

# Método simplificado de “los dos puntos” para evaluar el comportamiento de una línea de transmisión ante descargas atmosféricas

## Parte I

Ingeniero Jairo León García

### Introducción

Los parámetros básicos que aparecen en la evaluación de los flameos por descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión se dividen en:

- Parámetros de incidencia (rayos sobre la torre)
- Parámetros de respuesta (tensiones inducidas en la línea)

Para este método la onda normalizada del rayo se toma como una función rampa con un tiempo de cresta igual a 2 microsegundos y con la parte superior aplanada (figura 1).

La curva **tensión vs. tiempo** corresponde a la curva normalizada según CIGRE para flameos del aislamiento de la línea (figuras 1 y 2).

La entrada a la curva de **tensión vs. tiempo** se realiza en solo dos puntos. La figura nro. 1 muestra la corriente del rayo en por unidad, así como la onda normalizada y los dos puntos A y B en los cuales se evalúa la corriente crítica del rayo requerida para penetrar con la tensión del aislamiento en la curva normalizada.

En este método, la corriente crítica se evalúa para el tiempo de cresta dos (2) y para seis (6) microsegundos. El menor de los dos valores se utiliza para evaluar la tasa de salidas para una fase dada.

Se considera también, que los flameos que ocurren más allá de los seis microsegundos son poco frecuentes debido al aplanamiento de la curva **tensión vs. tiempo** del aislamiento.

### Mecanismos de generación de flameo por descargas atmosféricas

- *Falta del apantallamiento del cable de guarda.*

El rayo cae directamente sobre la fase, incidiendo verticalmente. En la figura 3 pueden observarse que el rayo A saltará solamente sobre el cable de guarda, dado que para cualquier punto sobre el arco OP la distancia al conductor de fase será siempre mayor que S.

El rayo C sólo podrá saltar a una distancia  $\beta S$  ya que para cualquier punto sobre QR la distancia al conductor de fase es muy grande ( $\beta = 0.8$  para líneas E.H.V.).

El rayo B, tan pronto alcanza el arco PQ, sólo podrá saltar hacia la fase.

La distancia  $X_s$  corresponde a una zona no protegida en la cual los rayos que NORMALMENTE ALCANZARÍA LA TIERRA INCIDIRÁN EN CAMBIO SOBRE A FASE

Para lograr un apantallamiento efectivo  $X_s = 0$  (figura 3b), la coordenada de la fase se toma como referencia (igual a cero y se calcula la coordenada  $X_g$  (negativa por estar el cable de guarda localizado a la izquierda de la fase).

Para la evaluación del número de salidas se toma la fase más expuesta y se calcula la tensión crítica de flameo de su aislamiento (kV) para seis (6) microsegundos. Igualmente se calcula la impedancia impulso de la fase teniendo en cuenta el efecto corona. Con esta información obtenemos la corriente mínima del rayo sobre el conductor de fase necesaria para que halla flameo en su aislamiento. Con base en la corriente mínima se obtiene la distancia de atracción mínima del rayo para la fase más expuesta,  $S_{min}$ , con la cual se calcula el ancho de zona no protegido,  $X_s$ .

Si la distancia de atracción se incrementa, el arco PQ decrece. Cuando S es muy grande PQ se hace igual a cero y las figuras 3a y 3b son equivalentes. Este valor de distancia de atracción se define como la distancia mínima de atracción y corresponde al máximo valor de corriente del rayo,  $I_{max}$ , que puede causar flameo.

En estos términos solo los rayos con valores de corriente  $I_{\min}$  e  $I_{\max}$  podrán causar flameos por falla del apantallamiento del cable de guarda de acuerdo con la teoría Electrogeométrica.

El número de fallas por apantallamiento x 100 Km. x año,  $N_{SF}$ , se obtiene con base en el número de rayos que pueden causar flameos,  $N_L$  y de las probabilidades máxima y mínima de que se presenten las corrientes mínima y máxima necesarias para que ocurra falla del aislamiento de la fase más expuesta.

La anterior formulación es válida para un solo cable de guarda y una fase. Puede ocurrir que otras fases están también expuestas o que una fase esté expuesta a ambos lados. En estos casos cada tasa de fallas del apantallamiento, se suma separadamente para hallar la tasa total, la cual debe sustraerse del número total de rayos sobre la línea  $N_L$  para obtener el número de rayos a ser utilizados en el cálculo del número de fallas por flameo inverso.

- *Flameo inverso (Back-Flashovers)*

Este mecanismo será presentado posteriormente.

## Método simplificado de los dos puntos

### 1. Fallas por apantallamiento

#### Ecuaciones

##### Ecuación No. 1

$$N = 0.12T(EPRI)$$

N Número de rayos a tierra por  $Km^2$  x año

T Nivel cerámico en días de tormenta por año en el área

##### Ecuación No. 2

$$h_{mp} = h_g - \frac{2}{3}(h_g - h_{gw}) \text{ Perfil plano}$$

$h_{mp}$ : Altura medida del cable de guarda en la línea

$h_g$ : Altura del cable de guarda en la torre

$h_{gw}$ : Distancia a tierra en mitad del vano para el cable de guarda (m)

$h_{mp} = h_g$  (PERFIL ONDULADO)

$h_{mM} \geq 2h_g$  (PERFIL MONTAÑOSO)

$$h_m = h_{mp} * \%T_p + h_{mo} * \%T_o + h_{mM} * \%T_M$$

$h_m$ : Altura promedio del cable de guarda en la línea

Estas ecuaciones son válidas para calcular la altura media de la fase más expuesta en la línea  $h_\phi$ .

##### Ecuación No. 3

$$N_L = 0.012T(b + 4h_m^{1.09})$$

$N_L$ : Número de rayos a la línea por 100Km. por año

b: Separación entre cables de guarda (m)

$h_m$ : Altura media del cable de guarda en la línea

##### Ecuación No. 4

$$R_{in} \frac{2h}{R} = \frac{V}{E_0}$$

(Para un conductor sencillo con corona densa)

R: Radio de corona

H: Altura del conductor sobre el nivel del terreno

V: Tensión aplicada al conductor de fase

$E_0$ : Gradiente límite, por debajo del cual no se presenta corona, V/m.

La solución de esta ecuación puede obtenerse por un método iterativo tipo Newton-Raphson

$$E_0 = 30.000M\delta\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right) * 100$$

$$= \frac{V}{m}$$

M: Factor de rugosidad del conductor

$\delta$ : Densidad relativa del aire

$E_0$ : Máximo para  $\delta = 1$  (PEEK)

r: Radio del conductor en cm.

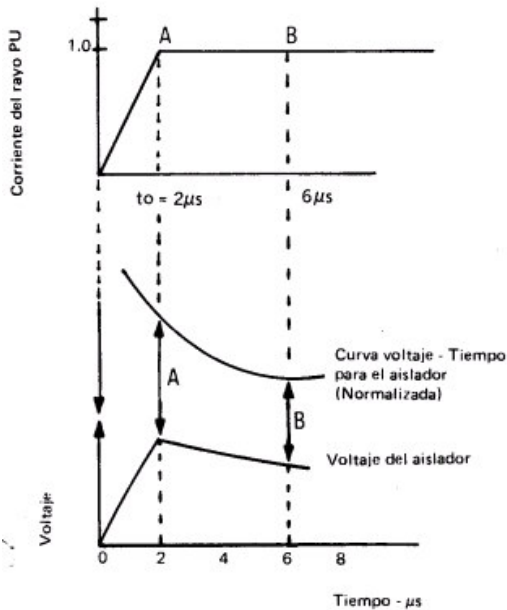


Fig. No. 1. Corriente del Rayo presentada como una simple función rampa. Tensiones a través del aislamiento evaluada en sólo dos puntos. (Tomada de Transmission Line Reference Book, 345 kV and above, second edition, 1982, epri, Pag. 573.

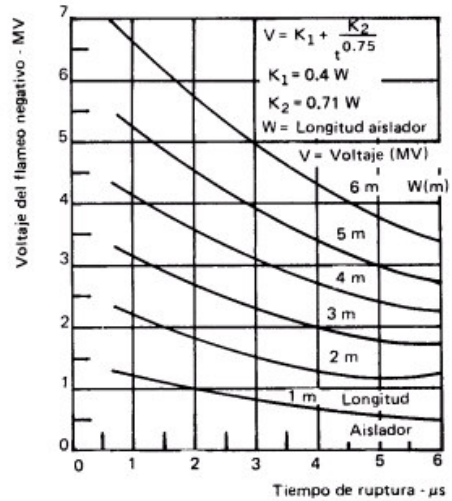


Fig. No. 2. Curva Cigre de Tensión Vs. Tiempo para flameo del aislamiento de la línea (Darveniza, Popolansky y Whitehead. (Tomada de Transmission Line Reference Book, 345 KV and above, second edition, 1982, epri, Pag. 564.

**Ecuación No. 5**

$$R_{eq} = \sqrt[n]{r_{11} r_{12} r_{13} \dots r_{1n}}$$

$$I_{min} = \frac{2V_c}{Z_\phi}$$

$R_{eq}$ : Radio equivalente de un haz de conductores libre de corona

$I_{min}$ : Corriente mínima crítica del rayo (kA), para que ocurra falla del apantallamiento (kA)

$r_{11}$ : Radio del subconductor 1

$V_c$ : Voltaje crítica de flameo para el aislamiento (figs. 1 y 2) de la fase más expuesta (kV) calculada en un tiempo  $t = 6\mu s$

$r_{1n}$ : Radio del subconductor n

$Z_\phi$ : Impedancia impulso del conductor con efecto corona

N: Número de subconductores

$R+R_q$ : Radio corona aproximado del haz

**Ecuación No. 6**

$$Z_{nn} = 60 \sqrt{\left( \ln \frac{2h_\phi}{r} * \ln \frac{2h_\phi}{R} \right)}$$

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

$Z_{nn}$ : Impedancia impulso propia eficaz del conductor n (ohmios)

S: Distancia mínima crítica de atracción del rayo

I: Corriente del rayo (m)

r: Radio del conductor ( $R_{eq}$ ) si se trata de un haz (m)

**Ecuación No. 9**

R: Radio corona del conductor o haz de conductores (m)

$$X_{cg} = \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_\phi)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_{cg})^2}$$

$h_\phi$ : Altura del conductor sobre el suelo (media) (m)

$X_{cg}$ : Abscisa del cable de guarda para apantallamiento efectivo (m)

La ecuación número 6 sirve para calcular la impedancia impulso del haz, utilizando los radios equivalentes. La presencia de varios subconductores causa reducciones en el diámetro corona efectivo de cada subconductor.

**Ecuación No. 7**

$Y_{eg}$  y  $Y_{\phi}$  : Ordenadas del cable de guarda y fase, respectivamente ( $h_m, h_{\phi}$ ) (m)

**Ecuación No. 10**

$$\alpha_E = \text{ArcTang} \left( \frac{X_{cg}}{Y_{\phi} - Y_{cg}} \right)$$

$\alpha_E$ : ángulo de apantallamiento efectivo

**Ecuación No. 11**

Ver figura Nro. 3 Apantallamiento no efectivo

Sí,  $\beta S \geq Y_{\phi}$

$$X_s = S [\text{Cos} \theta + \text{Sen}(\alpha - W)]$$

$X_s$ : Ancho no protegido

$$\theta = \text{ArcCos} \frac{\beta - Y_{\phi}}{S}$$

$$W = \text{ArcCos} \frac{F}{2S}$$

F: Separación entre el cable de guarda y fase (m)

$$\alpha = \text{ArcTang} \left( \frac{X_{\phi} - X_{cg}}{-Y_{cg} - Y_{\phi}} \right)$$

$\alpha$ : Ángulo de apantallamiento

$X_{\theta}$ : Abscisa del conductor de fase (m)

Si  $\alpha_E > \alpha$ , la línea estará perfectamente apantallada,  $N_{sF} = 0$

**Ecuación No. 12** (ver fig. No. 3)

Si,  $\beta S \leq Y_{\phi}$

$$X_s = S [1 + \text{Sen}(\alpha - W)]$$

$X_s$  asociado con  $I_{\min}$

**Ecuación No. 13** (ver fig. No. 4)

$S_{\max}$ : Distancia máxima de atracción del rayo

$$S_{\max} = Y_0 \left( \frac{-B - \sqrt{B^2 + AC}}{A} \right) = Y_0 \bar{S}$$

$$Y_0 = \frac{Y_{cg} - Y_{\phi}}{2}$$

$$m = \text{pendiente} = \frac{X_{\phi} - X_s}{Y_s - Y_{\phi}}$$

$$A = m^2 - m^2 \beta - \beta^2$$

$$B = \beta(m^2 + 1)$$

$$C = (m + 1)$$

**Ecuación No. 14**

$$I = 0.029S_{\max}^{1.54}$$

I: Corriente máxima para que ocurra falla a  $S_{\max}$  (kA)

**Ecuación No. 15**

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

(Anderson-Eriksson)

$P_I$  Probabilidad de que el pico de corriente en el rayo pueda exceder el valor de I (kA) máxima, mínima.

Se utiliza también en el caso de flameo inverso.

**Ecuación No. 16**

$$N_{sF} = 0.012T \frac{X_s}{2} (P_{\min} - P_{\max})$$

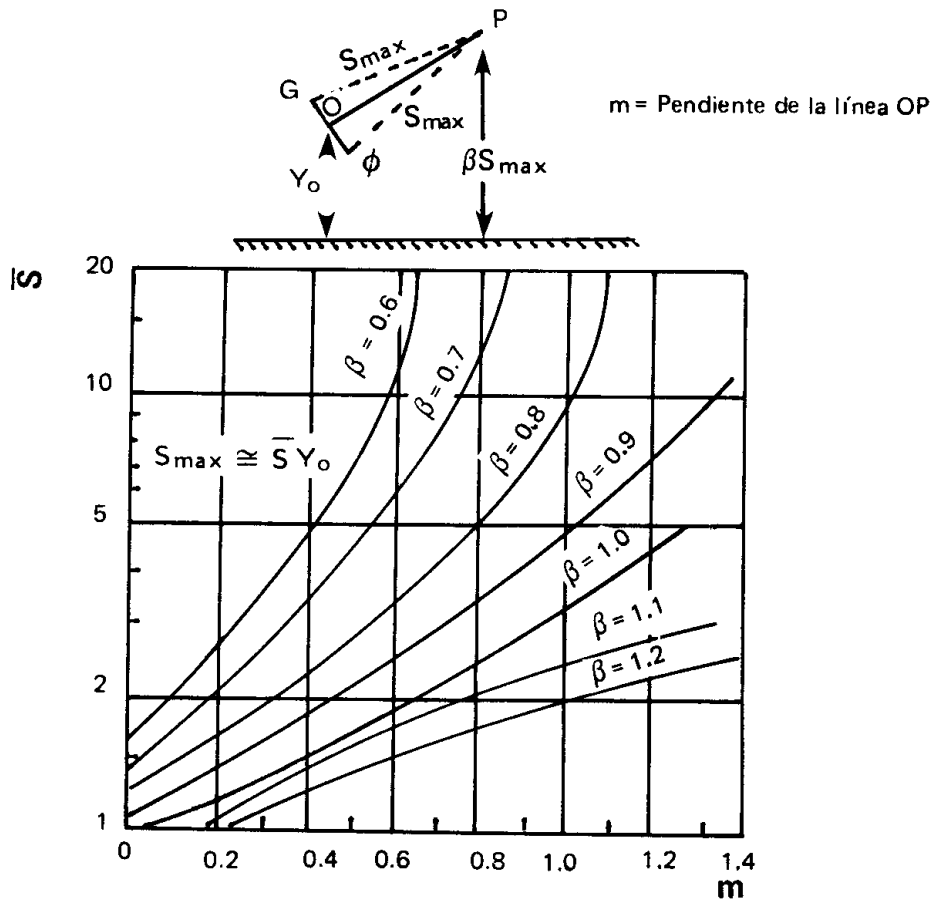
$N_{sF}$ : Número de fallas del apantallamiento 100 km/año

$P_{\min} - P_{\max}$ : Diferencia de probabilidades de ocurrencia del (rayo) de  $I_{\min}$  e  $I_{\max}$

$\frac{X_s}{2}$  ancho no protegido promedio

$X_s$  Asociado con  $I_{\max}$  se reduce a cero





**Fig. No. 4.** El valor de  $\bar{S}$  por el cual debe multiplicarse para encontrar el  $S_{\max}$ : Distancia máxima de atracción ( $S_{\max} = Y_0 \bar{S}$ ). Tomada de *Transmission Line Reference Book, 345 KV and above, second edition, 1982, epri. Pag. 569.*

Si desea cambiar su dirección electrónica, suscribir a un colega, solicitar ediciones anteriores o borrarse de la lista de distribución, envíenos un mensaje a:

[carango@gamma.com.co](mailto:carango@gamma.com.co)

Atn Ing. Claudia Arango Botero.

Visítenos en nuestra página Web:

<http://www.gamma.com.co> o [www.corona.com](http://www.corona.com)