

PROTECCIÓN DE SUBESTACIONES CONTRA LA DESCARGA DIRECTA DEL RAYO.

En las subestaciones de intemperie las descargas directas de los rayos a partes activas pueden provocar daños en los edificios, en los embarrados y en el equipamiento (aisladores, aparamenta, transformadores de tensión o de corriente, transformadores de potencia, etc.). Para evitar caídas directas de rayos pueden emplearse cables de guarda tendidos entre los pórticos extremos de la subestación o puntas Franklin (véase figura) instaladas sobre un mástil en las partes más elevadas de la subestación. En ambos casos, el propósito es que las descargas sean captadas y drenadas a tierra evitando su caída directa sobre los elementos de la subestación. Para mejorar el apantallamiento se combinan a veces ambas técnicas: cables de guarda y puntas Franklin.

La serie de normas UNE-EN 62305 proporcionan la referencia internacional para evaluar el riesgo debido al rayo y para diseñar y proyectar es sistema de protección correspondiente.



Figura 1 Pararrayos punta Franklin

Existen otros dispositivos alternativos a las puntas Franklin y a los cables de guarda denominados “pararrayos con dispositivos de cebado” (PDC), para los que en condiciones de laboratorio, con distancias de descarga de algunos metros, se obtienen tiempos de anticipación en el cebado menores que con una punta Franklin y, en teoría, áreas de protección mayores. Sin embargo, no ha habido aceptación internacional de que estos resultados de laboratorio puedan ser extrapolables a las distancias reales de descarga de los rayos que son varios kilómetros, por lo que la norma española UNE 21186 no ha sido respaldada por organismos de normalización internacional como IEC, CENELEC o IEEE. Por ello, los cálculos de apantallamiento presentados en este texto seguirán los modelos internacionalmente aceptados, que también puede ser aplicables a los PDC considerándolos como simples puntas Franklin.

a) Apantallamiento con un solo cable de guarda.

De acuerdo con el modelo electrogeométrico de la descarga del rayo, puede determinarse la zona de protección creada por un cable de guarda, G , tendido horizontalmente a una determinada altura, h , teniendo en cuenta el radio de captación del cable de guarda, R_g , y la altura de captación directa a tierra, y_g (véase figura 2). Según la norma IEEE -998, las distancias R_g e y_g vienen dadas por las siguientes expresiones.

$$y_g = 8 \cdot I^{0,65}$$

Radio

$$R_g = \gamma \cdot y_g$$

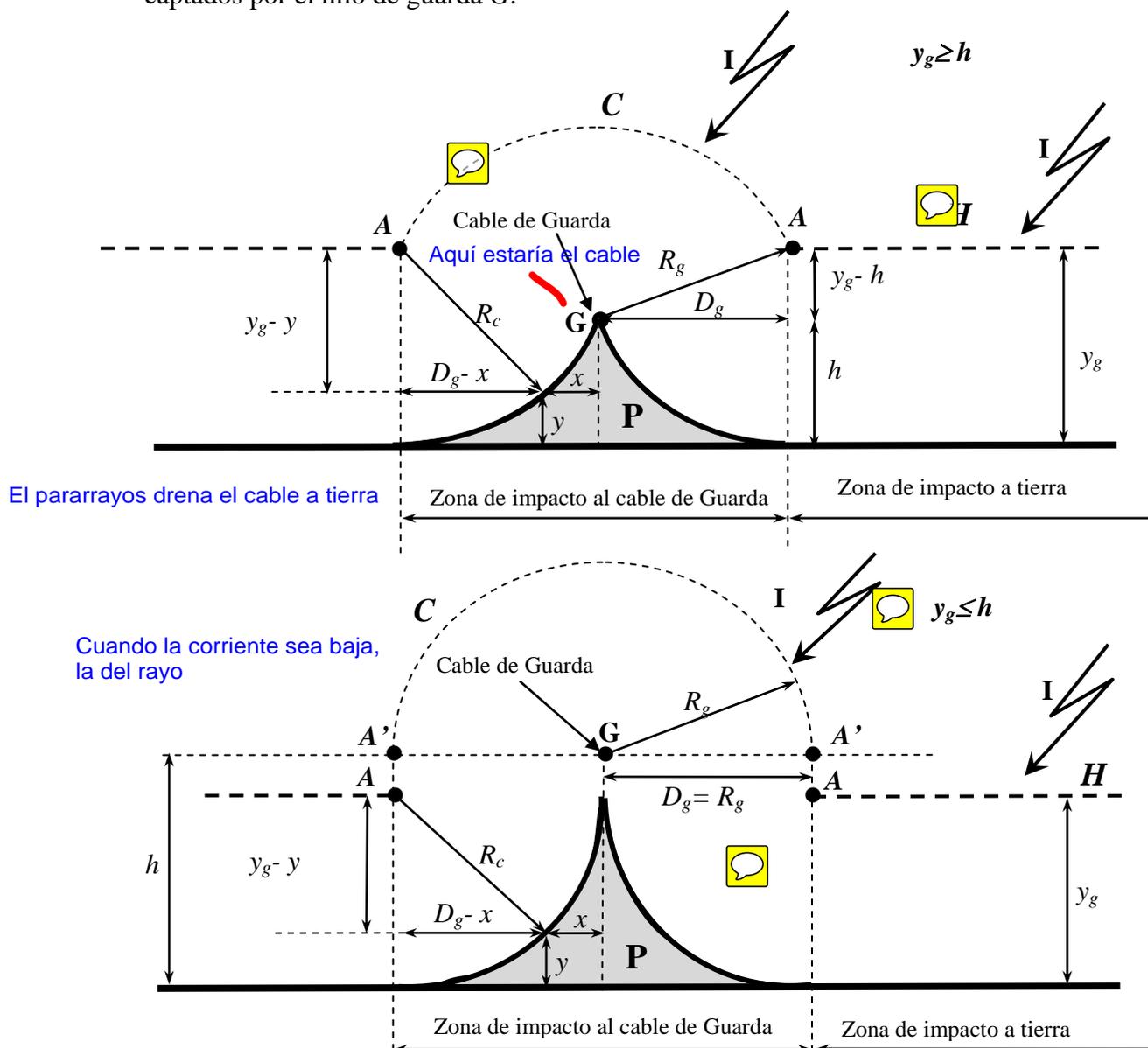
donde:

I corriente del rayo en kA .

y_g altura de captación directa a tierra en m .

$\gamma = I$, según la norma IEEE-998.

Las zonas de captación del rayo de la figura 2.a ($y_g \geq h$) y de la figura 2.b ($y_g \leq h$) se determinan gráficamente trazando un arco de circunferencia de radio R_g con centro en la posición geométrica del cable de guarda, G , y el plano horizontal, H , situado a la altura y_g . Los rayos que accedan al cilindro C de radio R_g serán captados por el cable de guarda, G , mientras que los que accedan al plano H impactarán a tierra. Cuando $h > y_g$ los rayos que accedan en el tramo comprendido entre los puntos A y A' también serán captados por el hilo de guarda G .



Cualquier rayo que acceda al cilindro C tendrá el 0,1% de probabilidad de sobrepasar los límites de la zona de protección, P , de la figura 2 y el 99,9% de ser captado con por el cable de guarda, G , sin llegar a impactar sobre los elementos protegidos situados dentro de la zona P .

Para determinar la envolvente de la zona de protección se traza un arco de circunferencia con centro en A y radio R_c ($R_c=R_g=y_g$), tangente al plano de tierra. A partir de la figura 2 es posible establecer la expresión analítica de la envolvente de la zona de protección con coordenadas x e y , en función de los parámetros h , R_c e y_g .

$$D_g - x = \sqrt{R_c^2 - (y_g - y)^2} \quad (1)$$

donde:

$$\text{Si } h \leq y_g \quad D_g = \sqrt{R_g^2 - (y_g - h)^2}$$

$$\text{Si } h \geq y_g \quad D_g = R_g$$

por lo que:

$$\text{Si } h \leq y_g \quad x = \sqrt{R_g^2 - (y_g - h)^2} - \sqrt{R_c^2 - (y_g - y)^2}$$

$$\text{Si } h \geq y_g \quad x = R_g - \sqrt{R_c^2 - (y_g - y)^2}$$

b) Apantallamiento con dos cables de guarda.

Cuando se disponen de dos cables de guarda, G , tendidos horizontalmente paralelos, separados una distancia $2.S_g$ y suficientemente próximos para que los arcos de circunferencia de radio R_g trazados desde los cables guarda se corten en un punto, B , situado por encima del plano horizontal, H , la zona de protección entre ambos cables de guarda estará limitada por el arco de circunferencia de radio R_c trazado con centro en el punto de intersección B (véase figura 3).

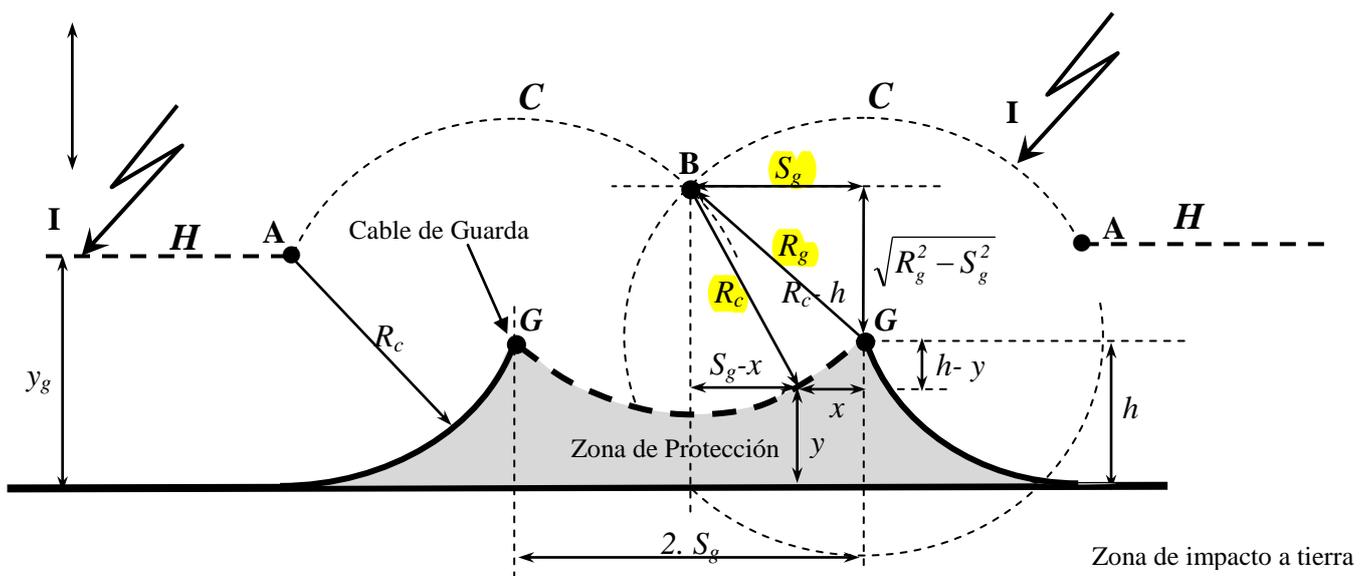


Figura 3. Zona de protección contra el rayo para dos cables de guarda tendidos.

A partir de la figura 3 es posible establecer la expresión analítica de la envolvente de la zona de protección entre ambos cables de guarda, en coordenadas x e y , en función de los parámetros h , S_g , R_g y R_c .

$$S_g - x = \sqrt{R_c^2 - \left(h - y + \sqrt{R_g^2 - S_g^2}\right)^2} \quad (2)$$

por lo que:

$$x = S_g - \sqrt{R_c^2 - \left(h - y + \sqrt{R_g^2 - S_g^2}\right)^2}$$

La altura mínima del apantallamiento se obtiene para el punto medio entre los dos cables de guarda en el que se cumple la condición de que $x=S_g$, por lo que igualando a cero la ecuación (2) se obtiene la condición de y_{min} .

$$y_{min} = h - R_c + \sqrt{R_g^2 - S_g^2}$$

c) Apantallamiento mediante una punta Franklin.

Una punta Franklin protege más que el cable de guarda

Análogamente al apantallamiento con cables de guarda, puede determinarse la zona de protección creada por una punta Franklin situada a una determinada altura, h , teniendo en cuenta el radio de captación de la punta Franklin, R_g , y la altura de captación directa a tierra, y_g (véase figura 4). Las zonas de captación del rayo se determinan gráficamente trazando un casquete esférico de radio R_g con centro situado en el extremo de la punta Franklin, F , hasta la circunferencia, A' , de corte con el plano horizontal situado a la altura R_g y el plano H situado a la altura y_g . Los rayos que accedan al casquete esférico C serán captados por la punta Franklin y los que accedan al plano horizontal H impactarán a tierra. Los rayos que accedan a las generatrices $A - A'$ del cilindro vertical comprendido entre la circunferencia A del plano H y la circunferencia A' del casquete esférico C también serán captados por la punta F .

Según la norma IEEE -998, la distancia R_g para puntas Franklin son un 20% superior al radio de captación con conductores tendidos y a la distancia y_g del plano H al plano de tierra.

$$R_g = 1,2 \cdot 8 \cdot I^{0,65}$$

$$R_g = R_c$$

$$y_g = 8 \cdot I^{0,65}$$

donde:

I corriente del rayo en kA .

y_g altura de captación directa a tierra en m .

Para determinar la envolvente de la zona de protección (zona sombreada de la figura 4) se deben trazar arcos de circunferencia de radio R_c ($R_c=R_g$) con centro en cada punto de la circunferencia, A , tangentes al mástil de la punta Franklin, F , y que también serán tangentes al plano de tierra. Por lo tanto, la envolvente de la zona de protección vendrá definida por una figura de revolución cuyas generatrices son arcos de circunferencia. Teniendo en cuenta la figura 4 es posible establecer la expresión analítica de una generatriz genérica de la envolvente de la zona de protección en función de los parámetros h , R_c e R_g , obteniéndose las ecuaciones siguientes.

$$D_g - x = \sqrt{R_c^2 - (R_g - y)^2} \quad (3)$$

donde:

$$D_g = \sqrt{R_g^2 - (R_g - h)^2} \quad (4)$$

por lo que:

$$x = \sqrt{R_g^2 - (R_g - h)^2} - \sqrt{R_c^2 - (R_g - y)^2}$$

d) Apantallamiento mediante dos puntas Franklin.

La zona de protección creada por dos puntas Franklin, separadas una distancia $2.S_g$ y situadas a una determinada altura, h , puede determinarse teniendo en cuenta el radio de captación de cada punta, R_g , y la altura de captación directa a tierra, y_g (véase figura 5). Las zonas de captación del rayo se determinan gráficamente trazando sendos casquetes esféricos de radio R_g , con centros en cada uno de los extremos de las puntas Franklin, F_1 y F_2 , que cortarían el plano horizontal situado a la altura R_g en sendas circunferencias A_1' y A_2' . Los rayos que accedan a los casquetes esféricos C_1 y C_2 serán captados por las puntas Franklin F_1 y F_2 respectivamente y los que accedan al plano horizontal H impactarán a tierra.

Los puntos de intersección B y B' entre las dos circunferencias A_1' y A_2' identifican dos puntos en el plano horizontal a la altura R_g . La separación máxima entre ambas puntas Franklin para que se solapen sus zonas de captación será dos veces el radio D_g de las circunferencias A_1' , A_2' , cuyo valor viene dado por la ecuación (4) vista anteriormente para una sola punta Franklin.

Para identificar la ubicación de los puntos B y B' se determina la distancia d a través de la relación siguiente:

$$d = \sqrt{D_g^2 - S_g^2} \quad (5)$$

donde:

S_g , mitad de la distancia entre ambas puntas Franklin.

Combinando la ecuación (4) con la (5) se puede determinar la relación entre la altura, h , de las puntas Franklin y la distancia d que identifica el punto de corte B :

$$h = R_g - \sqrt{R_g^2 - S_g^2 - d^2}$$

Análogamente al caso de una sola punta Franklin, para determinar la envolvente de la zona de protección (zona sombreada de la figura 5) se deben trazar arcos de circunferencia de radio R_c ($R_c=R_g$) con centro en cada punto de las circunferencias A_1 y A_2 que sean tangentes a los mástiles de cada punta Franklin F_1 y F_2 y que sean tangentes al plano de tierra. Por lo tanto, la envolvente de la zona de protección vendrá definida por sendas formas cónicas con generatrices de arcos de circunferencia, que interaccionan en la zona de influencia de los puntos B y B' . En la figura 6 se muestra la sección transversal de la zona de protección definida por el plano P-P' de la figura 5.

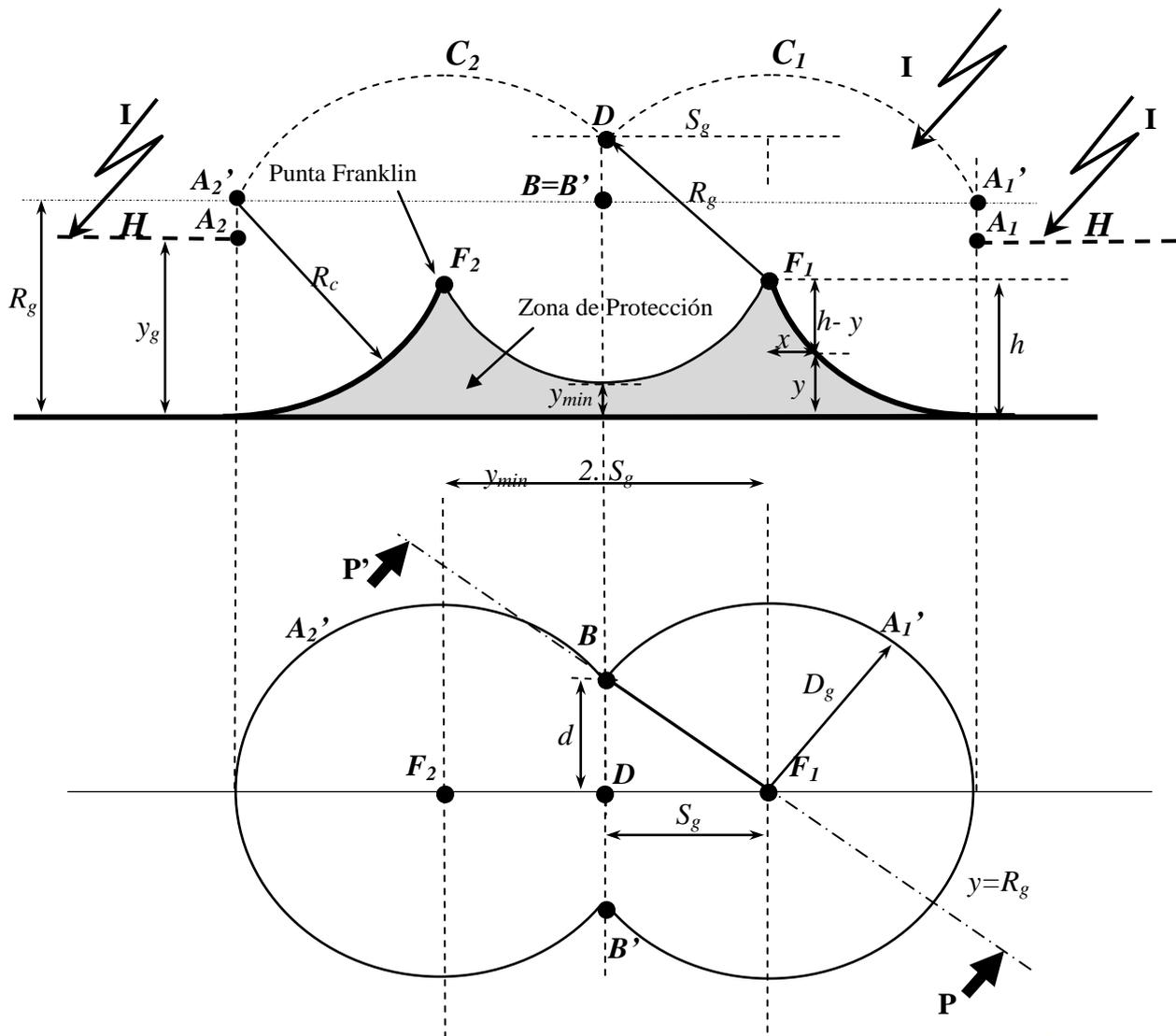


Figura 5. Determinación de la zona de protección contra el rayo para dos puntas Franklin

Cada línea de nivel de la figura 7, que identifica el lugar geométrico de la zona apantallada situada a una altura genérica, y , se determinará por las circunferencias de radio x trazadas desde la proyección horizontal de las puntas Franklin F_1 y F_2 y por las correspondientes circunferencias trazadas desde los puntos B y B' de radio $R(y)$ según se muestra en la figura 6:

$$R(y) = \sqrt{R_c^2 - (R_g - y)^2} \quad (6)$$

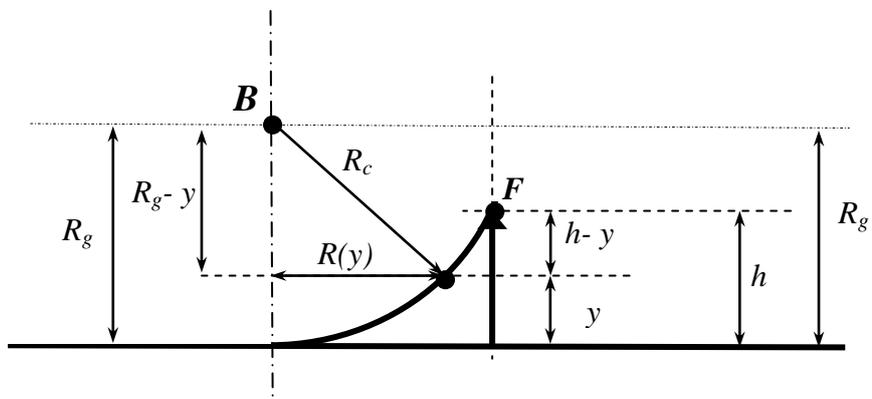


Figura 6. Límite de la zona de apantallamiento afectada por el punto B (sección transversal definida por el plano P-P' de la figura 5).

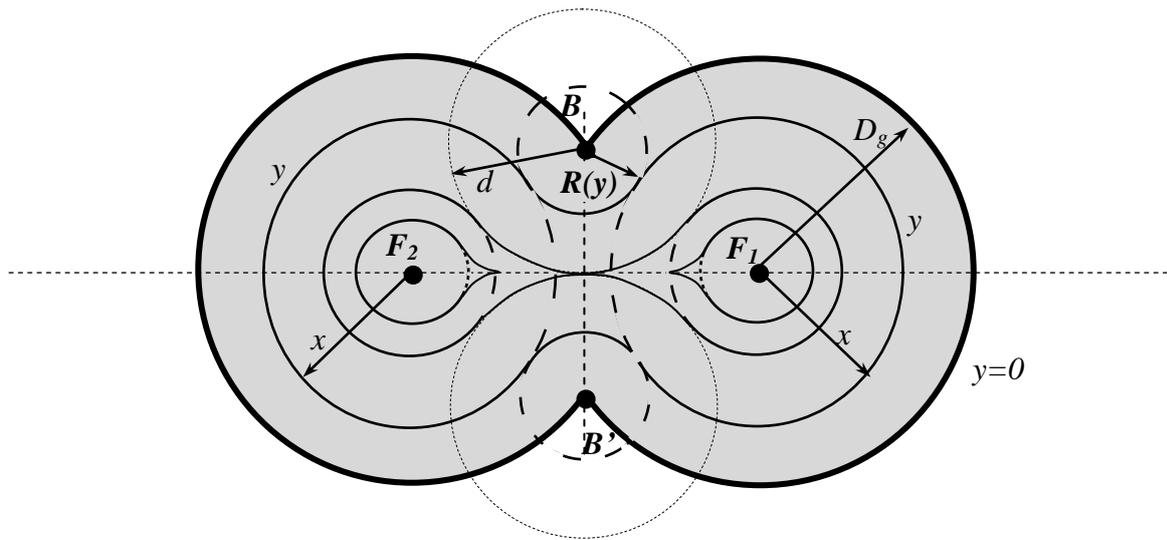


Figura 7. Líneas de nivel "y" de la zona apantallada.

La mínima altura mínima de protección, y_{min} , en el plano que contiene las dos puntas Franklin se obtienen sustituyendo en la ecuación (6) $R(y) = d$.

$$y_{min} = R_g - \sqrt{R_c^2 - d^2}$$

que sustituyendo la ecuación (5) resulta:

$$y_{min} = R_g - \sqrt{R_c^2 - D_g^2 + S_g^2} \quad (7)$$

donde:

$$D_g = \sqrt{R_g^2 - (R_g - h)^2}$$

Teniendo en cuenta que $R_g = R_c$ resulta:

$$y_{min} = R_g - \sqrt{S_g^2 + (R_g - h)^2} \quad (8)$$

Modelo de la esfera rodante.

El modelo electrogeométrico define la zona de protección con una esfera que rueda sobre las puntas Franklin, conductores tendidos, pórticos, vallas y cualquier otro objeto metálico puesta a tierra que pueda efectuar una función de apantallamiento. Se considera que un equipo está protegido para una determinada corriente I_c si permanece por debajo de la superficie definida por la esfera de radio R_{gc} , al rodar por la subestación (véase figura 8).

El valor del radio de la esfera será:

$$R_{gc} = 8 \cdot I_c^{0,65} \quad \text{si se trata de conductores tendidos.}$$

$$R_{gc} = 8 \cdot 1,2 \cdot I_c^{0,65} \quad \text{si se trata de puntas Franklin.}$$

Lo que ocurre en una subestacion

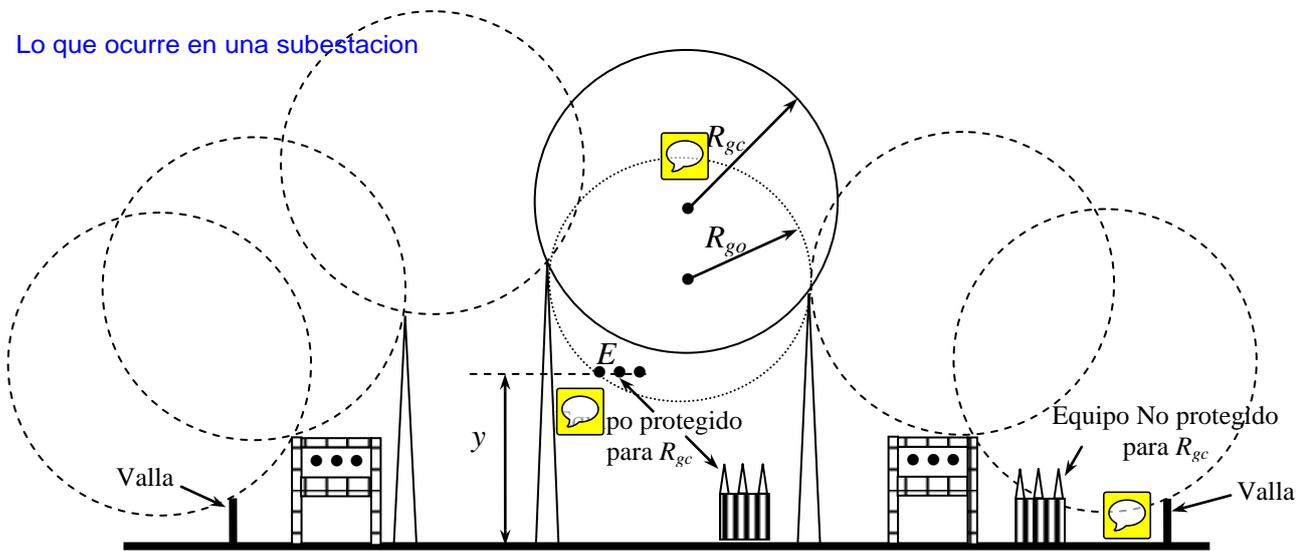


Figura 8. Modelo de la esfera rodante

Cuando en el apantallamiento de una instalación se disponen tanto puntas Franklin como conductores tendidos, se utiliza la expresión de R_{gc} como si se tratara de conductores tendidos, lo que supone resultados algo más conservadores.

En la figura 8 puede observarse que si la amplitud de corriente de rayo fuera inferior a I_c , por ejemplo $I_o < I_c$, el apantallamiento de radio $R_{go}(I_o)$ no sería eficaz para proteger el embarrado E , por lo que el apantallamiento debe diseñarse de tal manera que el valor de I_c sea suficientemente pequeño. Por tanto, el radio R_g de apantallamiento debe elegirse para un valor umbral de corriente I_c tal que para valores inferiores a I_c , la sobretensión ocasionada por la caída del rayo sobre el embarrado no supere su nivel de aislamiento. En estos casos la sobretensión a lo largo del embarrado será limitada por el pararrayos de la subestación que protege al transformador y a la aparamenta.

La amplitud de la corriente I_c se determina para garantizar el nivel de aislamiento del embarrado para lo que se debe cumplir la condición siguiente:



$$Z_c \cdot \frac{I}{1,1} \left(\frac{I_c}{2} \right) \leq NA$$

Nivel de aislamiento superior a la sobretensión que se puede dar

donde:

- Z_c impedancia de onda del embarrado en ohmios: $Z_c = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot y}{r}$
- $\frac{I_c}{2}$ corriente que circula a uno y otro lado del embarrado cuando el rayo cae en un punto intermedio del embarrado.
- l, l factor que tiene en cuenta la reducción de la corriente del rayo en la terminación del embarrado.
- NA nivel de aislamiento normalizado frente a impulsos tipo rayo.
- r radio de los conductores del embarrado.
- y altura de los conductores del embarrado sobre el terreno.

En la práctica el valor mínimo de corriente de descarga I_c debe ser 3 kA, ya que la probabilidad de intensidades de descarga de menor valor es inferior al 0,5 %.

La impedancia de onda del embarrado puede determinarse de una forma más precisa teniendo en cuenta el efecto corona:

$$Z_c = 60 \cdot \sqrt{\ln \frac{2 \cdot y}{r} \cdot \ln \frac{2 \cdot y}{R_{cor}}} \quad (9)$$

El radio corona R_{cor} es el valor del radio del conductor equivalente para el cual el campo eléctrico es igual al de inicio de corona en el aire E_0 , que según la norma IEEE-998 debe considerarse $E_0 \approx 15 \text{ kV/cm}$. Nótese que E_0 es del orden de la mitad del campo eléctrico de inicio corona establecido por Peek, por lo que su valor no debe disminuirse por otros factores como la forma del conductor o las condiciones ambientales (presión, humedad). La expresión que relaciona el campo eléctrico creado por un conductor de radio, R_{cor} , situado a una altura del suelo, y , con el valor de la tensión, U , es la siguiente:

$$E_0 = \frac{U}{R_{cor} \cdot \ln \frac{2 \cdot y}{R_{cor}}}$$

por lo que el valor del radio equivalente debido al efecto corona R_{cor} , expresado en metros, para el umbral límite de la tensión de aislamiento ($U=NA$), se determina a través de la siguiente ecuación.

$$R_{cor} \cdot \ln \frac{2 \cdot y}{R_{cor}} = \frac{NA(kV)}{1500} \quad (10)$$

El cálculo de I_c debe repetirse para las diferentes tensiones existentes en la subestación, por ejemplo para el material a uno y otro del transformador de potencia.