da en la siguiente Figura A.4.

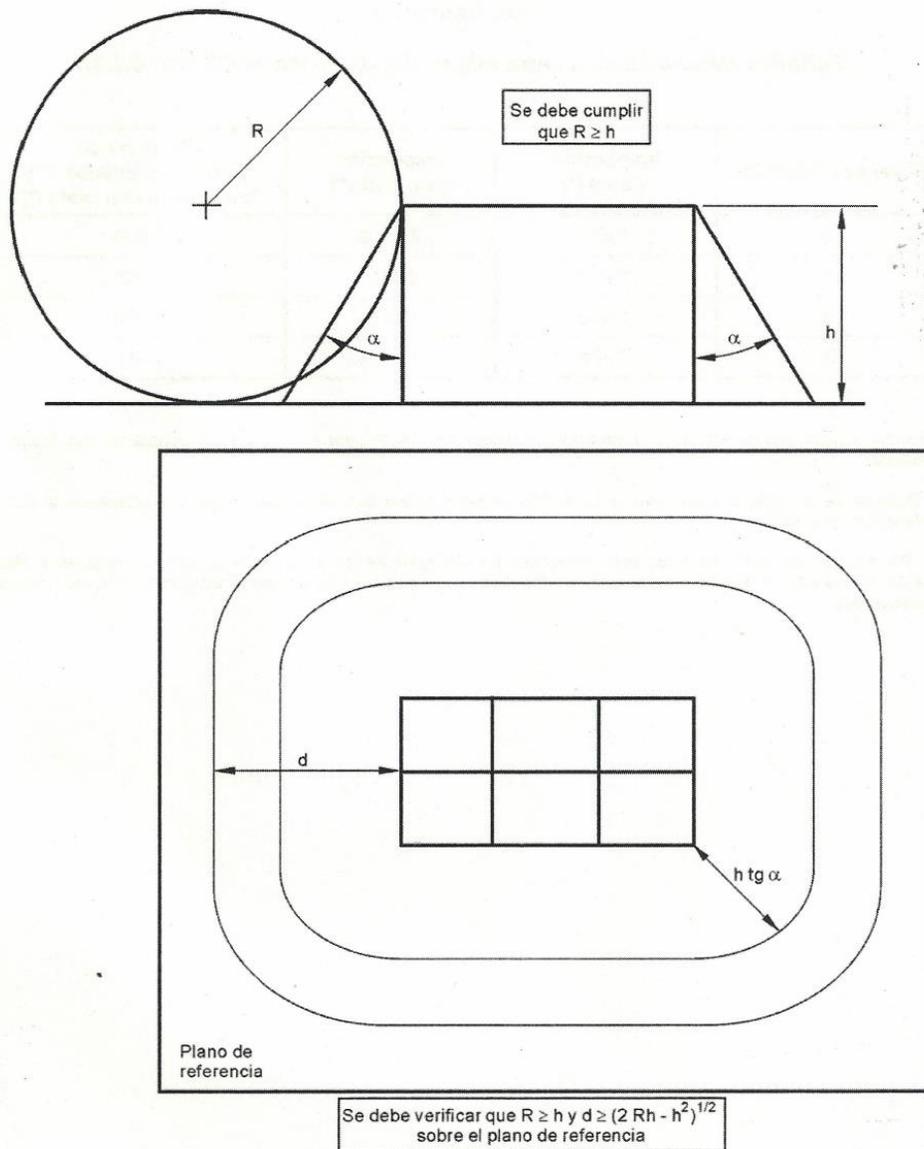


Figura A.4 – Volumen protegido por una malla de conductores captadores horizontales

***Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas - 59 -***  
Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía

Bibliografía:

- Los Sistemas de Potencia – Walter Brockering Christie, Rodrigo Palma Behnke, Luis Vargas Díaz) – Ed. Prentice Hall.
- IEEE 998 (2010) - Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations.
- IEEE 1410 (2010) - Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.
- Norma IRAM 2184 – 1 (2000) – Protección de las estructuras contra las descargas eléctricas atmosféricas.
- Coordinación de aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión – Capítulo 5 – Miguel García-Gracia, José M. García Rubio, Luis Montañés Bellosta.
- Principios para la coordinación de los niveles de aislación.- Ing. J. Rinbrugent.
- C.E.A.C. – Estaciones Transformadoras.
- Técnica de A.T. – Roth.
- Zappetti – Estaciones Transformadoras.
- Sobre tensiones en redes de A.T. – Dr. F. Crespo
- Análisis del comportamiento de líneas aéreas frente al rayo (Apunte de cátedra) – UTN F. R. Concordia.