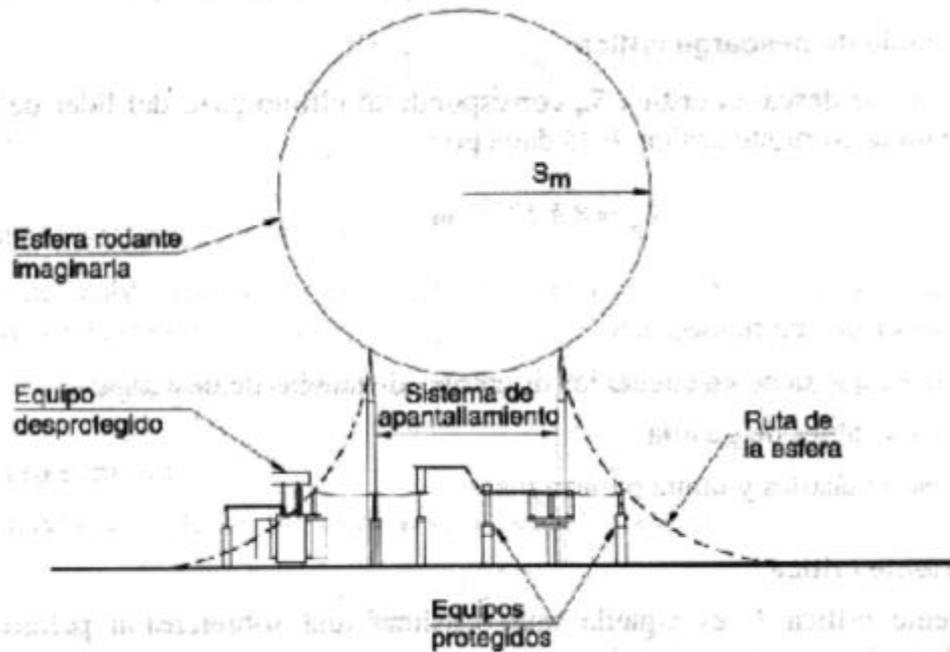




# **APANTALLAMIENTO MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO**

# INTRODUCCION

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

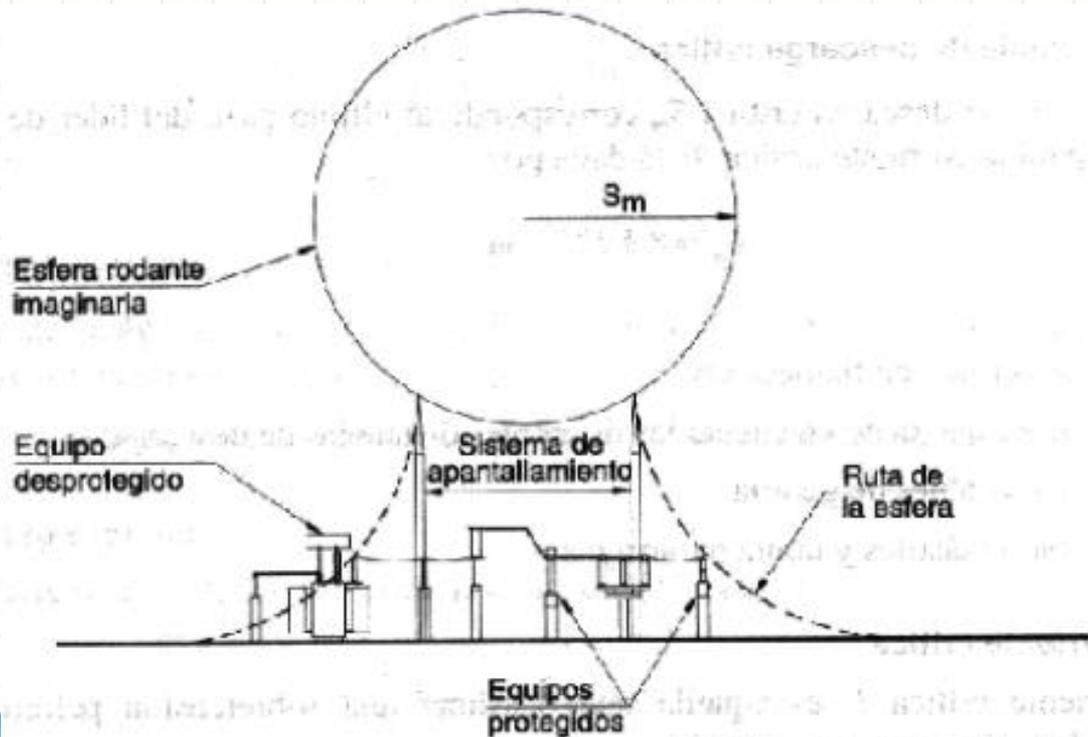


**Figura 5.12 – Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga  $S_m$**

La distancia de descarga se determina la posición de la estructura apantalladora con respecto al objeto que se quiere proteger. Tomando en cuenta la altura de cada uno respecto a la tierra. Aproximadamente el 50% de las empresas utilizan el modelo electrogeométrico para diseñar el apantallamiento de subestaciones.

En la practica para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de Protección, se trazan arcos de circunferencia, con radio igual a la distancia de Descarga a la distancia de descarga a los objetos a ser protegidos, de tal forma que Los arcos sean tangentes entre los objetos.

Cualquier equipo por debajo de los arcos estará protegido por el o los objetos que Conforman el arco y cualquier objeto que sea tocado por el arco estara expuestos A descargas directas.



# DESCRIPCION DEL MODELO EMG

Este método permite seleccionar la altura efectiva del apantallamiento teniendo ya definidas las dimensiones de los pórticos y las alturas de vanos y barrajes dentro de la subestación.

## DISTANCIA DE DESCARGA CRITICA

La distancia de descarga critica  $S_m$  corresponde al ultimo paso del líder de la descarga atmosférica para la corriente critica , esta dada por:

$$S_m = 8 * k * I_c^{0.65}, m$$

Donde:

Ic: corriente critica de flameo, kA

K: coeficiente que tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga:

- a) 1,0 para cables de guarda
- b) 1,2 para mástiles y punta pararrayos



## CORRIENTE CRITICA

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

$$I_c = \frac{2.2 * BIL}{Z_0} \text{ kA} \dots \dots \dots (a)$$

O por:

$$I_c = \frac{2.068 * CFO}{Z_0} \text{ kA} \dots \dots \dots (b)$$

Donde:

$Z_0$ : impedancia característica del barraje a proteger,  $\Omega$

BIL: tensión soportada al impulso tipo atmosférico del aislamiento del equipo, kV.

CFO: tensión critica de flameo de los aisladores , kV.

(a)

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

(b)

- La ecuación (b) es empleada cuando el apantallamiento protege un barraje soportado por cadenas de platos aisladores. El valor de CFO puede ser estimado por la formula de Anderson(1987):
  - $CFO = 0.94 * 585 * w, kV$
  - CFO: tensión critica de flameo inverso de los aisladores , kV.
  - W: longitud de la cadena de aisladores, m.

# IMPEDANCIA CARACTERISTICA

- La impedancia característica  
Zo esta dada por: 

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_{av}}{R_c} \ln \frac{2h_{av}}{r}}, \Omega$$

Donde:

$h_{av}$ : altura promedio del conductor, m

$r$ : radio del cable (fases conformadas por un solo conductor) o  $R_0$  para un haz de conductores, según el caso, m

$R_c$ : radio corona ( $R_c$  si es un conductor simple o  $R_c'$  si se trata de un haz), m.

# ALTURA PROMEDIO

La altura promedio de los cables de fase  $h_{av}$  se calcula como:

$$h_{av} = \frac{1}{3} h_{max} + \frac{2}{3} h_{min}, \text{ m}$$

Donde:

$h_{max}$ : altura de conexión del cable de fase, m

$h_{min}$ : altura en la mitad del vano, m.

cuando  $h_{min}$  no se conoce puede calcularse empleando la expresión

$$h_{min} = h_{max} - \omega L, \text{ m}$$

Donde:

$L$ : longitud del vano, m

$\omega$ : constante que relaciona la flecha máxima  $Y_c$  con la longitud del vano  $L$ ; usualmente entre 0,02 y 0,06.

Para el cálculo de  $h_{av}$  puede emplearse alternativamente la expresión

$$h_{av} = h - \frac{2}{3} Y_c, \text{ m} \quad (9.25)$$

$Y_c$ : flecha del vano, m

$r_{eq}$ : radio equivalente del haz de conductores;  $r_{eq} = r$  cuando el número de conductores por fase es uno, m

# Radio corona

A continuación se resume la metodología para el cálculo del radio corona presentada en el anexo C de la IEEE Std 998 (1996)

En el caso de un solo conductor por fase, el radio corona se calcula mediante la ecuación:

$$R_c * \ln * \left( \frac{2 * h_{av}}{R_c} \right) - \frac{V_c}{E_0} = 0$$

Donde:

$R_c$ : radio corona, m

$h_{av}$ : altura promedio del conductor, m

$E_0$ : gradiente de corona límite, se toma igual a 1500 kV/m

$V_c$ : máxima tensión soportada por el aislamiento de los aisladores para una onda de impulso con polaridad negativa con un frente de onda de 6  $\mu$ s, kV.

La solución de  $R_c$  se encuentra aplicando el método de Newton Raphson, tomando la siguiente solución inicial:

$$R_c = 1,2 \times 10^{-4} V_c, \text{ m} \quad (5.14)$$

En el caso de un haz de conductores por fase el radio corona se calcula como:

$$R_c' = R_0 + R_c, \text{ m} \quad (5.15)$$

Donde:

$R_c$ : radio corona para un solo conductor, m

$R_0$ : radio del haz de conductores, m.

$$R_0 = \sqrt{rl}, \text{ m} \quad \text{haz de dos conductores}$$

$$R_0 = \sqrt[4]{\sqrt{2} r l^3}, \text{ m} \quad \text{haz de cuatro conductores}$$

Donde:

$r$ : radio del subconductor, m

$l$ : distancia entre dos subconductores adyacentes, m.

# Cable de guarda

- La subestación puede apantallarse con cables de guarda ubicados cada campo a cada dos campos.

## ALTURA EFECTIVA DE CABLE DE GUARDA

La altura efectiva del apantallamiento con cable de guarda es la altura del mismo sobre el sistema que esta protegiendo se calcula como:

$$h_e = S_m - \sqrt{S_m^2 - d^2} ,m$$

El parámetro  $d$  corresponde a la mitad de la distancia entre cables de guarda,  $2d$ .

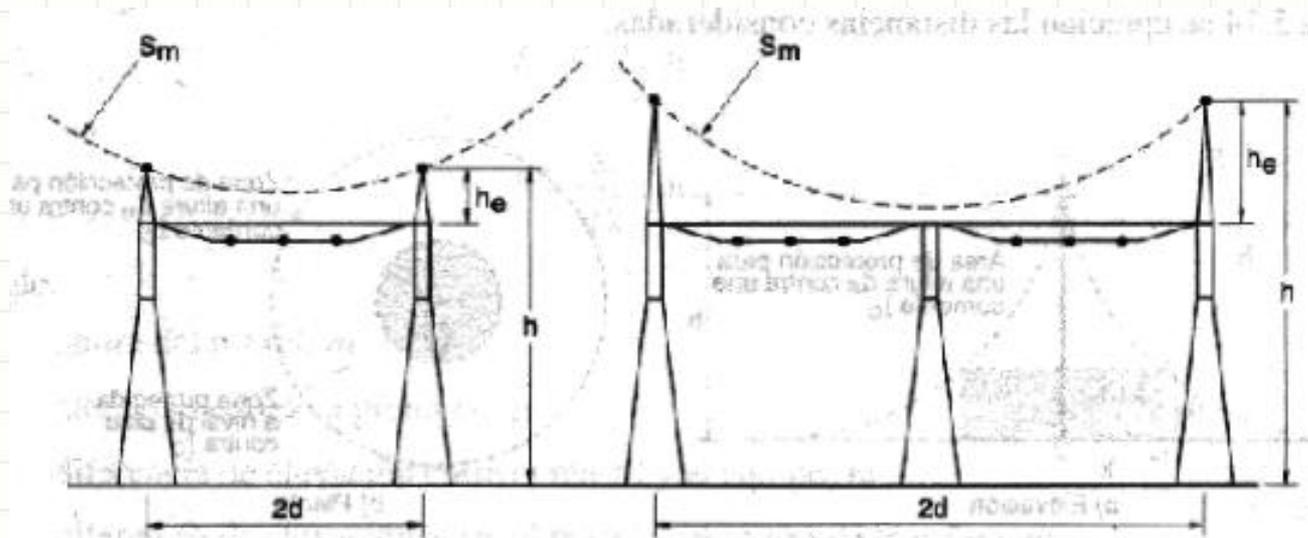


Figura 5.13 – Apantallamiento con cable de guarda cada campo o cada dos campos

# Limite practico para la separación entre cables de guarda adyacentes

El limite practico para la separación entre cables de guarda adyacentes esta determinada por

$$2d_{max} = 1.5 * Sm , \quad m$$

# Mástiles

El uso de puntas no es recomendado. Pero cuando se haga costoso apantallar con cables de guarda, puede resultar seguro el apantallamiento con mástiles.

## Diseño con un solo mástil

Para el cálculo del área de protección de un solo mástil se emplea un procedimiento geométrico en el que se tiene en cuenta la altura del mástil  $h$ , la altura del equipo  $d$  y la distancia de descarga crítica (o de radio de la esfera  $S_m$ ). El procedimiento se describe considerando un mástil sobre el cual se apoyara la esfera del modelo electrogeométrico.

Ya que  $h < S_m$  se emplea la siguiente ecuación:

$$x = \sqrt{S_m^2 - (S_m - h)^2} - \sqrt{S_m^2 - (S_m - d_e)^2}, \text{ m}$$

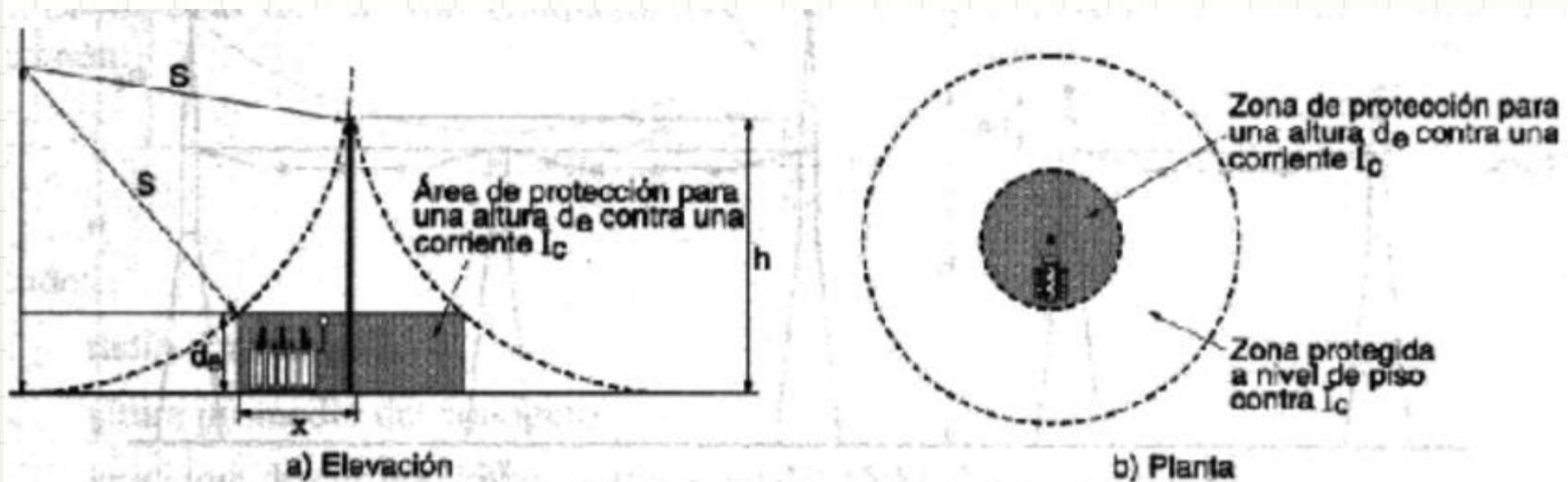
Donde:

$h$ : altura del mástil, m

$d_e$ : altura del equipo a proteger, m

$x$ : distancia máxima horizontal desde la punta hasta el objeto que se desea proteger a una altura  $d_e$ , m.

El círculo con un radio  $x$  alrededor de la punta es el área de protección que brinda la punta contra descarga directa de magnitud  $I_c$  a un objeto ubicado a una altura  $d_c$ . En la figura se aprecian las distancias considerables.

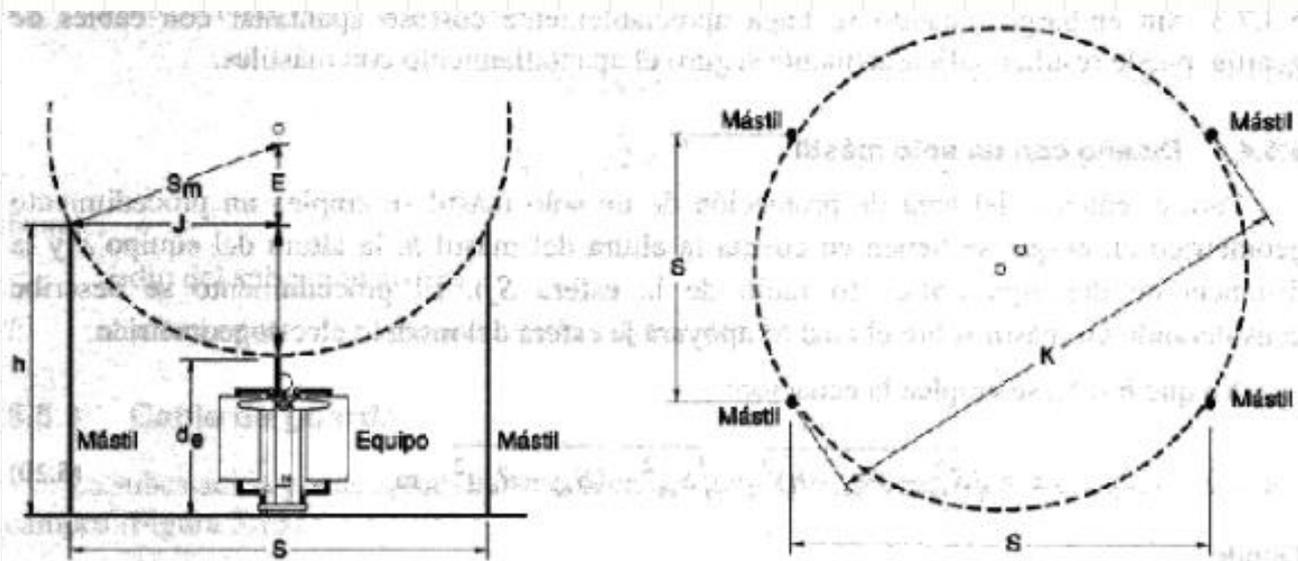


**Figura 5.14 – Área protegida por un mástil**

# Diseño con cuatro mástiles

Si se desea proteger un objeto con cuatro mástiles se asigna inicialmente la altura de los mástiles se asigna inicialmente la altura de los mástiles y luego se determina la máxima separación entre ellos.

Para el calculo de la separación máxima de los mástiles se emplea un procedimiento geométrico en el que se tienen en cuenta la altura de los mástiles  $h$ , la altura del equipo de  $d_e$  y la distancia de descarga critica. En el procedimiento descrito a continuación se considera que la esfera del modelo elctrogeométrico se apoyara en los cuatro mástiles.



5.5.3.4. Altura efectiva **Figura 5.15 – Protección con cuatro mástiles**

# Diseño con 4 mástiles

- La separación entre los mástiles esta dada por las siguientes ecuaciones

$$y = h - d_e, \text{ m}$$

$$E = S_m - y, \text{ m}$$

$$J = \sqrt{S_m^2 - E^2}, \text{ m}$$

$$K = 2J, \text{ m}$$

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

Donde:

$h$ : altura del mástil, m

$d_e$ : altura del equipo a proteger, m

$y$ : diferencia de elevación entre el mástil y el equipo, m

$E$ : diferencia de elevación entre el mástil y el centro de la esfera, m

$J$ : distancia horizontal entre el mástil y el centro de la esfera, m

$K$ : distancia diagonal entre mástiles, m

$S$ : distancia horizontal entre mástiles, m.

# Procedimiento para el diseño

Para el cálculo del apantallamiento se realiza el siguiente procedimiento, tanto para cables de guarda como para mástiles:

1. Cálculo de la altura promedio de los barrajes,  $h_{av}$
2. Cálculo de la impedancia impulso del barraje teniendo en cuenta el radio corona,  $Z_0$ .
3. Cálculo de la corriente crítica de descarga,  $I_c$
4. Cálculo de la distancia de descarga crítica  $S_m$ , la cual se convierte en el radio de la esfera.

Si se desea usar cables de guarda se sigue el siguiente procedimiento:

1. Cálculo de la altura efectiva del cable de guarda,  $h_e$
2. Cálculo de la máxima separación de los cables de guarda,  $2d_{max}$

Si se desea usar mástiles se localizan con el siguiente procedimiento:

1. Se asigna una altura inicial del mástil,  $h$
2. Cálculo del área de protección de un solo mástil,  $x$
3. Cálculo de la máxima separación de los mástiles,  $S$
4. Con esta información los mástiles pueden ser ubicados en la subestación, ajustando su localización hasta obtener el diseño más óptimo.

### **5.5.5.1 Cables de guarda cruzados**

En algunas subestaciones, por ejemplo en las de configuración doble barra en disposición clásica modificada, para las cuales colocar los cables de guarda en el sentido del campo podría resultar costoso debido a que se requiere comprar muchos mástiles adicionales, se recomienda cruzar los cables de guarda entre mástiles colocados estratégicamente entre los campos. Para tales casos el modelo es igualmente aplicable, tomando como separación entre cables de guarda la mayor distancia de separación encontrada en la subestación como base de cálculo, independientemente del tipo de cruce de los cables de guarda.

### **5.5.5.2 Puntos no apantallados por el cable de guarda**

Cuando resulta muy costoso hacer llegar el cable de guarda a un determinado punto de la subestación expuesto a descargas, se recomienda instalar una punta en dicho sitio.

## 5.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El método EGM apantalla contra el 100% de las descargas que podrían causar flameo; los otros métodos consideran un pequeño porcentaje de falla del apantallamiento.
- Se recomienda evitar en lo posible el uso de mástil o mástiles como elementos de apantallamiento de toda la subestación.
- Cuando existan problemas de contaminación y se requiera un gran número de unidades en las cadenas de aisladores, se recomienda el uso de explosores (cuernos saltachispas) para mantener el *CFO* tan constante como se pueda.
- Usualmente se utilizan cables de acero galvanizado calibres 3/8" y 7/16" como cable de guarda. En algunas subestaciones también se utilizan cables de Alumoweld 7 No. 9.

## CALCULO DE APANTALLAMIENTO

El barraje superior está conformado por cables aislados por cadenas de aisladores soportados en pórticos.

Tipo de apantallamiento: Cables de guarda

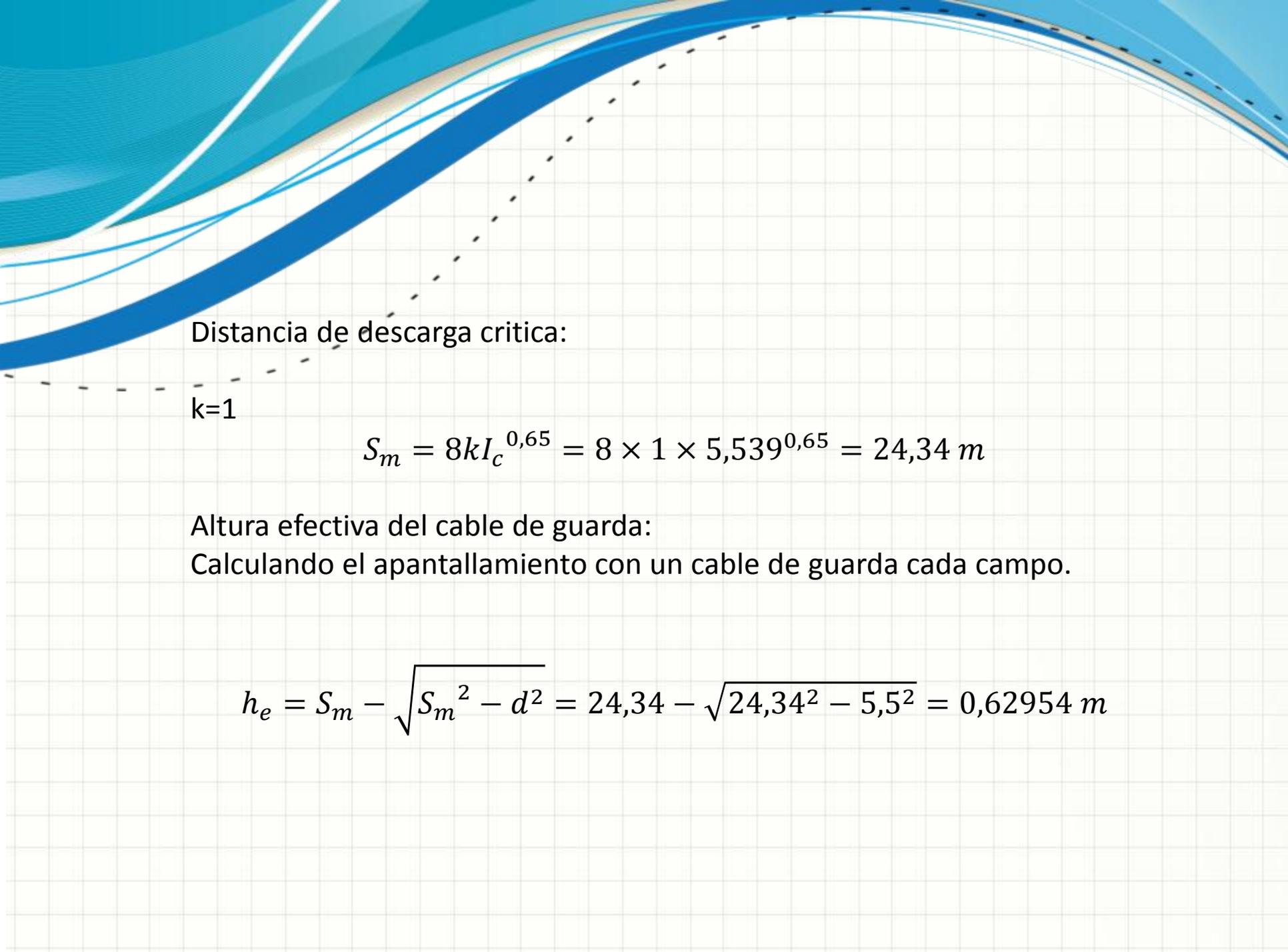
Ancho de un campo:  $2d=11$  m.

Impedancia característica del barraje:  $Z_0=336 \Omega$

Tensión crítica de flameo de los aisladores: CFO=900kV

Corriente crítica de descarga:

$$I_c = \frac{2,06 CFO}{Z_0} = \frac{2,06 \times 900}{336} = 5,539kA$$



Distancia de descarga critica:

$k=1$

$$S_m = 8kI_c^{0,65} = 8 \times 1 \times 5,539^{0,65} = 24,34 \text{ m}$$

Altura efectiva del cable de guarda:

Calculando el apantallamiento con un cable de guarda cada campo.

$$h_e = S_m - \sqrt{S_m^2 - d^2} = 24,34 - \sqrt{24,34^2 - 5,5^2} = 0,62954 \text{ m}$$

*Apantallamiento con cable de guarda*

