

FRANK MICHAEL TERAN QUIROGA
SILVIA M. VILLARROEL VASQUEZ
GABRIEL ENRRIQUEZ MIRANDA

APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES

- ◉ INTRODUCCION
- ◉ DESCRIPCION DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA
- ◉ NIVEL CERAUNICO
- ◉ MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA DESCARGAS ATOMOSFERICAS DIRECTAS
 - MODELO ELECTROGEOMETRICO
 - METODO GRAFICO
 - EJEMPLO DE APLICACION

INTRODUCCION

- ⦿ Subestaciones instaladas a la intemperie- Protección (componente, transformador)
 - Descargas atmosféricas directas (rayo).
- ⦿ Apantallamiento : Es la disposición física de los elementos de protección instalados (hilos de guardia, bayonetas, mástiles) que tienen como objetivo principal proteger a los componentes de la subestación.

DESCRIPCION DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA

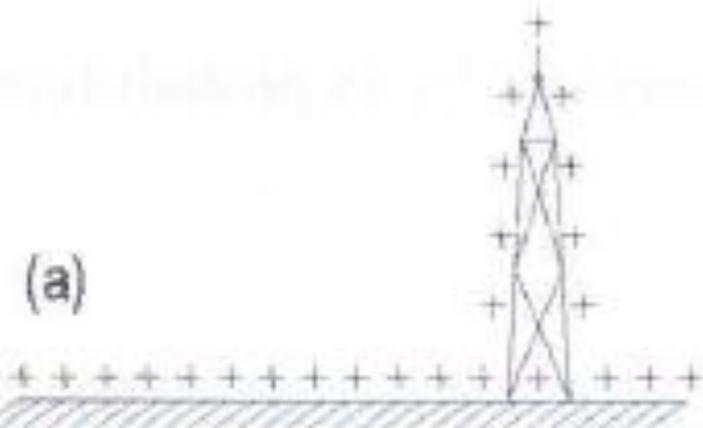
- Es importante conocer el origen y formación de una descarga atmosférica para comprender la protección por los distintos elementos de apantallamiento en la subestación.

- ⦿ En presencia de cargas eléctricas en movimiento el aire se ioniza, produciendo una descarga llamada **“Guía escalonada”** de rayo (trayectoria) originada por una nube cargada que baja a $1/6$ de la velocidad de la luz, aproximadamente recorre unos 50m, se detiene 50 μs y sigue progresando en forma escalonada de pasos discretos de longitud variable.

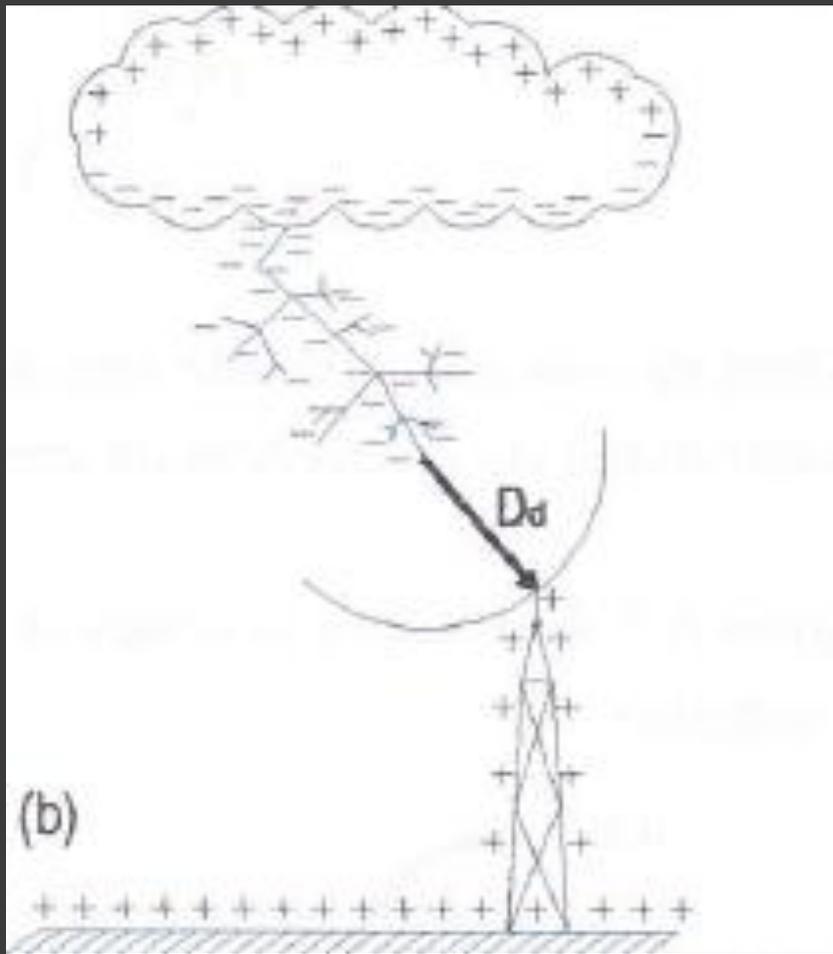


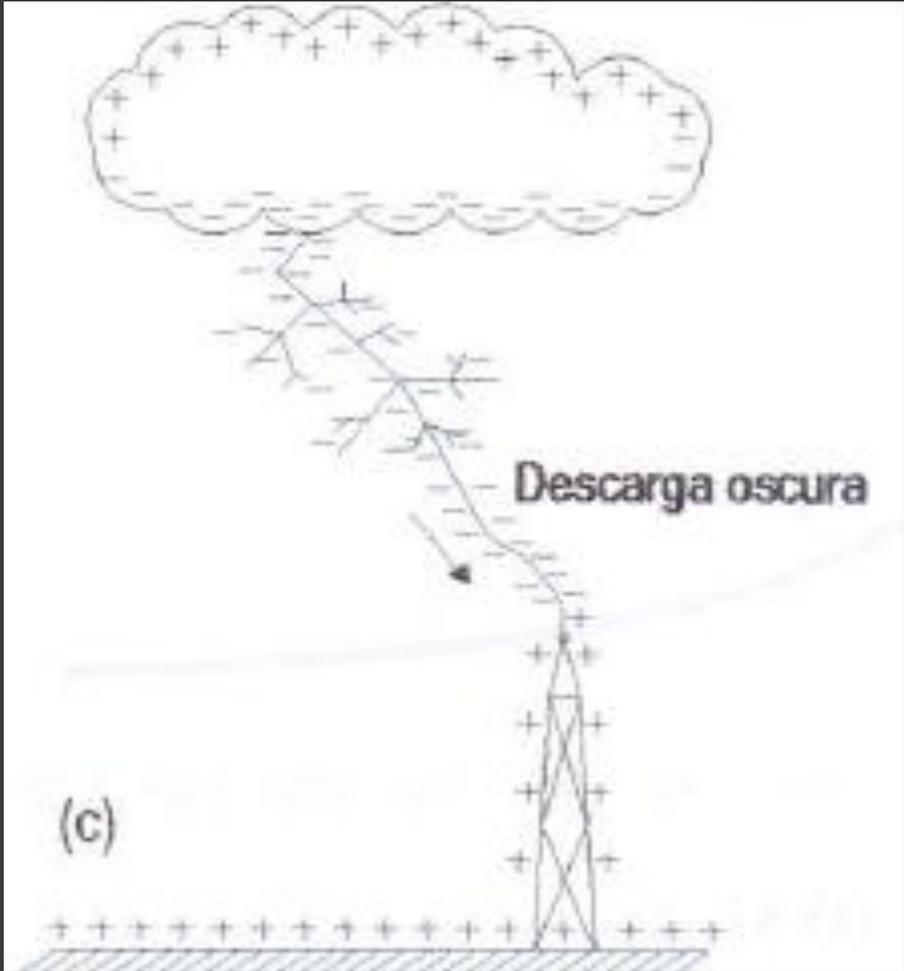
Guía escalonada

(a)

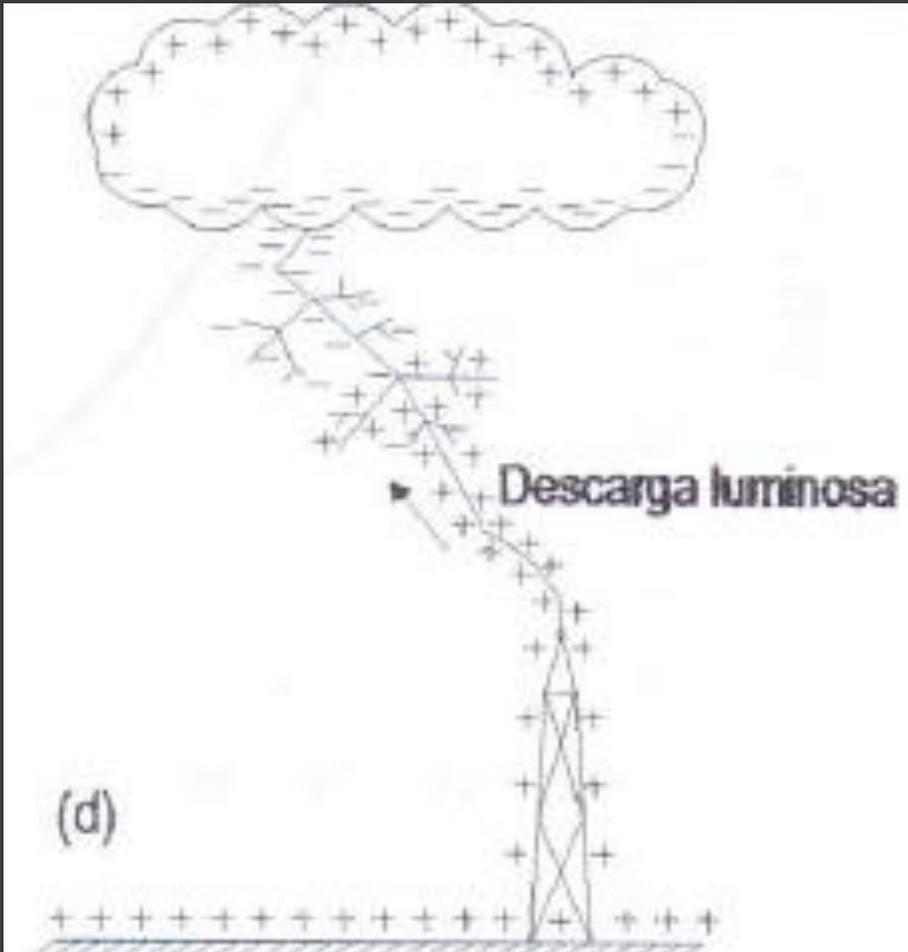


- ⦿ Cuando la guía escalonada llega a una cierta distancia igual a la llamada "**distancia de descarga (Dd)**" de un objeto de polaridad contraria, empieza a progresar en esa dirección conocida como descarga oscura.

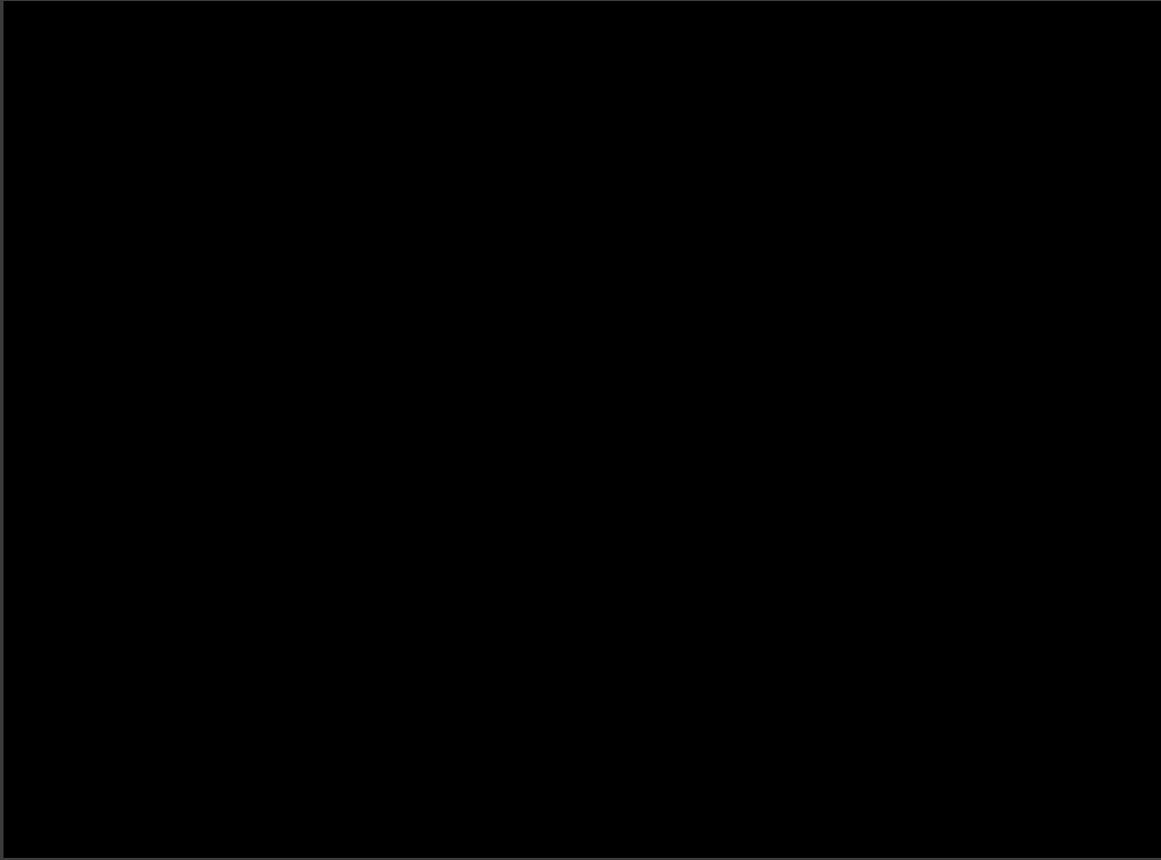




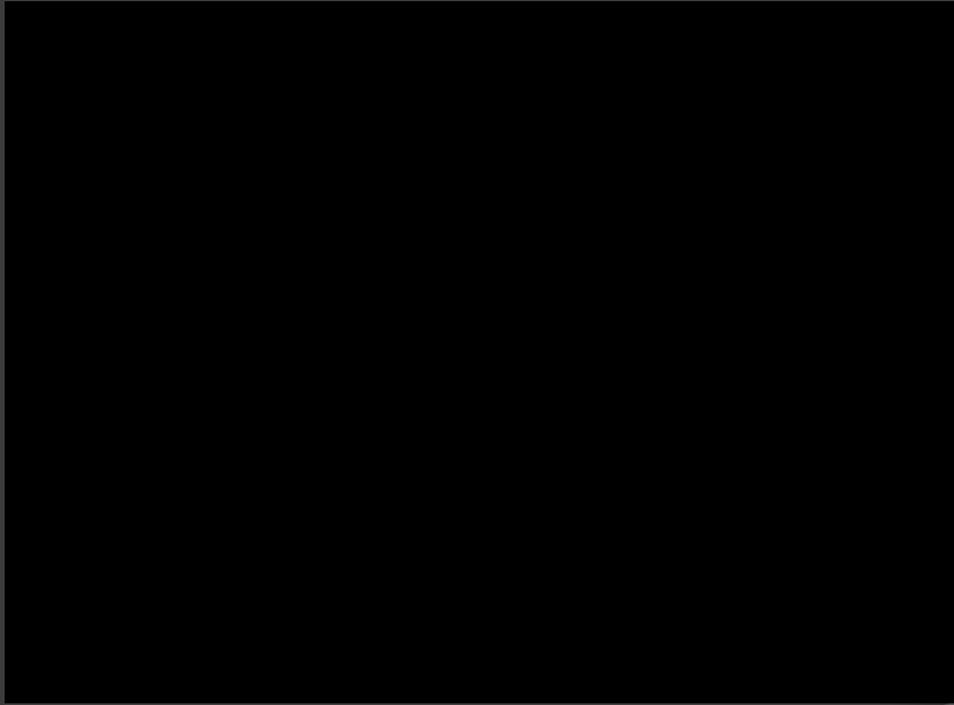
- ⦿ Una vez que la guía escalonada de rayo ha tocado el objeto se establece una ruta ionizada entre nube y objeto, por lo que circula una corriente de retomo hacia la nube conocida como descarga luminosa, que intenta neutralizar la carga de la misma.



- ⦿ Descargas atmosféricas nube-tierra, son mas frecuentes
- ⦿ Descargas atmosféricas tierra-nube, son poco comunes y se genera al cargarse negativamente partes metálicas muy elevadas sobre la tierra.







- ⦿ El fenómeno de la descarga atmosférica al ser de naturaleza aleatoria, sus características se expresan en términos probabilísticos.
- ⦿ Magnitud de corriente pico de una descarga atmosférica, la IEEE recomienda aplicar la siguiente expresión:

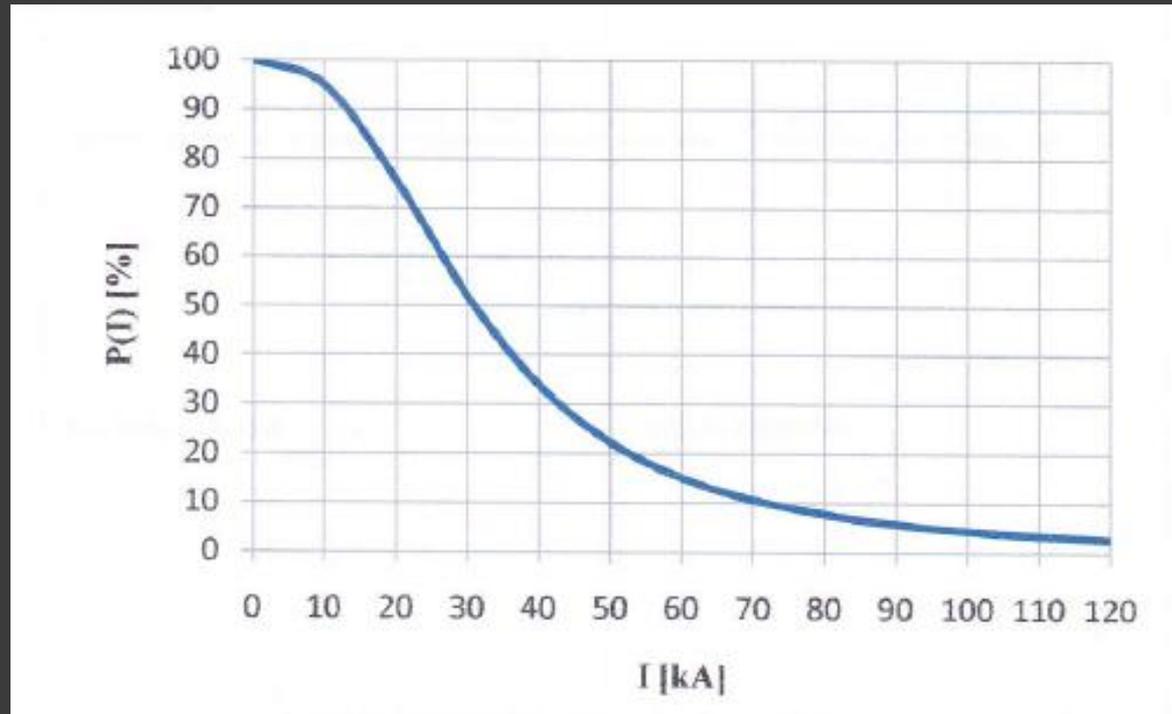
$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} [\%]$$

Donde:

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

P(I): Probabilidad de ocurrencia de una descarga atmosférica a una corriente (I), [%].

Relación entre I y $P(I)$



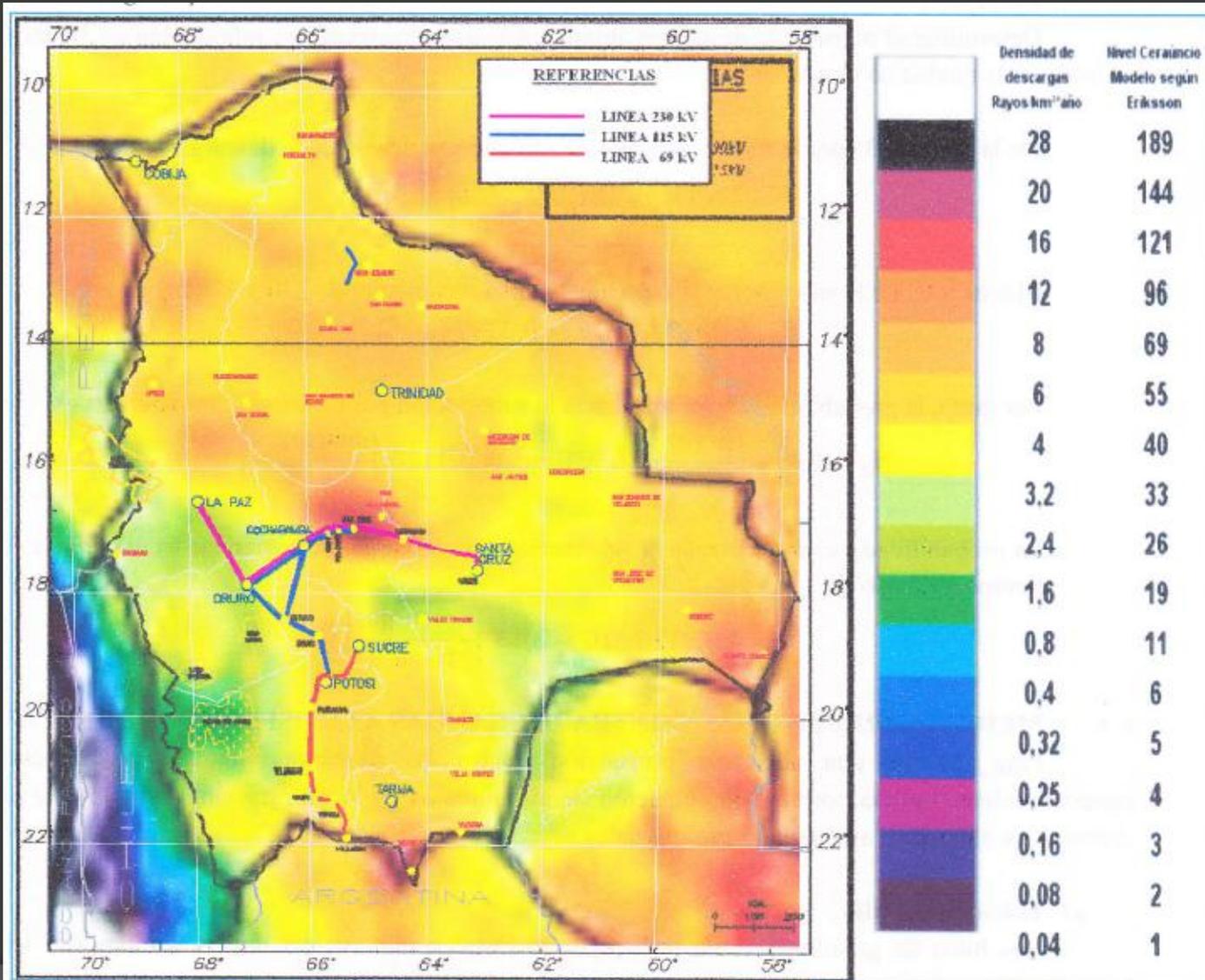
Un 50% de las descargas atmosféricas, estadísticamente se sabe que alcanzan una intensidad de 30 kA.

- ⦿ Las subestaciones eléctricas ocupan superficies relativamente pequeñas en relación a las líneas de transmisión, y en consecuencia el riesgo de que sean alcanzados por las descargas atmosféricas también es pequeño.

NIVEL CERAUNICO

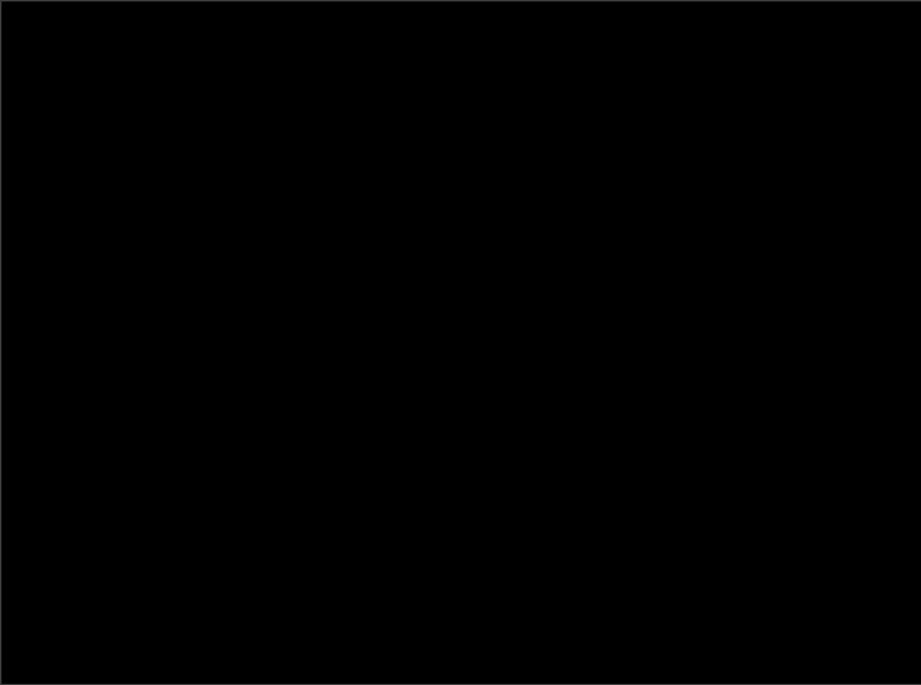
- Número promedio de días al año en los que se presentan tormentas eléctricas en una región.
- Número de días al año en los que se escuchan descargas atmosféricas.

Mapa de niveles Isoceráunicos



Determinados en las estaciones meteorológicas por medio de observaciones.

- ⦿ Registros imprecisos (registro de tormentas observados) la densidad de descargas a tierra (registradores electrónicos-contadores de rayos).
- ⦿ Densidad de descargas a tierra es mas representativo.
 - Se define como: el número de descargas atmosféricas que caen en un área de un kilometro cuadrado (km²) durante un año, mide la probabilidad que tiene una zona determinada de ser alcanzado por una descarga.



Fórmula de Eriksson

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25}$$

Donde:

N_g : Densidad de descargas a tierra, [descargas/km²·año].

T_d : Numero de días con tormentas al año (nivel ceráunico), [días tormentas/año].

Ejemplo

- Número de descargas atmosféricas que alcanzará una subestación en 10 años, ubicada en la ciudad de Cochabamba. La subestación tiene un área rectangular de 230 x 170 m

MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS DIRECTAS

- ⦿ Se utilizan 2 métodos para el cálculo del apantallamiento:
 - Modelo Electrogeométrico
 - Método Gráfico.
- ⦿ Normalmente se utilizan 3 elementos apantalladores:
 - Hilos de guardia
 - Bayonetas
 - Mastiles

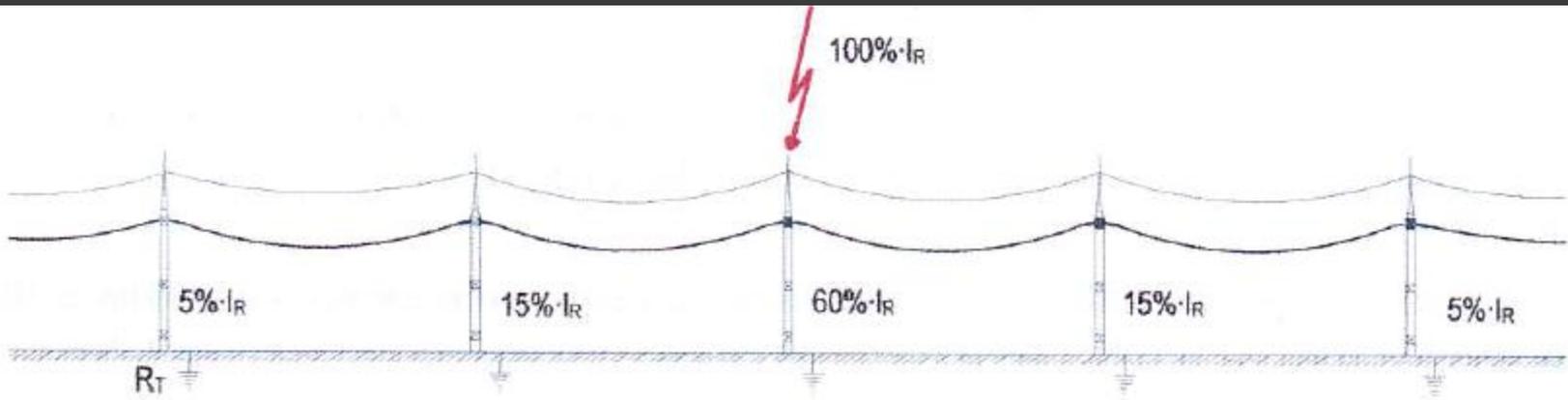
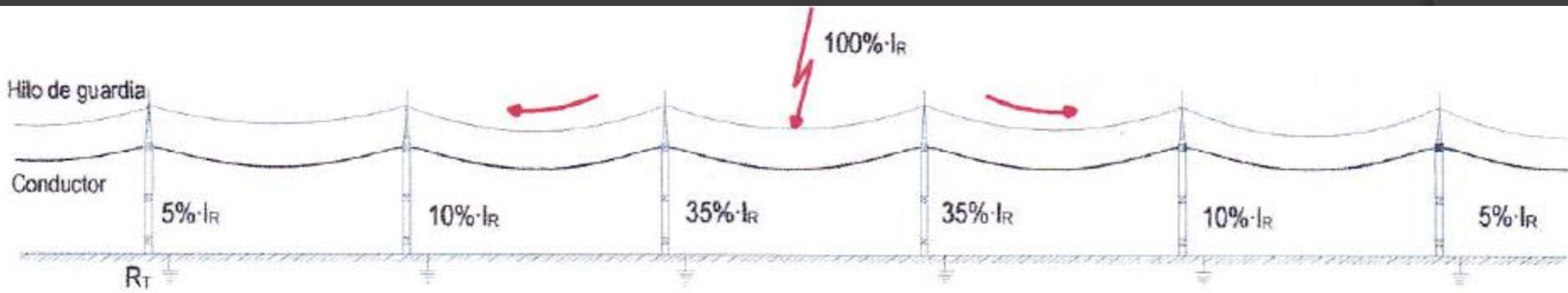
Hilos de Guardia



- Cable pararrayo
- Se instalan por encima de los equipos (pórtico).
- Se conectan a tierra a través de estructuras si estas son metálicas.
- Acero Galvanizado tipo EHS 5/16”
 - Bajo costo
 - Alta resistencia mecánica y térmica
 - Galvanizado.- es la mejor protección anticorrosiva

- La zona de protección en todo el hilo de guardia.
- Son económicas.
- La baja impedancia característica reduce el riesgo de flameo inverso en los aisladores.
- Parecida a las usadas en las líneas de transmisión, que no contrastan estéticamente con la subestación.
- Mejora las condiciones de disipación de la malla a tierra al transportar parte de la corriente de secuencia cero en casos de cortocircuitos a tierra.





- El nivel de aislamiento de la línea de transmisión debe ser mayor o igual a la elevación de tensión de la estructura (tensión de tierra más autoinducción de la torre). para la correcta utilización del hilo de guardia (evitar flameo inverso).

$$N.A. \geq U_{\text{estruc}} \cong R_T \cdot I_R + L \frac{di}{dt} \text{ [kV]}$$

Donde:

R_T : Resistencia de tierra, [Ω].

I_R : Corriente de rayo máximo, [kA].

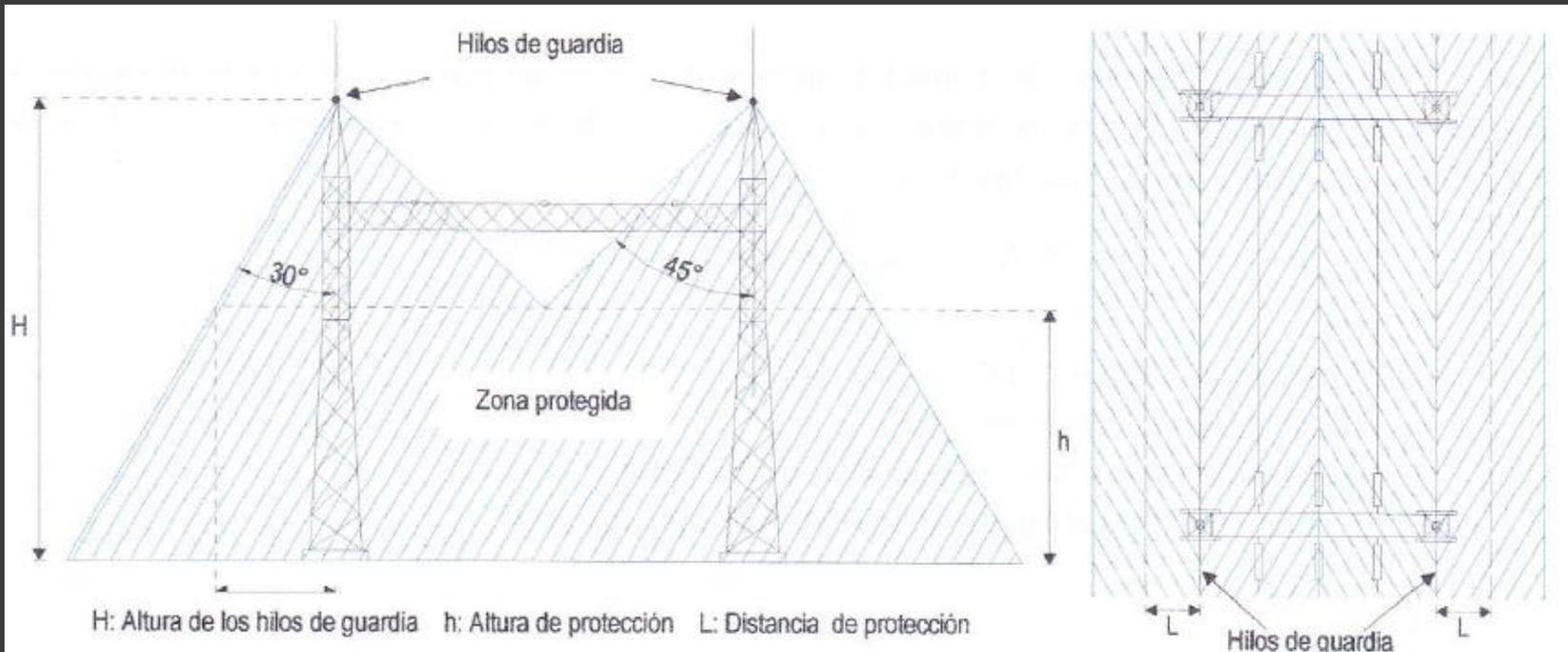
L : Inductancia entre el hilo de guardia y tierra, [μH].

di/dt : Gradiente de corriente que depende del rayo, [kA/ μs].

Ejemplo

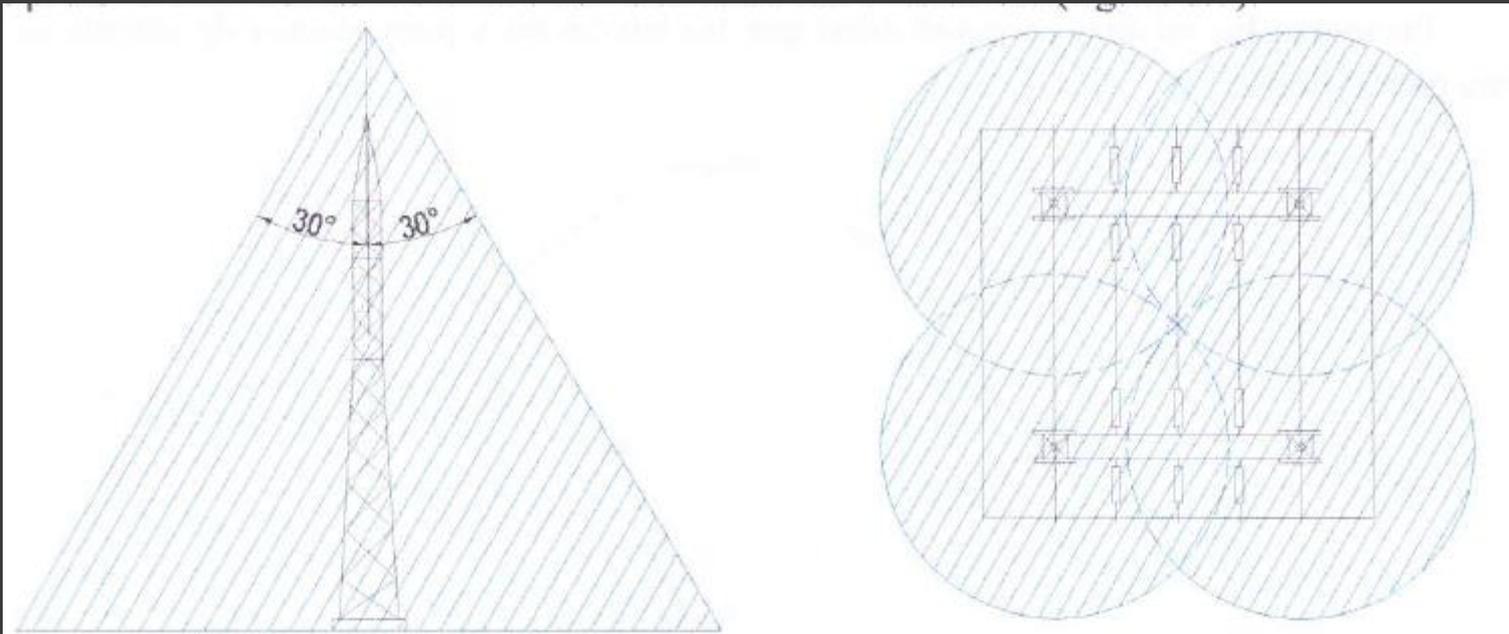
- Línea de transmisión de 230 kV, resistencia a tierra $R_t=20$ ohms, corriente de rayo máximo $I_r=80$ kA. La estructura tiene una elevación de 18m sobre la superficie del suelo, para la inductancia por unidad de longitud se asume 0.56 μ H/m. Gradiente dependiente del rayo 4 (kA/ μ s). Condición crítica (60% I_r).
- El aislamiento de la línea de transmisión debe ser mayor a 1000 kV, en este nivel se utilizan normalmente entre 13 a 14 aisladores de tipo platillo de 10"x5 3/4"

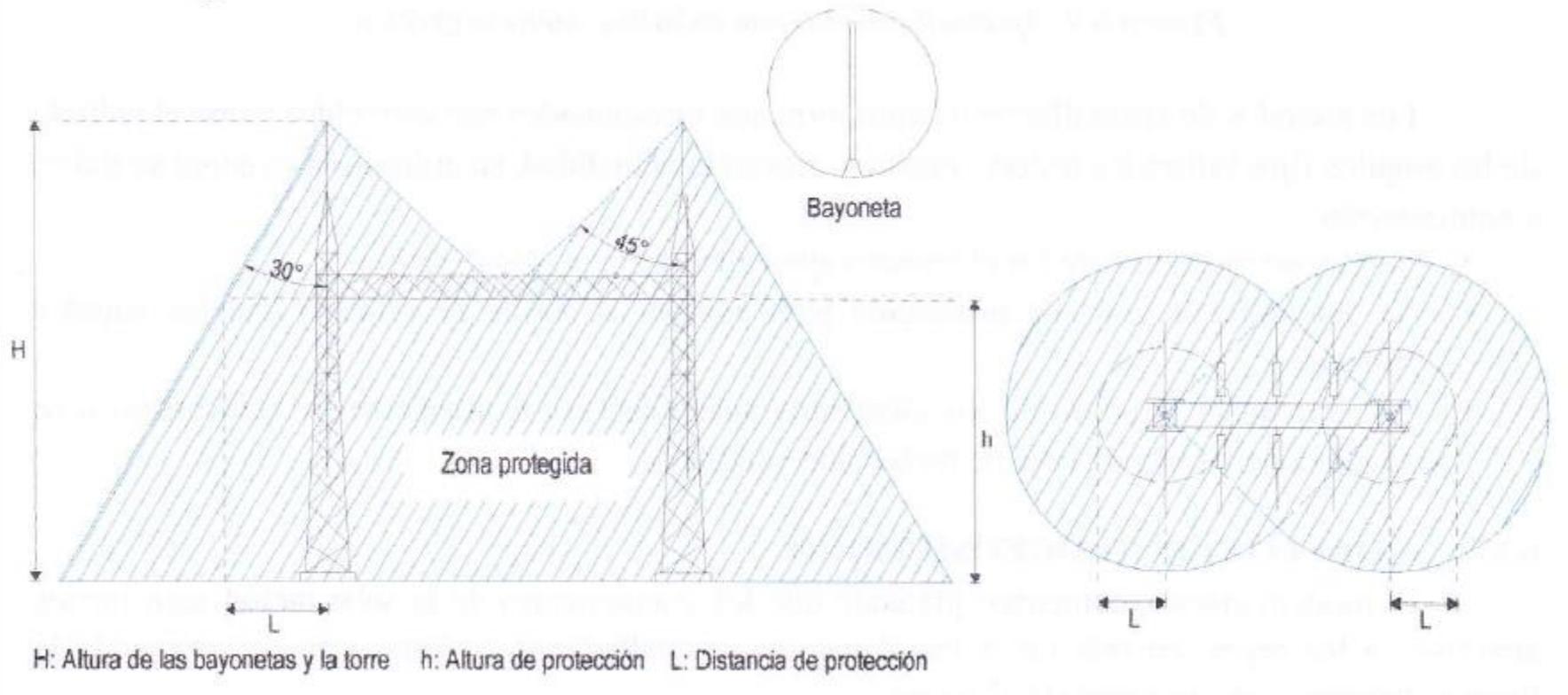
- El ángulo de apantallamiento en subestaciones en estructuras menores o iguales a 30 m para la protección con hilos de guardia es de 30° , y un Angulo máximo de 45° para dos hilos de guardia paralelos; dichos ángulos disminuyen con la elevación de las estructuras



Bayonetas

- Son piezas de tubo de hierro galvanizado de longitud y diámetro variable (depende a la zona a proteger), se instalan en la parte más alta de las estructuras, sobre pórticos, y requieren de un castillete para su instalación.
- Para lograr una protección efectiva la subestación debe tener un área preferentemente cuadrada de distancias relativamente cortas.

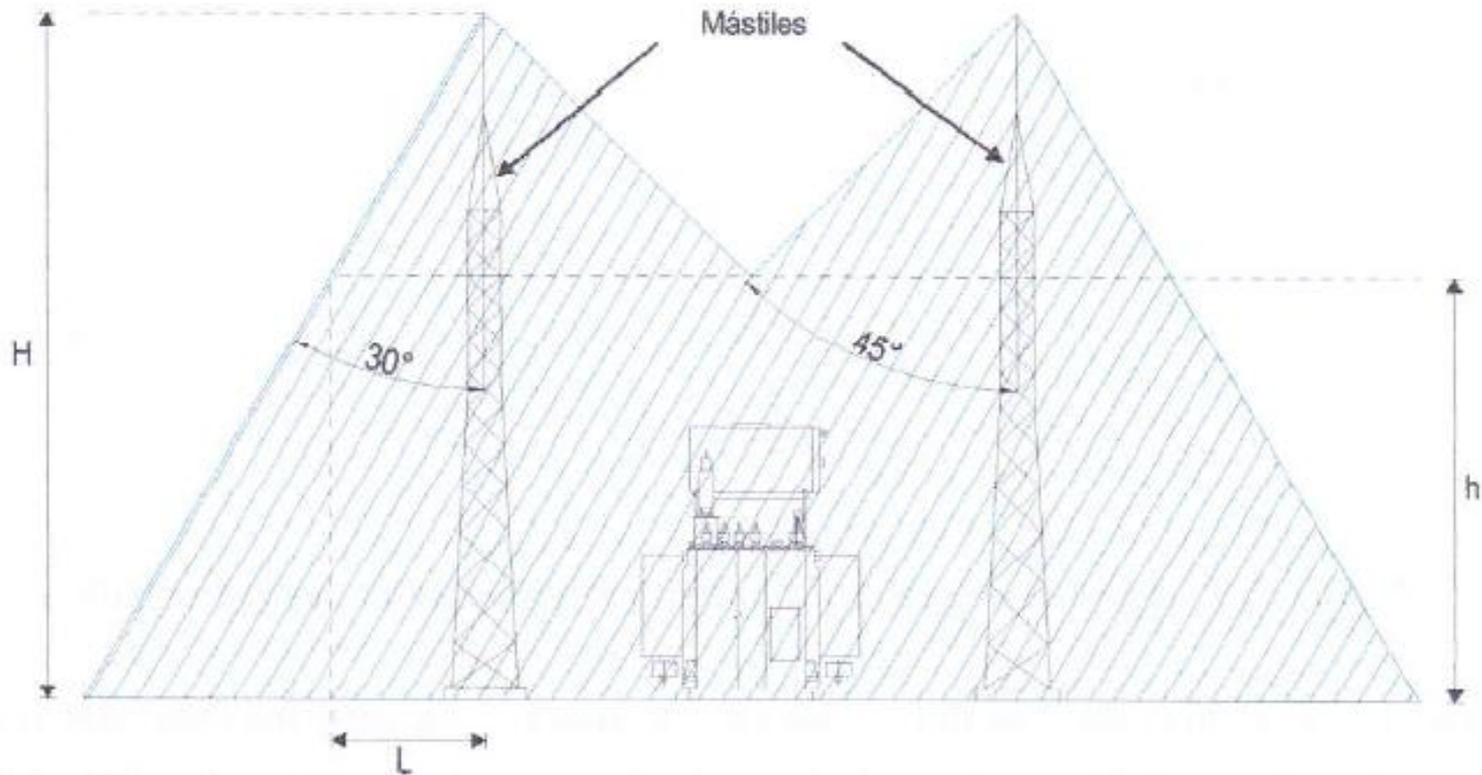




- ⦿ Menores problemas en su mantenimiento e instalación.
- ⦿ Tiene características eléctricas inferiores a los hilos de guardia como:
 - Tendencia a aumentar las corrientes de retorno, con lo cual se hacen atractivas a los rayos pero a la vez presentan mayores problemas para la disipación de esta corriente.
 - A medida que el área la subestación aumenta, el apantallamiento con bayonetas se hace más costosa en comparación con los hilos de guardia.

Mástiles

- Adecuadas para la protección de áreas pequeñas y aisladas de la subestación, pero resultan costosas porque requieren de estructuras propias.
- Utilizadas cuando no se disponen de pórticos aledaños.
- Permiten la instalación de los hilos de guardia, bayonetas.

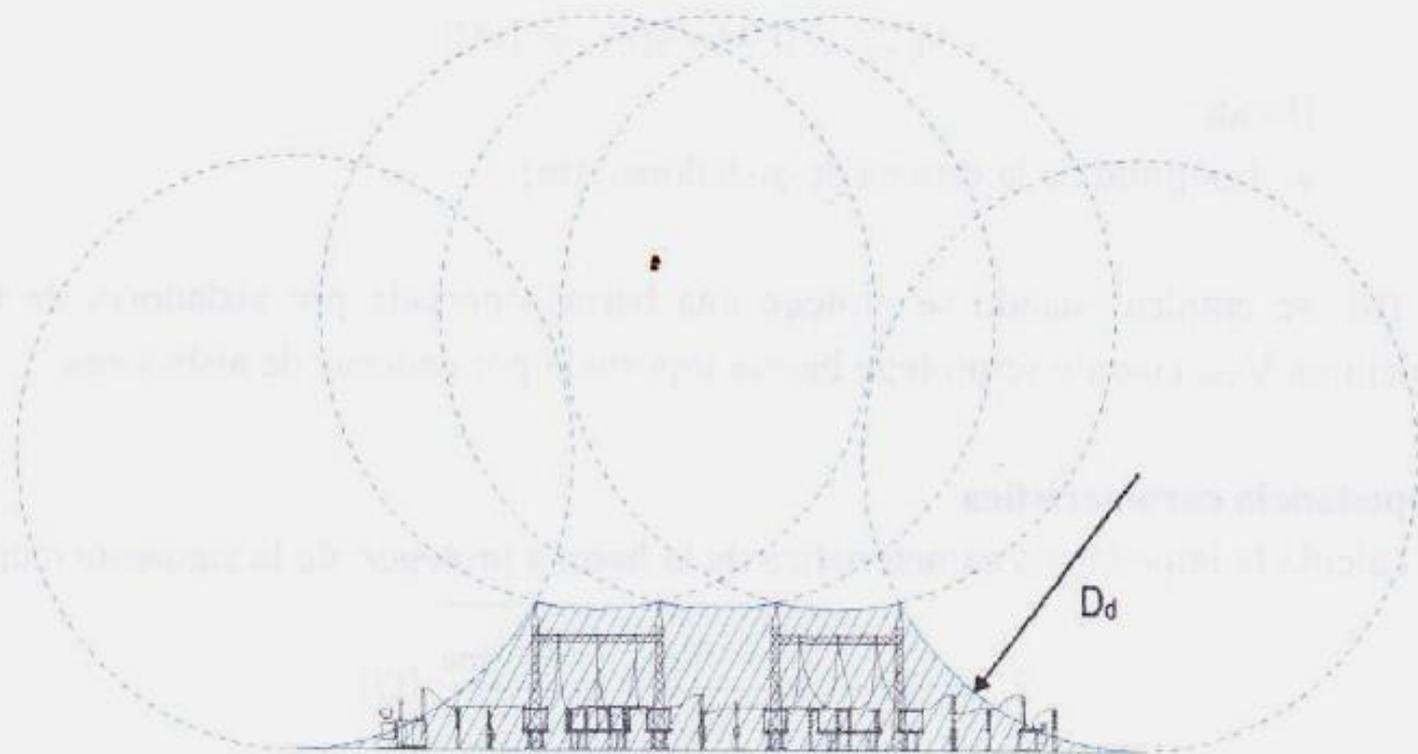


H: Altura de los mástiles h: Altura de protección L: Distancia de protección

- ⦿ Los métodos de apantallamiento (ángulos fijos) utilizados históricamente y aun en la actualidad tiene la siguiente aplicabilidad:
 - Altura y localización de los elementos apantalladores. (Se estima)
 - Se determina la zona de protección para equipos o barras de acuerdo con los ángulos supuestos.
 - Se incrementa la altura de los elementos apantalladores o ubicación, se relocalizan o se adiciona para obtener zona de protección completa.

MODELO ELECTROGEOMETRICO

- ⦿ Es un modelo que pretende que los componentes de la subestación sean menos atractivos a los rayos, en relación a los elementos de apantalladores, se logra esto determinando la llamada “Distancia de Descarga (D_d)” de rayo.
- ⦿ Determinación grafica de la H_{min} de los elementos de protección:
 - Se trazan arcos de circunferencia con un radio igual a la D_d a los equipos protegidos de tal forma que los arcos sean tangentes a tierra y a los elementos de protección, o tangentes entre ellos.



Determinación de la distancia de descarga crítica

- Determinar la distancia de descarga para una corriente Crítica dada por:
 - Corriente crítica de flameo
 - Impedancia Característica
 - Altura promedio
 - Radio Corona

Distancia de descarga Critica

$$D_d = 8 \cdot k \cdot I_c^{0,65} [\text{m}]$$

Donde:

I_c : Corriente crítica de flameo, [kA].

k : Coeficiente que toma en cuenta las diferentes distancias de descarga.

- ✓ 1,0 para hilos de guardia
- ✓ 1,2 para bayonetas y mástiles.

Corriente Critica de Flameo

Es aquella que ocasiona una sobretensión peligrosa para el aislamiento, es dada por:

$$I_c = \frac{2,2 \cdot \text{BIL}}{Z_0} = \frac{2,068 \cdot V_{50\%}}{Z_0} \text{ [kA]}$$

Donde:

BIL: Nivel básico de aislamiento del equipo, [kV].

Z_0 : Impedancia característica de la barra a proteger, [Ω].

$V_{50\%}$: Tensión crítica de flameo de los aisladores, [kV]. Se puede estimar por la fórmula de Anderson:

$$V_{50\%} = 0,94 \cdot 585 \cdot w \text{ [kV]}$$

Donde:

w: Longitud de la cadena de aisladores, [m].

El BIL se emplea cuando se protege una barra soportada por aisladores de tipo poste o equipos, mientras $V_{50\%}$ cuando se protege barras soportada por cadenas de aisladores.

Impedancia Característica

Se calcula la impedancia característica de la barra a proteger, de la siguiente manera:

$$Z_0 = 60 \cdot \sqrt{\ln \frac{2 \cdot h_{pc}}{R_c} \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{pc}}{r}} \quad [\Omega]$$

Donde:

h_{pc} : Altura promedio del conductor, [m].

R_c : Radio corona, [m].

r : Radio del conductor, [m].

Altura promedio

La altura promedio del conductor se calcula mediante:

$$h_{pc} = \frac{1}{2} \cdot h_{max} + \frac{2}{3} \cdot h_{min} \text{ [m]}$$

Donde:

h_{max} : Altura de conexión de los conductores de fase, [m].

h_{min} : Atura en la mitad del vano, [m]. Si no se conoce se emplea la siguiente expresión:

$$h_{min} = h_{max} - \omega \cdot L \text{ [m]}$$

L: Longitud del vano, [m].

ω : Constante que relaciona la flecha máxima con longitud del vano, ($0,02 \leq \omega \leq 0,06$).

Radio Corona

Para el caso de un solo conductor de fase tomando en cuenta el efecto corona, el radio corona se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$R_c = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot V_c \text{ [m]}$$

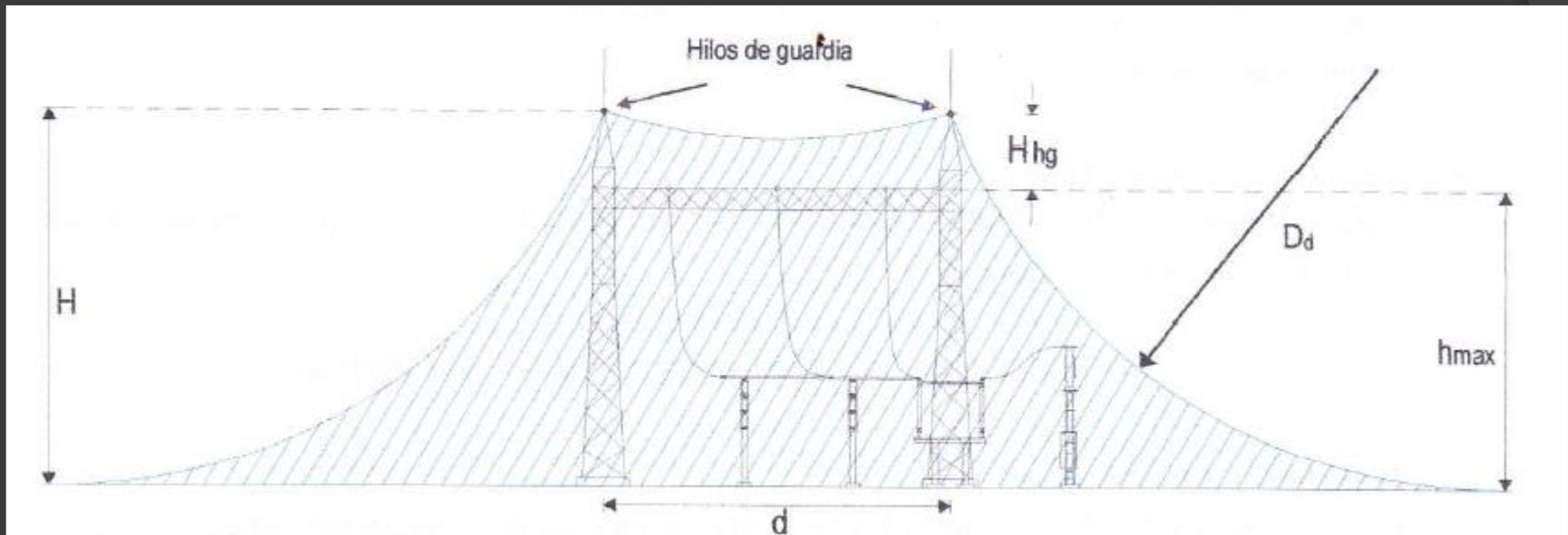
Donde:

V_c : Máxima tensión soportada por el aislamiento de los aisladores para un onda de impulso con polaridad negativa con un frente de onda de 6 μs , [kV]. Según norma IEEE Std. 998 puede sustituirse por el BIL.

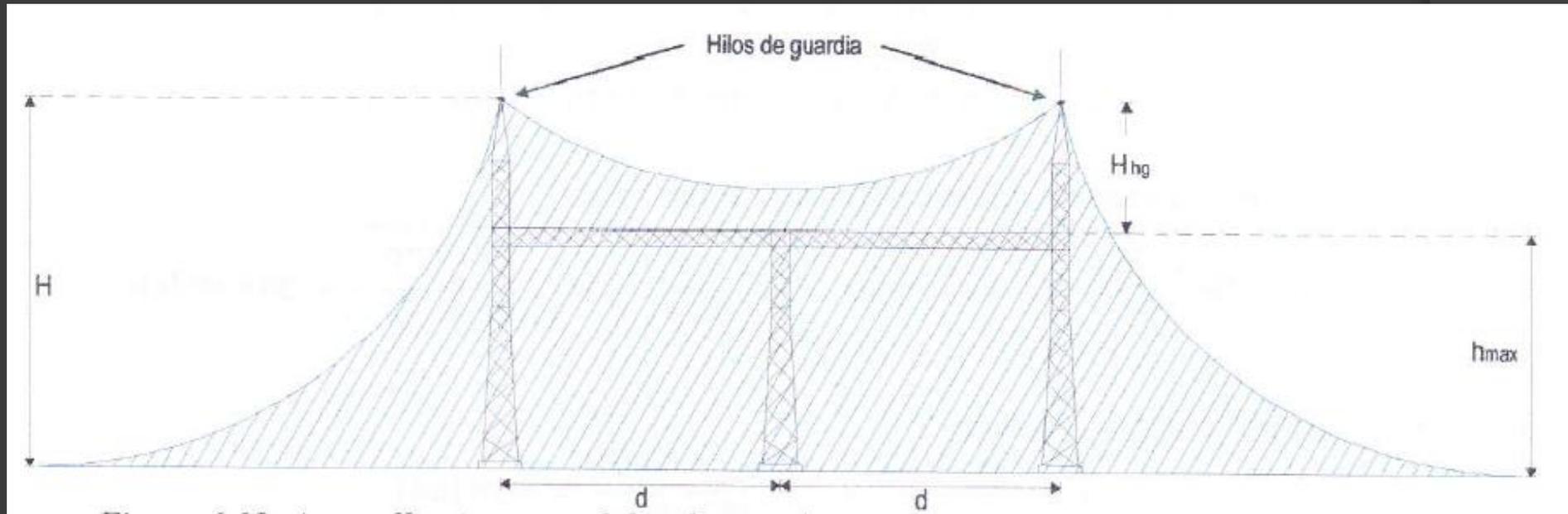
◎ HILO DE GUARDIA

- Se requiere apantallar una subestación de 230 kV con hilos de guardia tipo EHS de 5/16", la barra superior esta conformada por cables ACSR tipo IBIS soportados por cadenas de aisladores tipo platillo de 10"x5 3/4" en pórticos y además se tiene los siguientes datos:
 - Ancho de campo $d= 16$ m
 - Longitud del vano $L=36$ m
 - Altura de los conductores de fase $H_{max}= 13.5$ m
 - Diametro del conductor de fase $D= 19.888$ mm
 - Numero de aisladores $n= 15$

Hilos de guardia para un solo campo



Hilos de guardia para dos campos



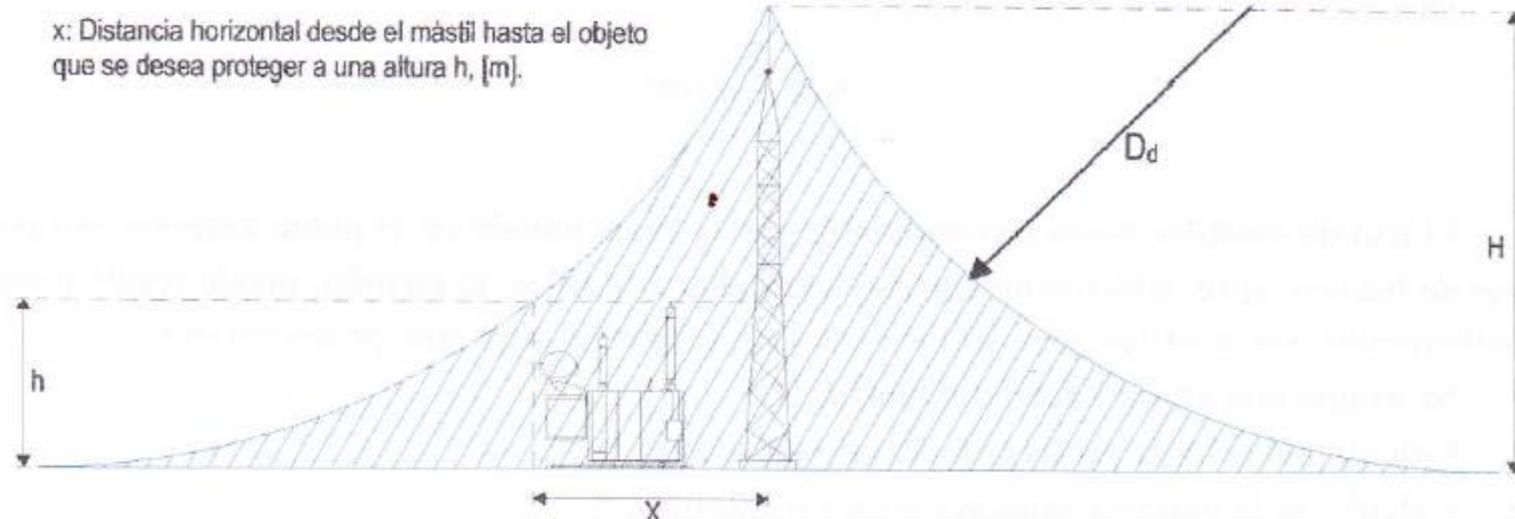
⦿ Mastil

- La altura del mástil es menor que la distancia de descarga ($H < D_6$), entonces se tiene para la protección con un solo mástil es:

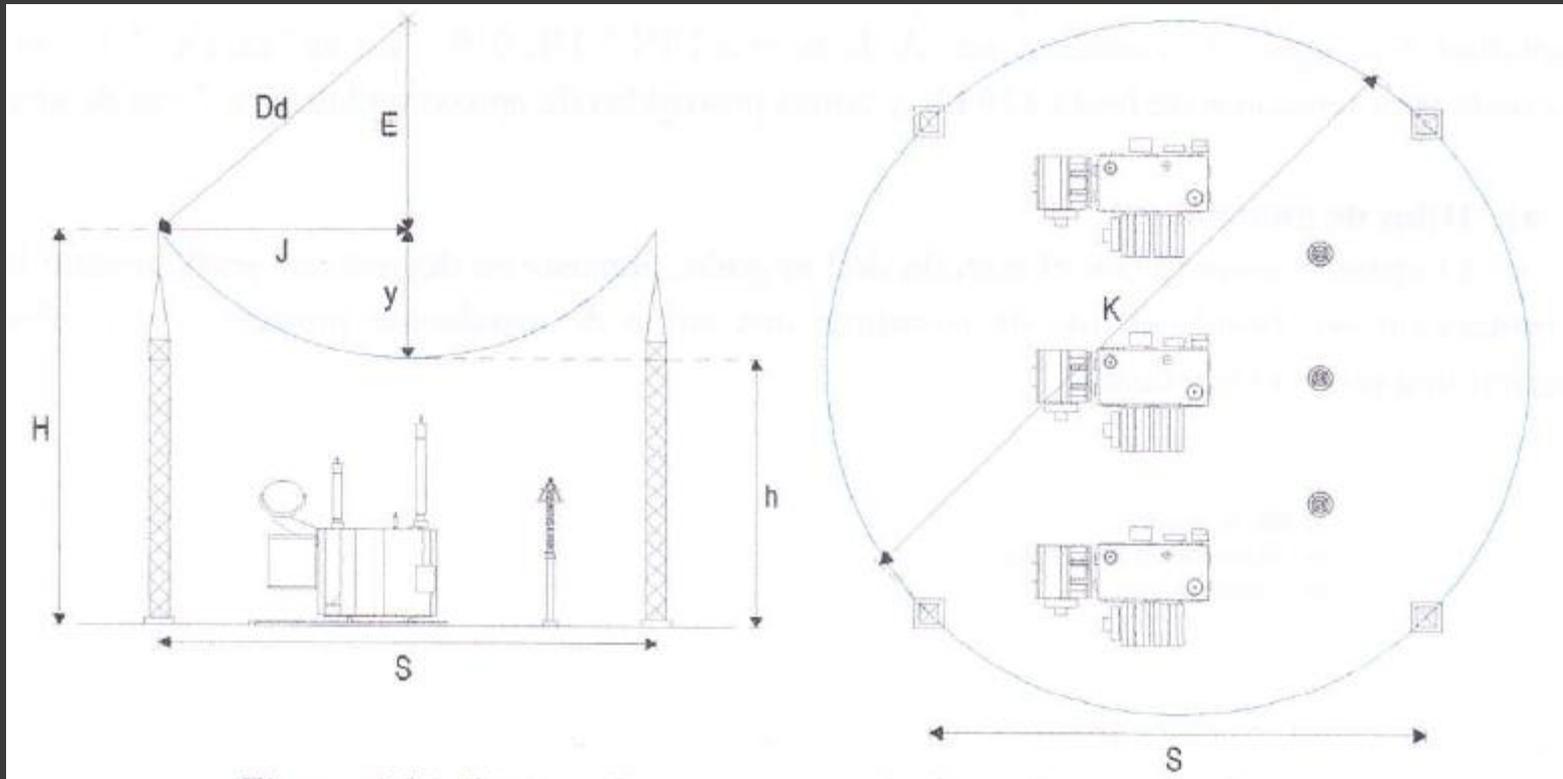
$$x = \sqrt{D_d^2 - (D_d - H)^2} - \sqrt{D_d^2 - (D_d - h)^2} \text{ [m]}$$

Un solo Mastil

x : Distancia horizontal desde el mástil hasta el objeto que se desea proteger a una altura h , [m].



Cuatro Mastiles



Distancia entre mástiles

Diferencia de elevación entre la altura del mástil y la altura de protección del equipo.

$$y = H - h \text{ [m]}$$

Diferencia de elevación entre el mástil y el centro de la esfera.

$$E = D_d - y \text{ [m]}$$

Distancia horizontal entre el mástil y el centro de la esfera.

$$J = \sqrt{D_d^2 - E^2} \text{ [m]}$$

Distancia diagonal entre mástiles.

$$K = 2 \cdot J \text{ [m]}$$

Distancia horizontal entre mástiles.

$$S = \frac{K}{\sqrt{2}} \text{ [m]}$$

- ⦿ El uso de mástiles no es recomendable por lo costoso, y requiere de una estructura propia.
- ⦿ Si bien es costoso apantallar con hilos de guardia, puede hacerse apreciablemente costos, puede resultar seguro el apantallamiento con mástiles.
- ⦿ Se sigue el siguiente procedimiento para su localización:
 - Se asigna una altura inicial del mástil, H .
 - Cálculo del área de protección de un solo mástil, x .
 - Cálculo de la máxima separación de los mástiles, S .
- ⦿ Con esta información los mástiles pueden ser ubicados en la subestación, ajustando su localización hasta obtener el diseño más óptimo.

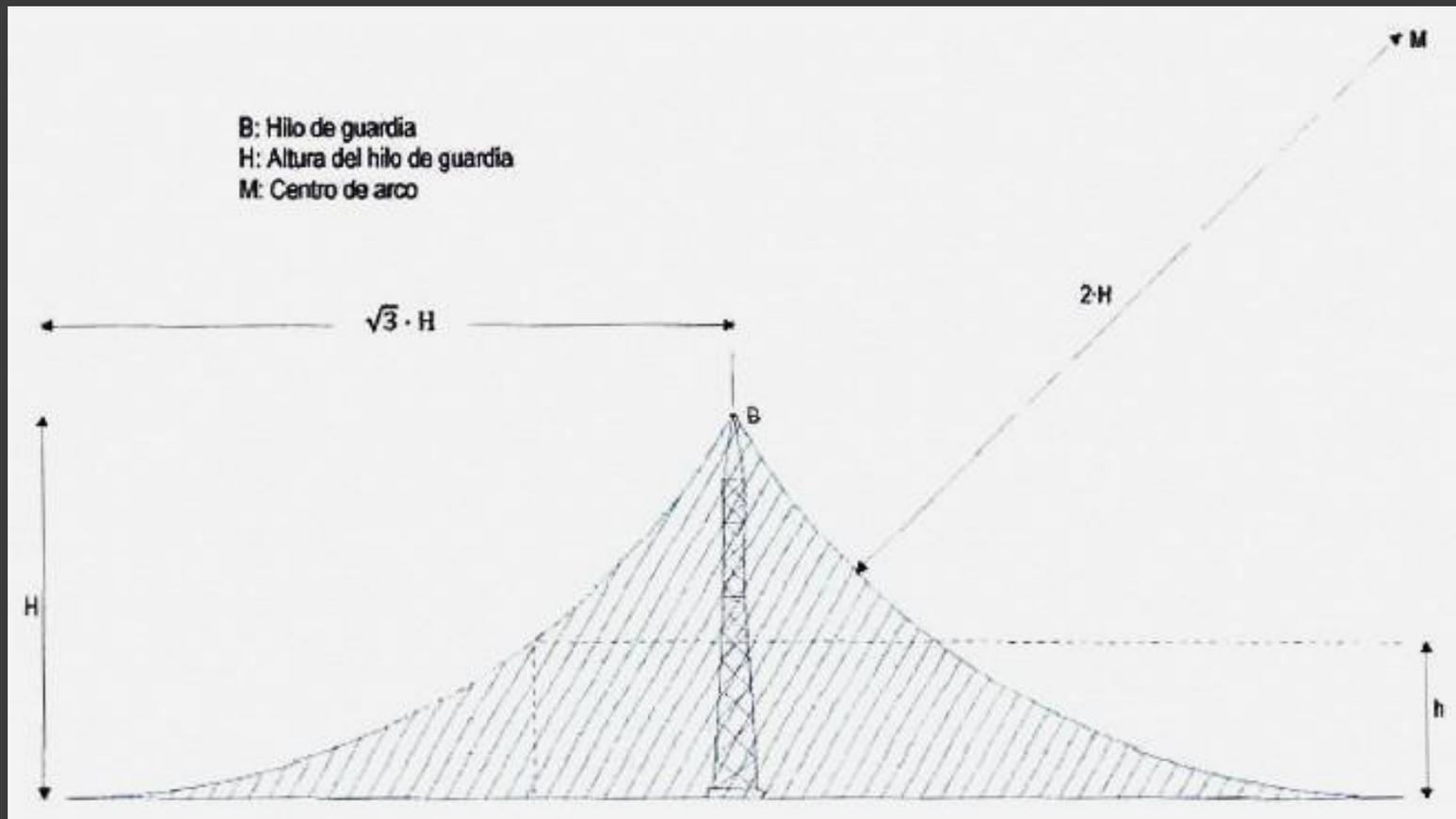
METODO GRAFICO

- El método gráfico de Langrehr permite hallar de manera rápida la altura de los elementos apantalladores, sigue recomendaciones de la norma DIN VDE 0101. La aplicación del método es adecuada para tensiones de hasta 420 kV y zonas protegidas de aproximadamente 25 m de altura.

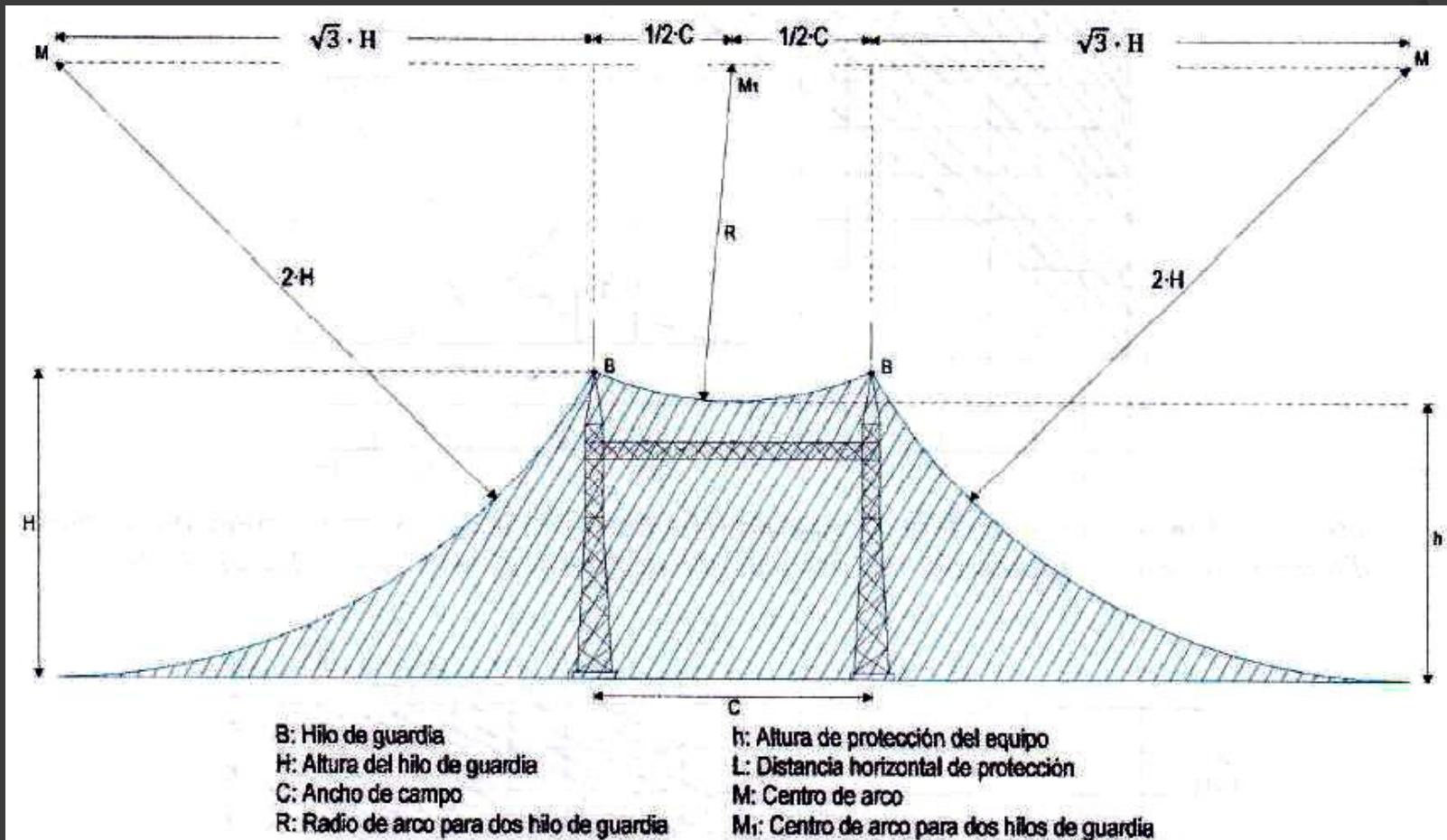
Hilos de guardia

- Consiste en determinar gráficamente la zona de protección que brinda el hilo de guardia a una altura de instalación mínima, con el objeto de asegurar una protección eficaz.

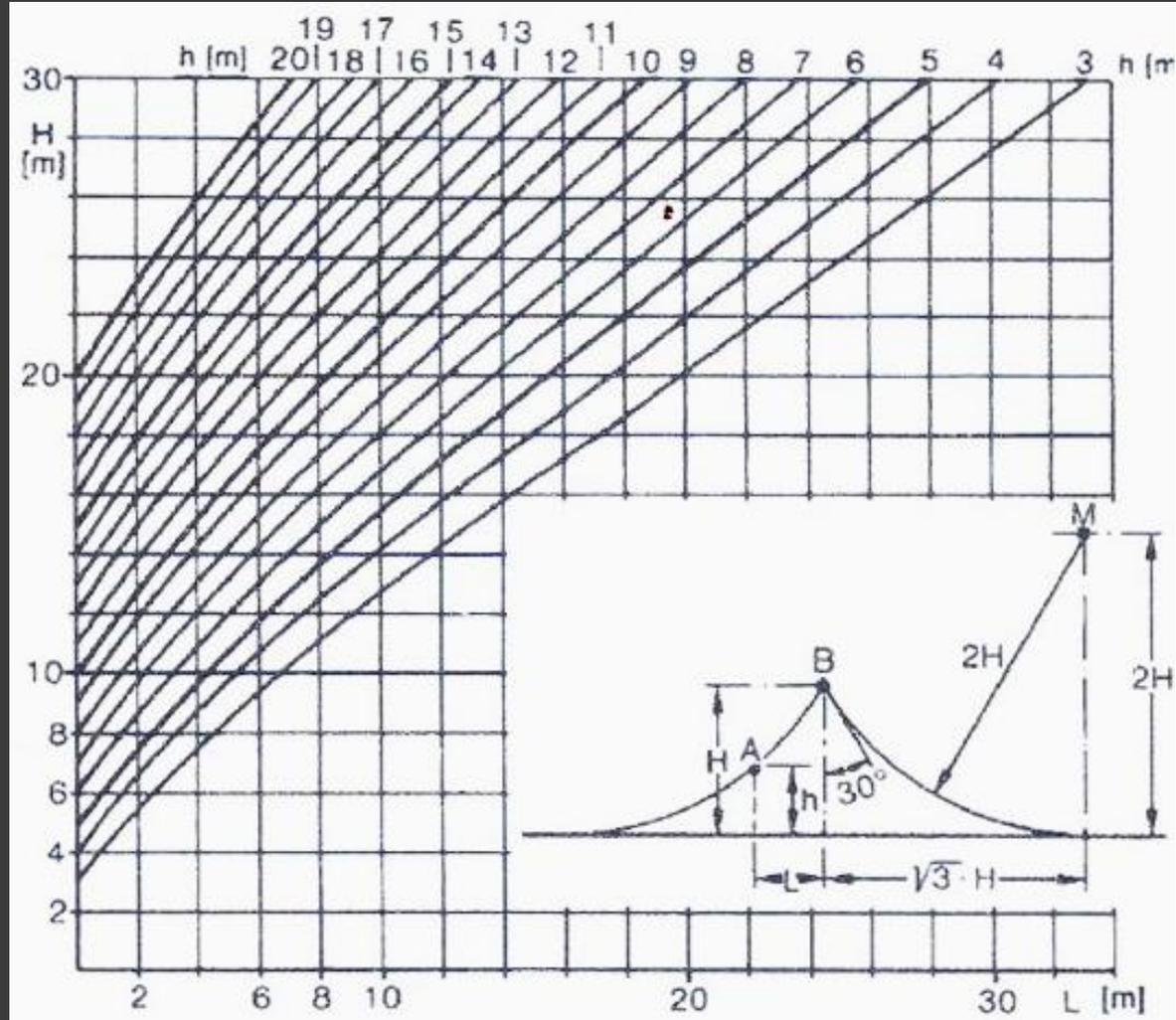
Apantallamiento con un hilo de guardia, método gráfico



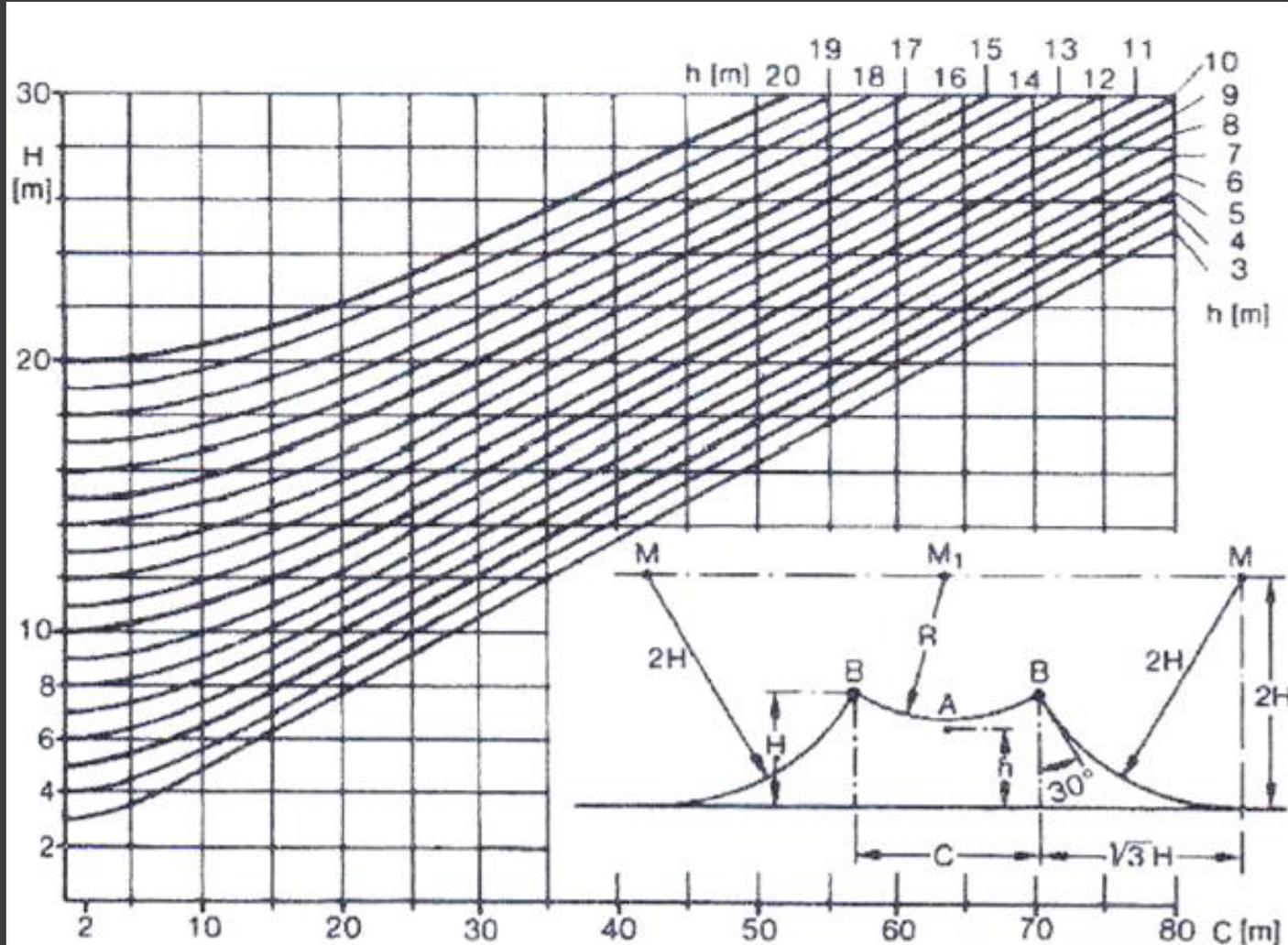
Apantallamiento con dos hilos de guardia, método gráfico



Para un solo hilo de guardia



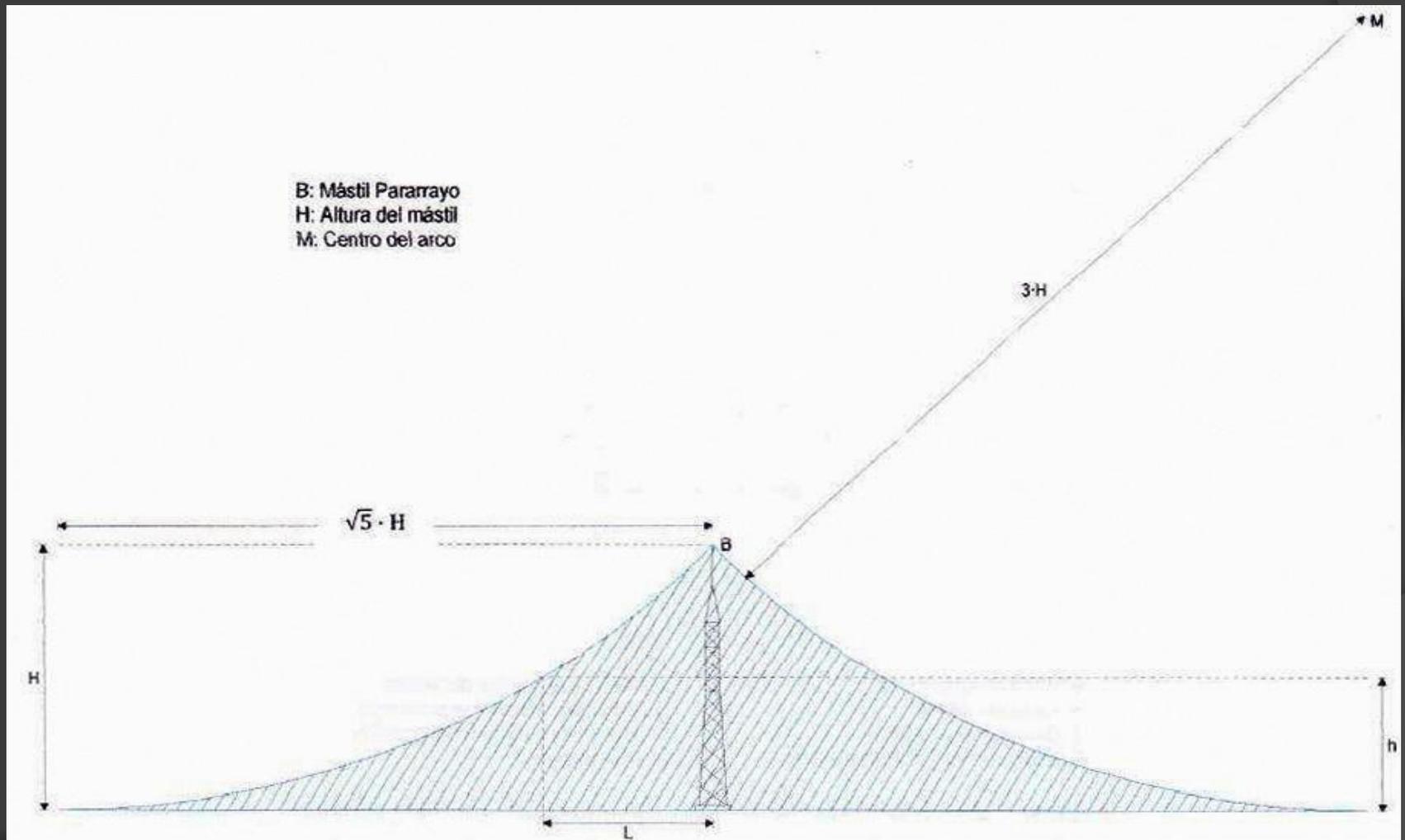
Para dos hilos de guardia



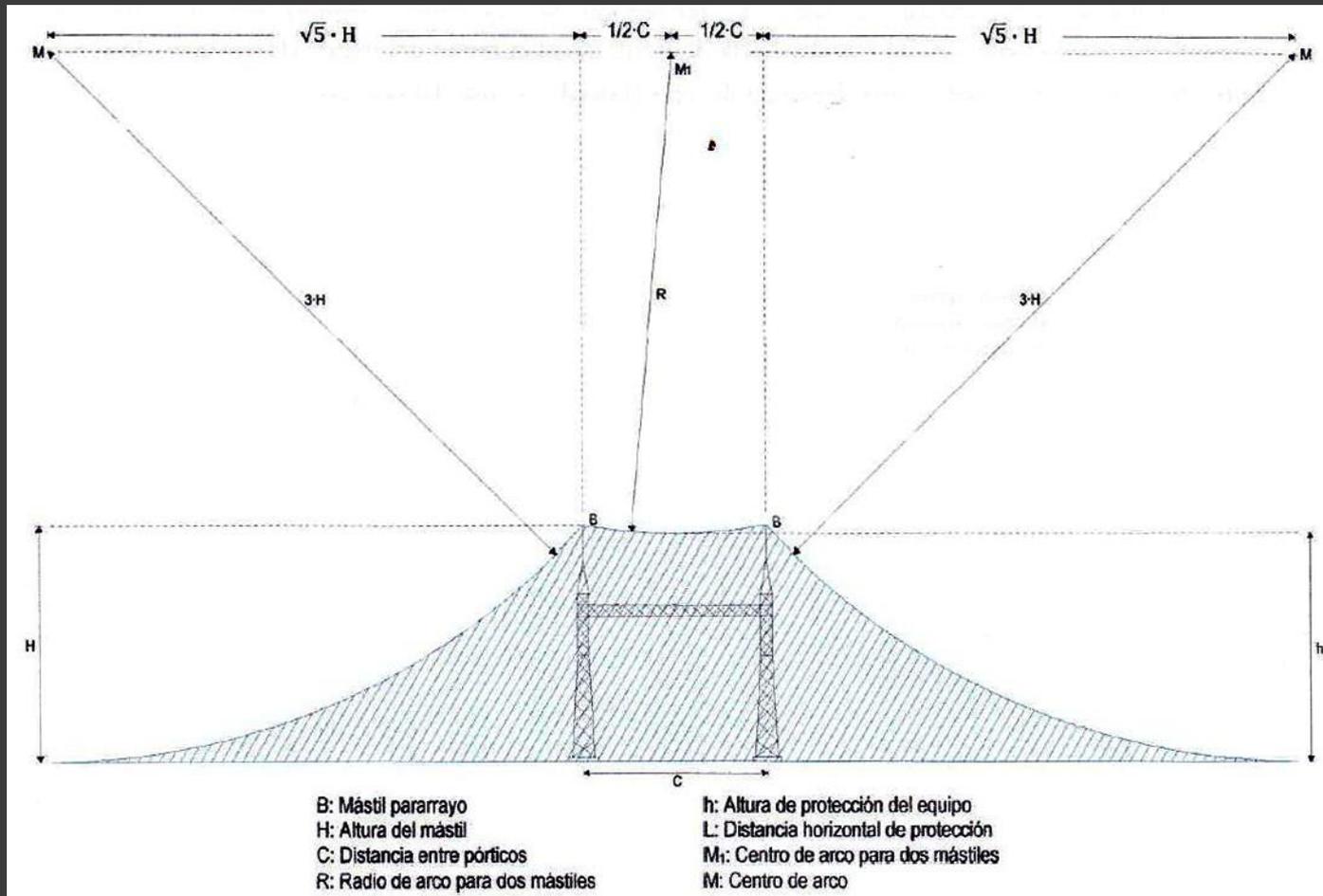
Mástiles

- La zona de protección es de forma cónica, el procedimiento de apantallamiento es similar al apantallamiento con hilos de guardia pero en este caso se considera un arco de circunferencia con un radio $3 \cdot H$, siendo H la altura del mástil.

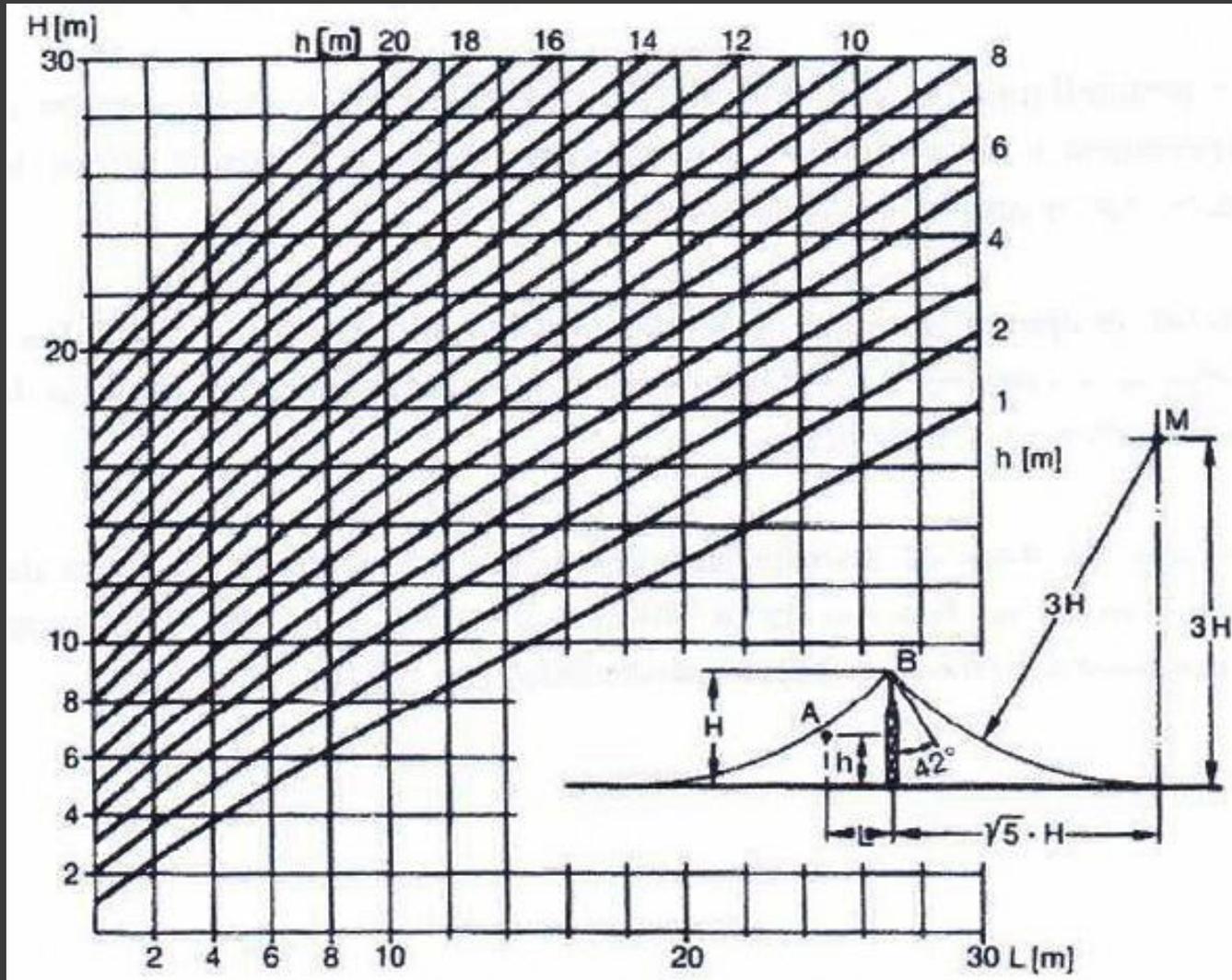
Apantallamiento con un mástil, método gráfico



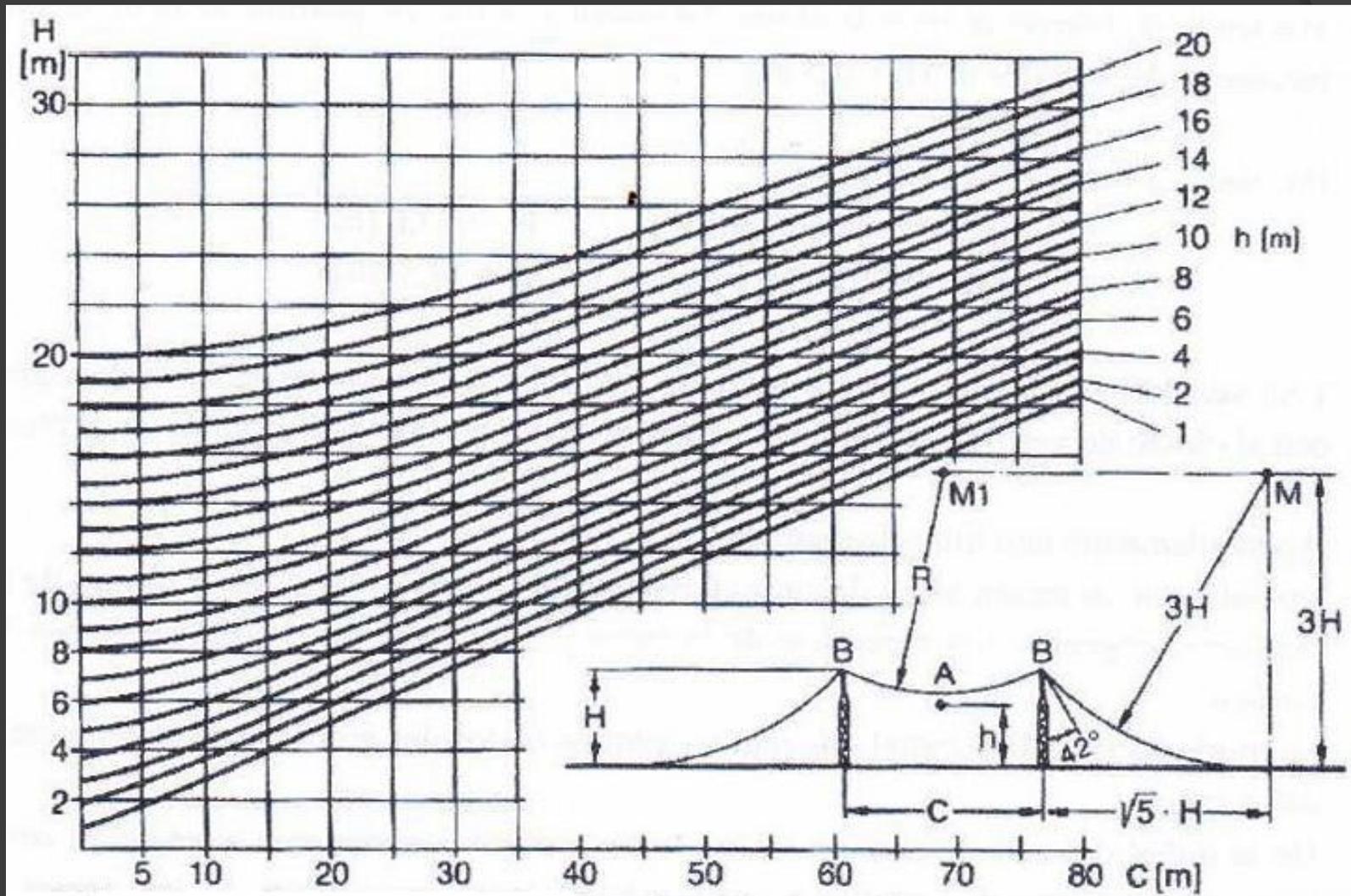
Apantallamiento con dos mástiles, método gráfico



Para un mástil



Para dos mástiles



EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Se requiere apantallar una subestación convencional, de configuración de barra principal con barra de transferencia en 115 kV, utilizando hilos de guardia y bayonetas instaladas en los pórticos de la subestación, aplicando el método gráfico de Langrehr.

De los planos se obtienen los siguientes datos:

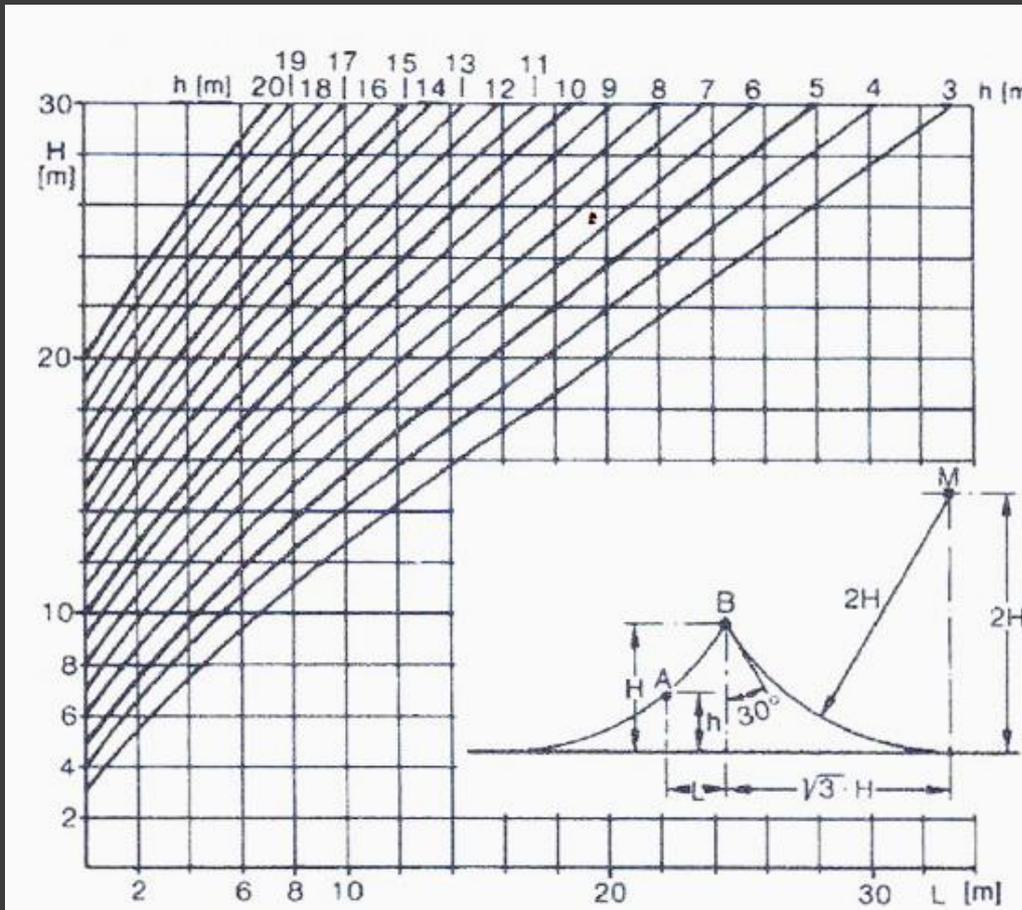
Altura máxima de protección de los equipos: $h_1=7,5$ [m]

Distancia máxima de protección por el hilo de guardia: $L_1=4$ [m]

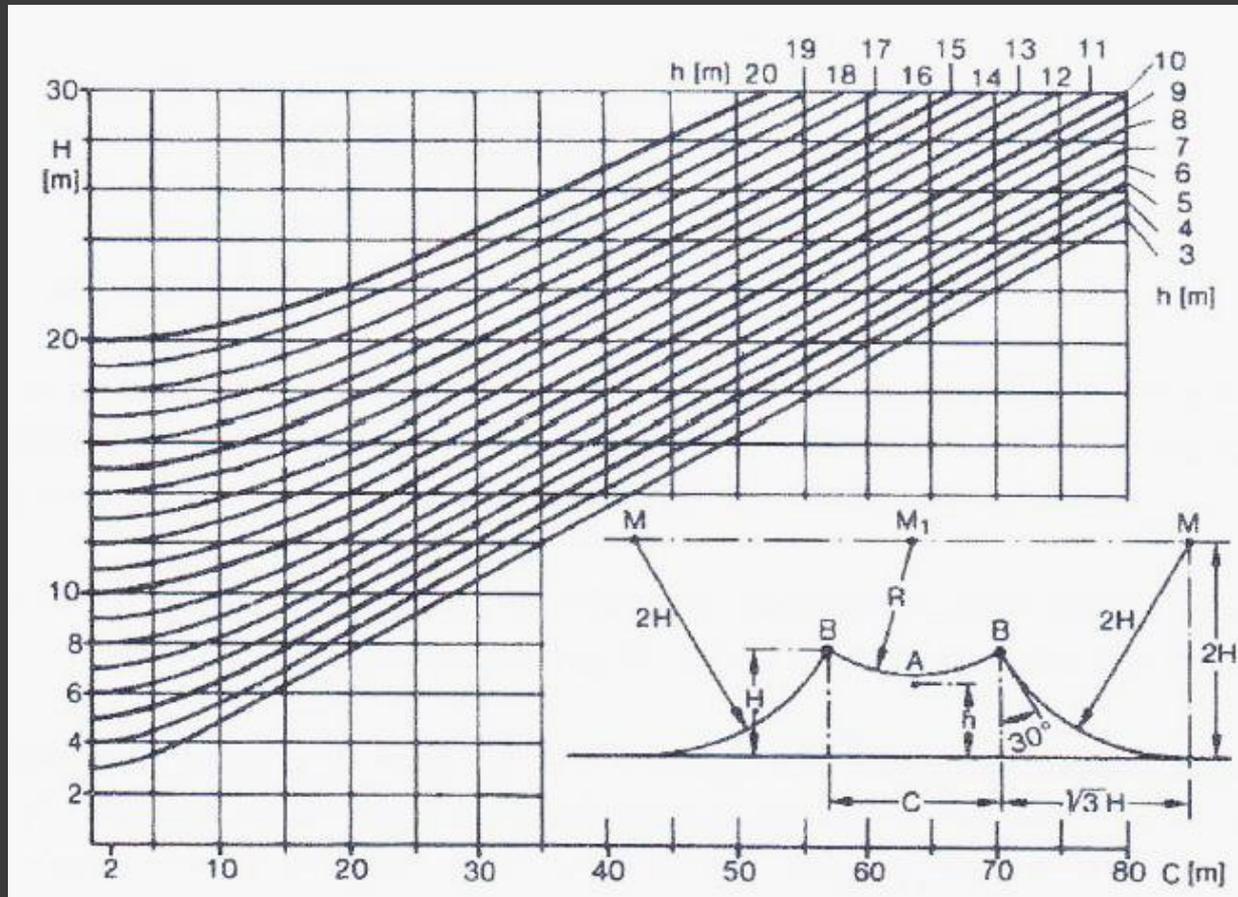
Distancia máxima de protección por el mástil $L_2=8$ [m]

Altura de los hilos de guardia

- Se toma la distancia de $L_1 = 4$ m, trazamos una recta vertical que intercepta con las curvas h de un valor de $h_1 = 7,5$ m en la gráfica y obtenemos en el eje vertical la altura de instalación del hilo de guardia de $H_1 = 13$ m.

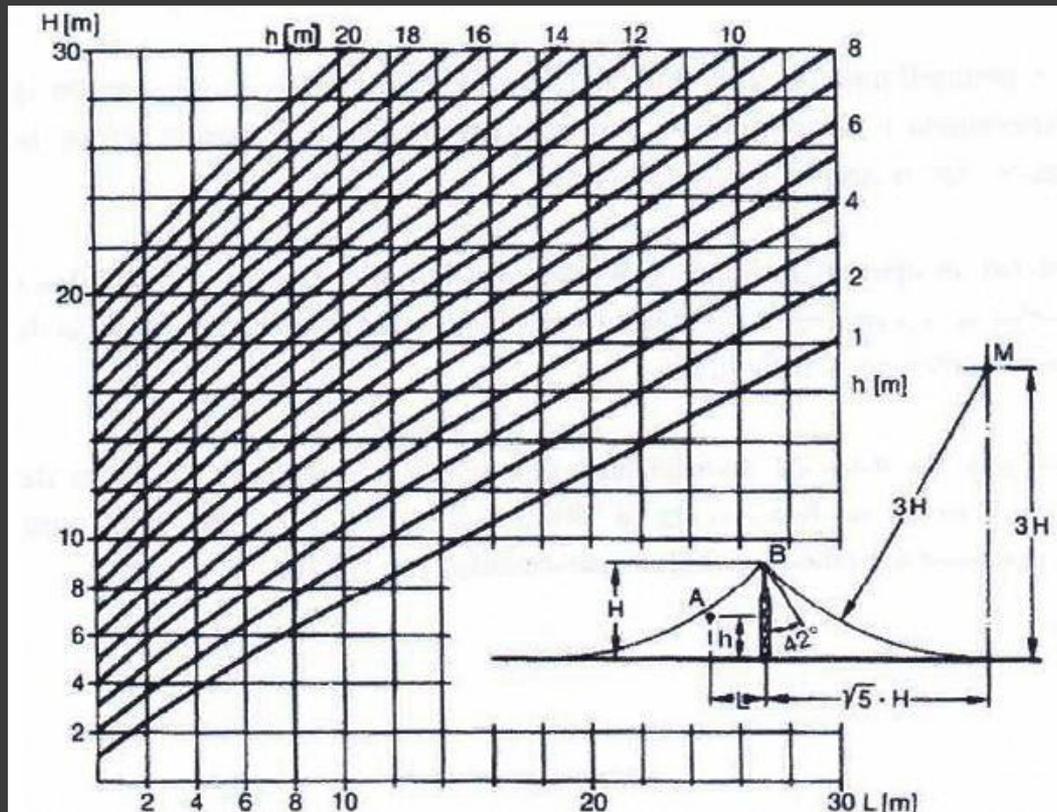


- Ahora verificamos con dos hilos de guardia, tomamos un valor cualquiera de C , para este ejemplo de los planos $C = 30$ m y la altura de $h_1 = 7,5$ m, en la gráfica de la figura la cual nos da un valor real de $H_1 = 13$ m.



Altura de las bayonetas

- Para la altura de las bayonetas se toma una distancia mayor de tal manera que ningún elemento de la subestación quede fuera de la zona de protección para este caso $L_2=8m$.
- Con el valor de $L_2=8m$ en la gráfica de la figura se intercepta con $h_1=7,5m$ y se obtiene la altura de la bayoneta mas la altura de instalación del hilo de guardia, que es equivalente a la altura de un mástil $H=14,5m$.



- Haciendo la diferencia entre la altura del mástil y el hilo de guardia, se tiene la altura de la bayoneta, de un valor de $H_2=1,5\text{m}$
- Por tanto se tienen:

Altura del hilo de guardia:	$H_1=13,0 \text{ [m]}$
Altura del mástil:	$H=14,5 \text{ [m]}$

- Una vez definida la altura de los hilos de guardia y las bayonetas se procede a graficar las curvas, con el objeto de verificar que ningún componente de la subestación quede sin protección.

Apantallamiento con hilos de guardia

- ⦿ Inicialmente se trazan arcos de circunferencias con un radio de $2 * H1 = 26\text{m}$, de tal forma que sean tangentes a la superficie de la tierra y a los hilos de guardia en ambos lados del pórtico.
- ⦿ Se traza una recta horizontal que une los centros de los dos arcos de circunferencia laterales del pórtico.
- ⦿ De la mitad de cada pórtico se trazan líneas perpendiculares que interceptan con la recta horizontal que une los centros y estos puntos serán los centros de los demás arcos de circunferencia.
- ⦿ Se observa que el arco de circunferencia toca el suelo en los laterales del pórtico en $\sqrt{3} * H1 = 22,52 \text{ m.}$

Apantallamiento con mástiles

- El procedimiento es similar al apantallamiento con hilo de guardia, pero en este caso el radio del arco tiene un valor de $3*H=43,5$ m.
- El arco de circunferencia toca el suelo en los laterales del pórtico en un valor de $\sqrt{5} * H = 32,42$ m. desde la base del pórtico.
- En caso de que algunos elementos de las subestación quedaran desprotegidos, entonces se procede a aumentar la altura de los elementos apantalladores mediante los castilletes.

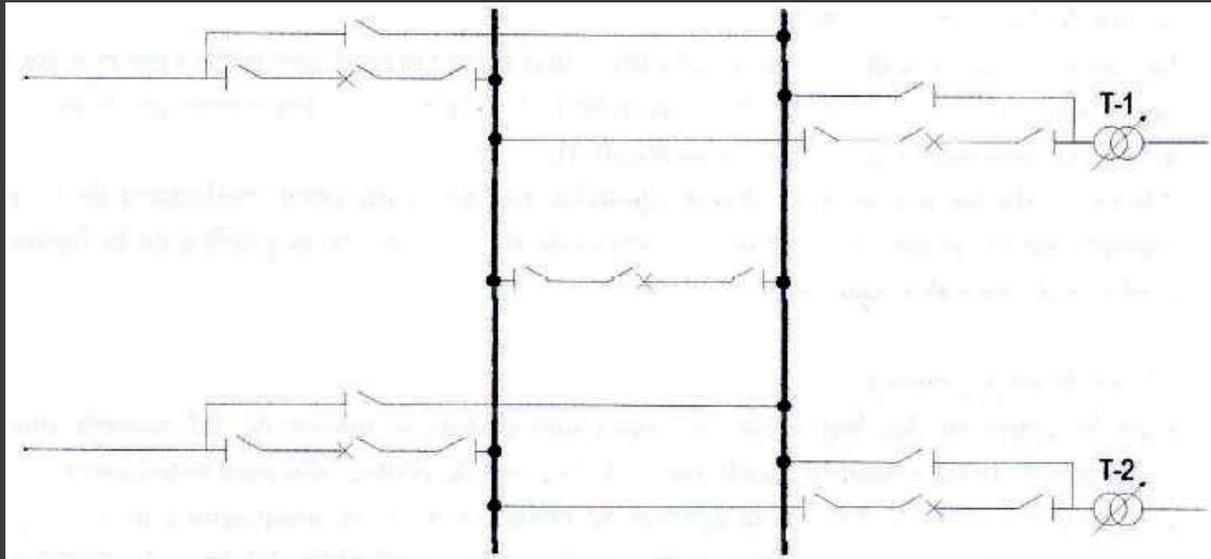
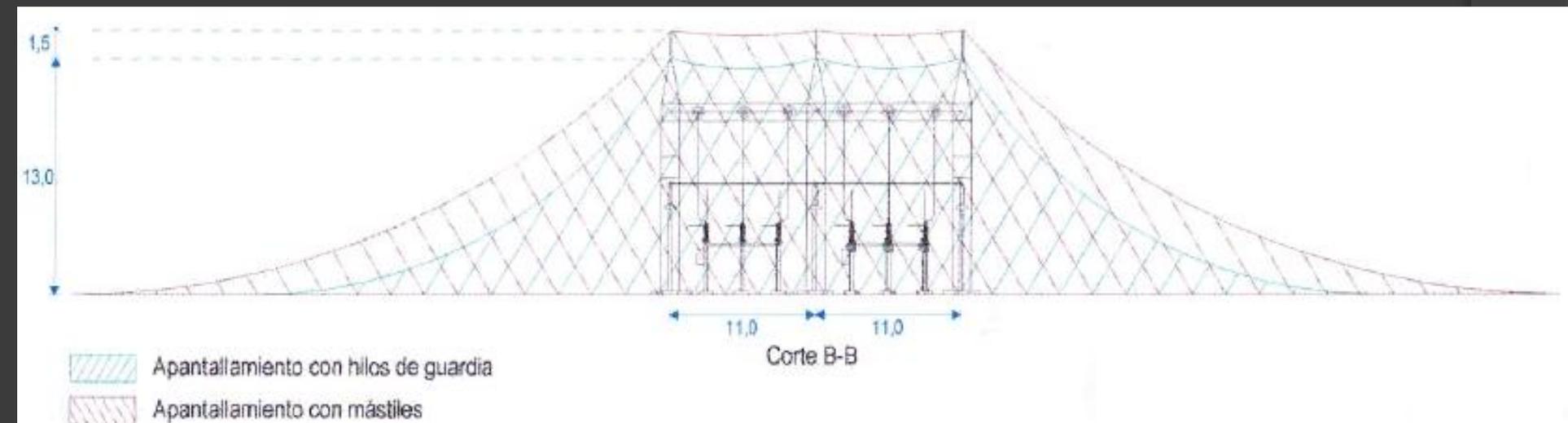
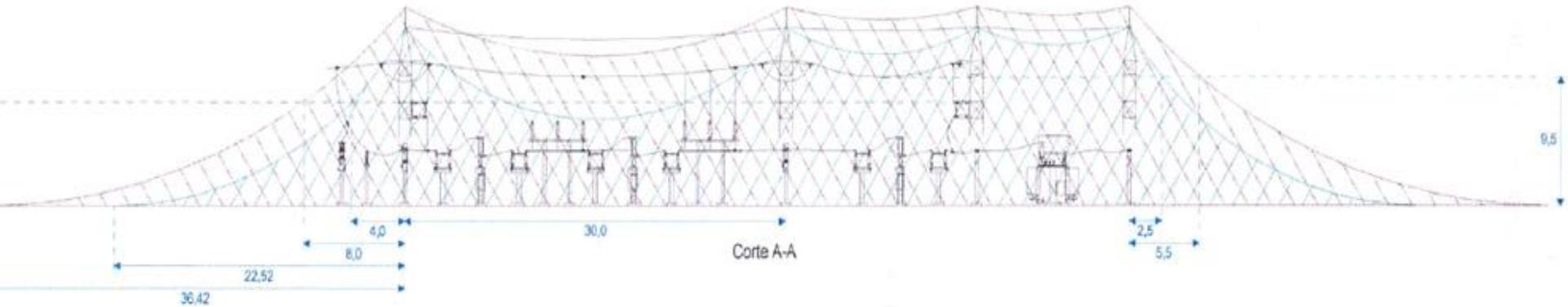
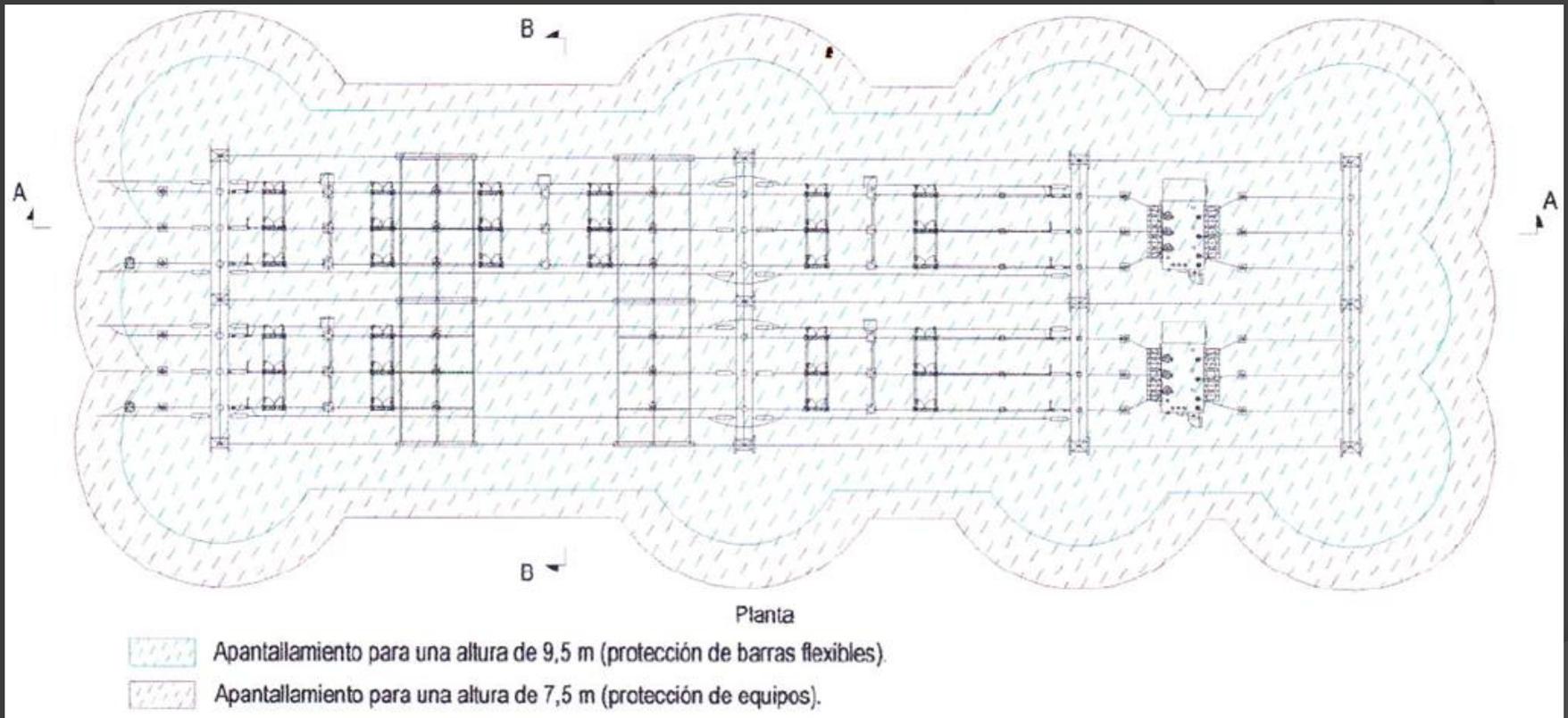


Diagrama unifilar de la subestación, ejemplo

Apantallamiento de la subestación (cortes), ejemplo.



Apantallamiento de la subestación (disposición general de equipo), ejemplo.



- En las anteriores figuras se muestran las zonas de protección con los hilos de guardia y las bayonetas, para una altura de $h_1=7,5\text{m}$ correspondiente a los equipos y una altura de $h_2=9,5\text{m}$ para la protección de las barras flexibles, ubicadas en el pórtico.

GRACIAS