

# Métodos para determinar salidas de líneas aéreas por fallas de apantallamiento ante descargas atmosféricas

## Shielding failure rates in aerial lines for direct hit of lightning strokes

Frank Bustamante\*

PVDSA.

E&P Occidente.

\*BUSTAMANTEF@PDVSA.COM

### Resumen

*Con el propósito de contar con herramientas básicas para determinar la falla de apantallamiento ante descargas atmosféricas en líneas aéreas de transmisión, se desarrolló este trabajo que consiste en estudiar tres métodos para determinar la tasa forzada de salida en líneas aéreas por impacto directo de descargas atmosféricas en los conductores de fase, producto de falla de apantallamiento de los hilos de guarda. Para los análisis se tomó como base, una línea a nivel de 34,5 kV de 34 km, cuya ruta es sobre el Lago de Maracaibo, la cual nos permite comparar los 3 métodos. Los resultados demuestran que los tres métodos expuestos, tienen valores comparables, por lo que pueden ser usados para evaluar las fallas por apantallamiento de cualquier línea aérea*

**Palabras Claves:** Apantallamiento, descargas atmosféricas, hilo de guarda, tasa forzada de salida

### Abstract

*The main purpose is to get some fundamental tools to determine lightning shielding failures in overhead transmission lines. This work was based on three methods for determine shielding failures rates in aerial lines for direct hit of lightning strokes. The analysis was based on a line at 34,5 kV operational voltage, 34 km long, and its route is located in the Maracaibo Lake. The results show that the three proposed methods have comparable results, which means that they can be used to evaluate any overhead electrical transmission line.*

**Keywords:** Shielding failure, lightning stroke, shielding wires, flashover rates

### 1 Introducción

En los últimos años, ha existido un alto porcentaje de salida forzada asociadas a descargas atmosféricas de la línea 7L proveniente de la Planta Eléctrica Punta Gorda, la cual alimenta las Subestaciones 11L y 13L a nivel de 34,5 kV, y sirven de alternativa a la Subestación 51 del complejo ULÉ, y Subestación 32L, del Sistema Eléctrico PDVSA Occidente.

Este circuito tiene la característica que mas de un 80% se encuentra ubicado en el Lago de Maracaibo con una longitud aproximada de 34 km, de configuración horizontal sobre una torre tipo A de 82 pies de alto, mostrada en la Fig. 1

Dada la importancia que representan estas línea para el

suministro de energía en las instalaciones de Lago y Tierra, surgió la necesidad de realizar un estudio de la protección de apantallamiento que ofrece el hilo de guarda contra impactos directos de descargas atmosféricas en la línea en cuestión, a fin de determinar si esta es la causa de sus salidas forzadas.

### 2 Objetivo

Comparar tres métodos para determinar la tasa de salida por falla de apantallamiento ante descargas atmosféricas directas en líneas aéreas, mediante su aplicación en una línea a nivel de 34,5 kV; ubicada sobre el lago de Maracaibo.



Fig. 1. Torre de transmisión Línea 7L

### 3 Datos de la línea.

Tipo: Doble terna en configuración horizontal.  
 Longitud: 34 km  
 Aislamiento: 6 aisladores tipo suspensión en el lago.  
 Longitud de la cadena de aisladores: 0,95m para 6 aisladores.  
 Tipo de aislador: Estándar 10''x 5 3/4'' (254 mm x146 mm, CFO = 585 kV para 6 unidades .  
 Altura del conductor de guarda: h= 25,15 m  
 No. De conductores de Guarda: 2  
 Separación de los conductores de Guarda: b= 5,06 m  
 Altura del conductor superior: 23,1 m para una cadena de 6 aisladores.  
 Altura del conductor inferior: 20,15 m  
 Tipo de conductor de fase: ASCR, calibre 4/0 AWG, diámetro = 0,563''=0,0143 m  
 Flecha máxima: 3 m  
 Altura promedio del conductor superior tomando en cuenta el vano:  $Y_c=23,1-2/3*3=21,1$  m  
 Nivel Isocerámico: TD= 100 días de tormenta al año.

### 4. Métodos para determinar el apantallamiento.

Básicamente existen tres métodos para determinar la efectividad del apantallamiento del hilo de guarda, dos ellos son analíticos y el tercero es gráfico, los cuales se describen a continuación.

#### 4.1. Método de BURGSDORF-KOSTENKO

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

$$N_{SF}=N_S * P_1 * P_0 * 10^{-4} \quad (1)$$

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/100km/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:

$$N_S = N_g * \left( \frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad (2)$$

Donde:

$N_g$ : Densidad de descarga a tierra por km<sup>2</sup> al año.

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

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

El calculo de la densidad de descargas a tierra:

$$N_g = 0,04 * TD^{1,25} \quad (3)$$

$$N_g = 0,04 * 100^{1,25} = 12,65 \text{ Descargas/Km}^2/\text{año.}$$

Por lo que  $N_S$  se calcula en la Ec. (2) para b=5,06 m y h=25,15 m como:

$$N_S = N_g * \left( \frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) = 12,65 * \left( \frac{28 * 25,15^{0,6} + 5,06}{10} \right)$$

$$N_S = 251,63 \text{ Descargas/100km/año}$$

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:

$$\text{Log}_{10} P_0 = \theta * \sqrt{h} / 90 - 2 \quad (4)$$

Donde:

h: Altura del conductor de guarda (m).

$\theta$ : Ángulo de protección en Grados entre la vertical y la recta que une la guarda con el conductor, cuyo valor medido en la Fig. 1 es de 35°.

Para el caso de la línea bajo estudio tenemos:

$$\text{Log}_{10} P_0 = 35 * \sqrt{25,15} / 90 - 2$$

$$\text{Log}_{10} P_0 = 35 * \sqrt{25,15} / 90 - 2 = -0,0497$$

$$P_0 = 10^{0,8441} = 0,892 \%$$

La probabilidad  $P_1$ , se refiere a la probabilidad que la corriente del rayo  $I_R$ , exceda un valor determinado, en la Ec. (2) y se define como:

$$P(I_R > I) = \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{I}{I_{first}} \right)^{2,6}} \right) \quad (5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} 2\text{kA} < I < 200\text{kA} \\ I_{\text{first}} &= 31 \text{ kA}, \\ I &\text{ es en kA} \end{aligned}$$

La Ec. (5) 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 10kA, 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 10kA, es decir, el 95% de los rayos que caen, son de una corriente de por lo menos 10kA.

Aquí se origina la necesidad, de determinar el valor de corriente que una vez impactado sobre el conductor, puede originar Flameo, y es llamada Corriente Crítica de Flameo ( $I_c$ ). Este concepto está claramente definido como:

$$I_c = \frac{\text{CFO}}{\frac{Z_{\text{surge}}}{2}} \quad (6)$$

Donde:

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

$Z_{\text{surge}}$ : 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, para nuestro caso en una cadena de 6 aisladores tipo Estándar, ANSI C 29.1 es de 585 kV.

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

$$Z_{\text{surge}} = 60 * \sqrt{\text{Ln} \frac{2h}{R} \text{Ln} \frac{2h}{R_c}} \quad (7)$$

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.

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

$$R_c * \text{Ln} \frac{2h}{R_c} = \frac{V}{E_0} \quad (8)$$

Haciendo las respectivas iteraciones en la Ec. (8) para  $h=21,1$  m,  $V=34,5$  kV y  $E_0=1500$  kV/m se obtiene un valor de  $R_c$  de 0,00235 m

Por lo que, de la Ec. (7):

$$Z_{\text{surge}} = 60 * \sqrt{\text{Ln} \frac{2 * 21,1}{0,00715} \text{Ln} \frac{2 * 21,1}{0,00235}} = 553 \Omega$$

Si no se desea considerar el efecto corona, se puede utilizar una simplificación de la Ec. (7) como:

$$Z_{\text{surge}} = 60 * \text{Ln} \frac{2h}{d} = 60 * \text{Ln} \frac{2 * 21,1}{0,00715} = 521 \Omega$$

Para los efectos de nuestro análisis, utilizaremos el valor de 553  $\Omega$ , por consiguiente de acuerdo a la Ec. (6):

$$I_c = \frac{\text{CFO}}{\frac{Z_{\text{surge}}}{2}} = \frac{585 \text{ kV}}{\frac{553 \Omega}{2}} = 2,12 \text{ kA}$$

Este valor de  $I_c = 2,12$  kA, tiene de la Ec. (5) una probabilidad de 99,9% de que sea superada por un rayo, por consiguiente, prácticamente cualquier rayo que caiga directamente sobre el conductor ocasionará flameo ó Flashover en la cadena de aisladores.

Con los valores obtenidos, procedemos a calcular el número de salidas de la Línea 7L por fallas de apantallamiento según la Ec. (1) como:

$$\begin{aligned} N_{\text{SF}} &= 251,6 \text{ Descargas}/100\text{km}/\text{año} * 99,9 * 0,892 * 10^{-4} \\ &= 2,24 \text{ salidas}/100\text{km}/\text{año} \end{aligned}$$

La tasa de salida para la línea 7L de 34 km de longitud, se calcula como:

$$\begin{aligned} T_s &= N_{\text{SF}} * \text{Longitud de la línea} \\ T_s &= 2,24 \text{ salidas}/100\text{km}/\text{año} * 34\text{km} = 0,76 \text{ salidas}/\text{año}. \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4.2. 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.

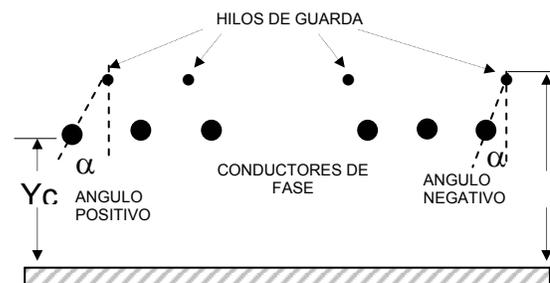


Fig 2. Ángulo de Apantallamiento

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:

$$r_c = 10 * I^{0,65} \tag{10}$$

Donde I es el valor de la corriente del rayo.

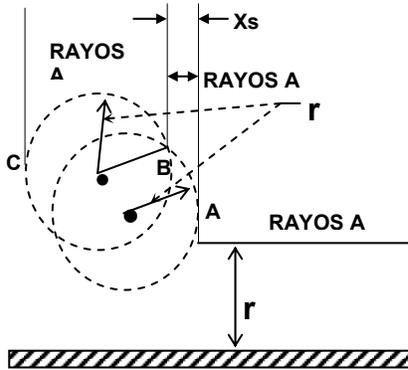


Fig. 3. Modelo electro-geométrico

Ejemplo: Para  $I=10$  kA  $r_c = 10 * 10^{0,65} = 44,67$  m

Para  $I=I_c=2,12$  kA  $r_c = 10 * 2,12^{0,65} = 16,3$  m

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

$$r_g = (3,6 + 1,7 \ln(43 - Y_c)) * I^{0,65} \tag{11}$$

Donde  $Y_c$  es la altura promedio del conductor.

Para nuestro caso con  $Y_c = 21,1$  m e  $I=2,12$  kA:

$$r_g = 8,85 * I^{0,65} = 14,42 \text{ m}$$

Otros autores definen el valor de  $r_g = \beta r_c$ , 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  $r_g > Y_c$

$$X_s = r_c * [\cos \theta + \text{sen}(\alpha - \omega)] \tag{12}$$

$$\theta = \arcsen \frac{r_g - Y_c}{r_c} \tag{13}$$

$$\omega = \arccos \frac{D_{gc}}{2 * r_c} \tag{14}$$

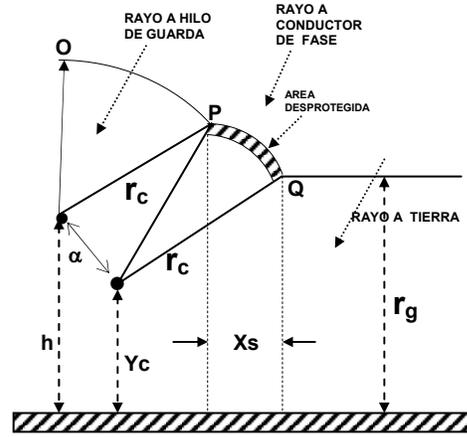


Fig.4. Ventana de Atracción al rayo.

$$\alpha = \arctan \left( \frac{X_c - X_g}{h - Y_c} \right) \tag{15}$$

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).

(Estos parámetros se determinan de la configuración mostrada en la Fig. 1)

Sustituyendo los valores  $Y_c = 21,1$  m,  $D_{gc} = 2,48$  m,  $X_c = 0$  m,  $X_g = 1,42$  m y  $h = 25,15$  m en las ecuaciones (13), (14) y (15) para  $I = 2,12$  kA, obtenemos:

$$\theta = \arcsen \frac{14,42 - 21,1}{16,3} = -24,20^\circ$$

$$\omega = \arccos \frac{2,48}{2 * 16,3} = 85,64^\circ$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{1,42 - 0}{25,15 - 21,1} \right) = 19,32^\circ$$

Si  $r_g < Y_c$  entonces  $\cos \theta = 1$  y la Ec. (12) se convierte en:

$$X_s = r_c * [1 + \text{sen}(\alpha - \omega)] \tag{16}$$

Sustituyendo en la Ec. (16):

$$X_s = 16,3 * [1 + \text{sen}(19,32 - 85,64)] = 1,37 \text{ m}$$

El valor de  $X_s$  máximo se obtiene para el caso de que  $r_g = Y_c$  ( $r_g =$  altura del conductor, en nuestro caso ocurre

para  $r_g=Y_c=21,1$  m, sustituyendo este valor en la ecuaciones (11) ó (15) obtenemos  $X_{s_{MAX}} = 1,93$  m.

A medida que la corriente del rayo aumenta, se debe obtener el valor de corriente para la cual la ventana de atracción es cero ( $X_s=0$ ), haciendo cálculos iterativos se obtiene que esta corriente es por el orden de los 8,5 kA. Anderson (1975) describe un método gráfico para obtener esta corriente máxima, la cual utiliza una pendiente  $m$  como:

$$m = \tan \alpha = \tan 19,32^\circ = 0,35. \quad (17)$$

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 1,7 el cual se multiplica por un valor de  $Y_o = (Y_g + Y_c)/2 = 23,13$  m, obteniéndose el valor de  $S_{MAX} = 1,7 * 23,13 = 39,32$  m. El valor de  $I_{MAX}$  se obtiene de:

$$I_{MAX} = 0,029 * S_{MAX}^{1,54} = 8,4 \text{ kA}. \quad (18)$$

El número de Salidas/100km/año de la línea viene dado según Anderson (1975) como:

$$N_{SF} = N_g * X_{S_{MAX}} / 2 * (P_{min} - P_{max}) \quad (19)$$

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

$$I_{min} \text{ (de 2,12 kA) } = 0,999$$

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

$$I_{max} \text{ (de 8,4 kA) } = 0,967$$

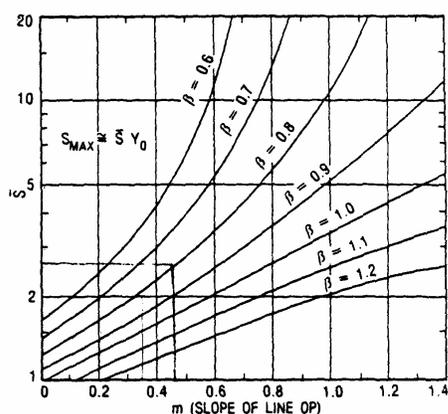


Fig. 5. Factor para fallas Sp.

Sustituyendo los valores  $N_g=12,65$  descargas/km<sup>2</sup>/año,  $X_{S_{MAX}} = 1,93$ ,  $P_{min} = 0,999$  y  $P_{max}=0,967$  en (19), obtenemos:

$$N_{SF} = 12,65 * 1,93 / 2 * (0,999 - 0,967)$$

$$N_{SF} = 0,39 \text{ salidas/100km/año.}$$

Según Anderson (1975), este valor de  $N_{SF}$  es para un solo hilo de guarda y un conductor, si existen mas conductores de fase expuestos o más hilo de guarda, se deben calcular separadamente la contribución de  $N_{SF}$  para cada caso y sumarla al final.

En el caso bajo estudio, existen dos hilos de guarda y dos conductores expuestos, lo que equivale a decir que, el valor total de fallas de apantallamiento viene dado por el doble al valor obtenido:

$$N_{SF \text{ total}} = 2 * 0,39 = 0,78 \text{ salidas/100km/año.}$$

Para la línea Bajo estudio de la Ec. (9):

$$T_s = 0,78 \text{ salidas/100km/año} * 34 \text{ km} = 0,27 \text{ salidas/año.}$$

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

En la segunda referencia 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  $N_{SF}=0,05$  Salidas/100km/año (Considerado Aceptable) como se muestra en la Fig. 6.

Para Línea 7L, con una altura del hilo de guarda de  $h = 25,1$  m y  $N_g = 12,65$  Descargas/km<sup>2</sup>/año y una corriente de rayo entre 10-15 kA tenemos que el ángulo de apantallamiento debe ser de aproximadamente 23°, para obtener un  $N_{SF}$  de 0,05 Salidas/100km/año.

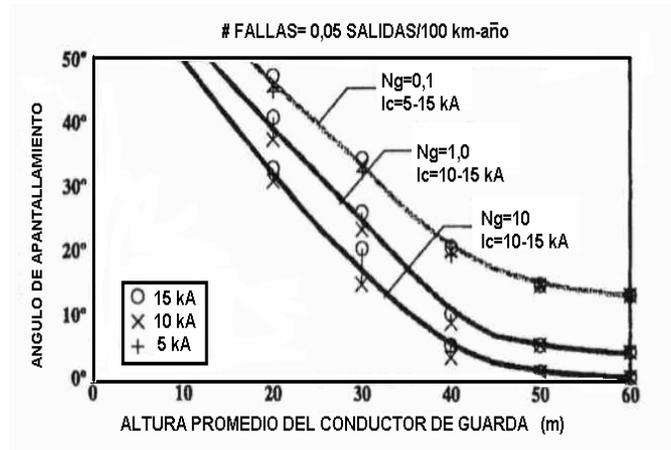


Fig. 6. Método gráfico para determinar falla de apantallamiento

5 Consideraciones Adicionales

5.1. Angulo efectivo de apantallamiento

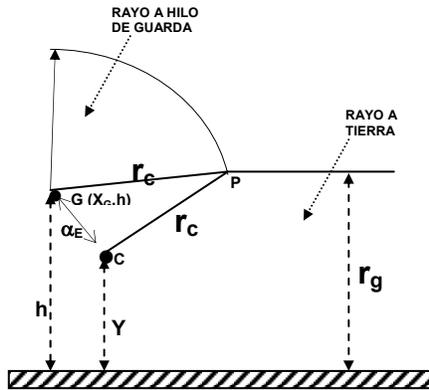


Fig. 7. Angulo efectivo de apantallamiento

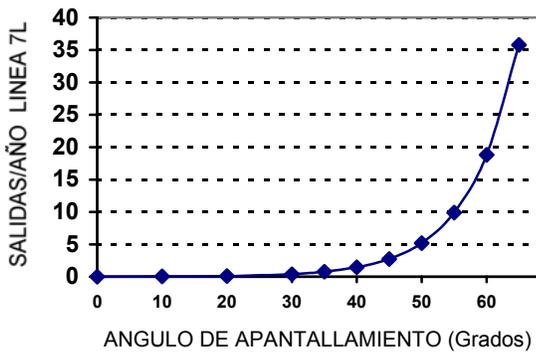


Fig. 8. Salida al año Vs. Angulo de apantallamiento. Para Línea 7L

En el caso de que en un diseño se desee modificar la coordenada del hilo de guarda para que se produzca un efectivo apantallamiento como el mostrado en la Fig. 6. para cualquier corriente de rayo, se puede determinar el valor del ángulo de apantallamiento  $\alpha_E$  que hace que esta distancia PQ o ventana de atracción sea cero. Esto se logra según se explica en la tercera referencia, llevando la coordenada X del conductor a cero (se toma como referencia),  $X_G$  es la coordenada del hilo de guarda,  $Y_C$  es la altura promedio del conductor y h es la altura del hilo de guarda, se obtiene entonces:

$$X_G = \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_C)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad (20)$$

Siendo el ángulo efectivo de apantallamiento  $\alpha_E$  como:

$$\alpha_E = \arctan\left(\frac{X_G}{Y_C - h}\right) \quad (21)$$

Para el caso de Línea 7L, con una corriente del rayo de

$I_{min}=2,12kA$ ,  $r_c=16,3m$  y  $r_g=14,42m$ ,  $Y_c=21,1m$  y  $Y_G=25,15m$  obtenemos mediante las ecuaciones (20) y (21):

$$X_G = \sqrt{16,3^2 - (14,42 - 21,1)^2} - \sqrt{16,3^2 - (14,42 - 25,15)^2}$$

$$X_G = 14,86 m - 12,27 m = 2,59 m$$

$$\alpha_E = \arctan\left(\frac{2,59}{21,1 - 25,15}\right) = -32^\circ$$

Quiere decir que para que no incida los rayos directamente en el conductor en Línea 7L, y para una corriente de rayo de 2,12 kA el ángulo de protección debe ser negativo. En este caso cualquier rayo menor a 2,12 kA puede caer en el conductor, pero sin riesgo que produzca Flameo en la cadena de aisladores, y cualquier rayo mayor de 2,12 kA caerá en el hilo de guarda ó a tierra, puesto que la ventana de atracción se ha llevado a cero.

En medidas experimentales, se ha determinado que la primera descarga de un rayo tiene un valor pico de 31kA, con el 95% de probabilidad de que la magnitud de corriente sea entre 10 y 100 kA. lo que implica que para los efectos de ventana de atracción del rayo en línea 7L, todos caerían en el hilo de guarda ó a tierra, debido a que los rayos que pueden entrar al conductor deben tener el rango de corriente de 2,12 kA a 8,4 kA, con los correspondientes ángulos de apantallamiento efectivo comprendidos entre  $-32^\circ$  y  $18^\circ$ .

5.2. Angulo crítico de apantallamiento.

Es importante conocer como varía la tasa forzada de salida por apantallamiento, a medida que el ángulo de protección aumenta, encontrándose un valor del ángulo de apantallamiento en el cual la tasa de salida comienza a aumentar considerablemente, en la gráfica de la Fig. 8 se observa este comportamiento.

Obsérvese que para ángulos de apantallamiento menores a  $40^\circ$ , la tasa de salida es baja (menor que 2 salidas/100km/año).

5.3. Factor de apantallamiento (FA)

Existe un elemento que se debe considerar cuando se evalúa el apantallamiento de una línea de transmisión o distribución, que es el denominado Factor de Apantallamiento (FA), y se refiere al apantallamiento natural que ofrecen las estructuras, edificios, árboles, etc, sobre la línea eléctrica en cuestión contra descargas atmosféricas directas. Referencia quinta.

Este concepto se aplica sobre todo a las líneas de distribución, debido a la característica propia de su ruta en ciudades y regiones con vegetación relativamente alta, pero

debe ser considerado también para los efectos en las Líneas de Transmisión.

Se debe hallar entonces de la Fig. 9, el factor de apantallamiento respectivo en función de la altura del objeto y distancia entre el objeto y la línea eléctrica.

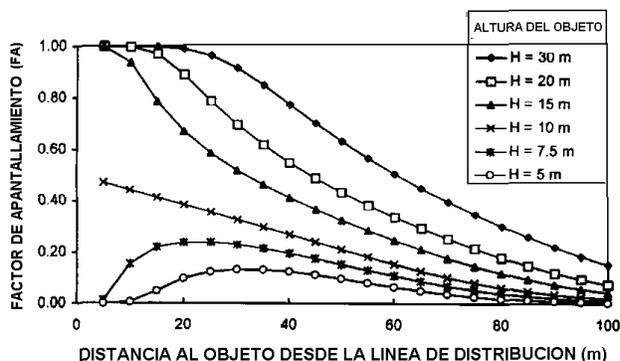


Fig. 9. Factor de Apantallamiento.

Una vez obtenido el factor de apantallamiento FA, se usa la Ec. (22) que determina el número de salidas/100km/año tomando en consideración el apantallamiento natural que ofrecen los objetos cercanos a la línea bajo estudio:

$$N_{SF}^* = N_{SF} \cdot (1 - FA) \quad (22)$$

Donde  $N_{SF}$  es el número de salidas por falla de apantallamiento, calculado por los tres métodos anteriormente.

Obsérvese que para una línea a campo abierto como el Lago de Maracaibo (Distancia > 100 m), posee un FA=0, lo que implica que todas las descargas caerán sobre la línea. Esta consideración se tomó para el caso de línea 7L, en la cual, existen algunas estructuras de perforación de altura considerable a distancia promedio de 100 m entre dicha estructura y la línea eléctrica, en el Lago de Maracaibo.

## 6 Conclusiones

Los tres métodos expuestos, tienen resultados comparables, por lo que pueden ser usados para evaluar el apantallamiento de cualquier línea aérea.

Los resultados demuestran que la tasa forzada de salida por falla de apantallamiento para línea 7L es baja, por lo que el problema asociado a descargas atmosféricas es debido al fenómeno de descargas retroactivas.

Con la configuración actual de la línea para ángulos de apantallamiento medidos de 35°, las salidas forzadas por descargas directas sobre conductor son mínimas (menor a 1 falla/año).

La línea 7L no posee apantallamiento natural por estar sobre el lago de Maracaibo, por lo que el 100% de las descargas atmosféricas en la zona caerán en los hilos de guarda de estos circuitos, aquí radica la importancia de un buen camino a tierra para la descarga.

La corriente del rayo que puede ocasionar Flameo en la cadena de aisladores por descargas directas en Línea 7L está en el rango de 2,12 kA a 8,4 kA.

Para ángulos de apantallamiento mayores a 40°, las salidas del circuito comienzan a tener valores considerables, llegando a tener hasta 20 salidas al año para ángulos de 60°.

Si se desea eliminar por completo la ventana de atracción al rayo, se debe mover el conductor de guarda hacia el exterior a fin de conseguir un ángulo de protección negativo de -32°.

## 7 Recomendaciones

Usar cualquiera de los tres métodos para evaluar la efectividad del apantallamiento del hilo de guarda ante descargas atmosféricas en líneas aéreas.

Realizar inspecciones detalladas a la Línea 7L, a fin de determinar si existen torres que permitan un ángulo de apantallamiento superior a 40°, y realizar la respectiva corrección, bien sea instalando o desplazando el hilo de guarda.

Garantizar una efectiva puesta a tierra de cada torre con el objeto de proveer un buen camino de conducción de la corriente del rayo a tierra y descartar salidas forzadas por descargas retroactivas (conexiones flojas, hurtos de conductor de tierra, etc.)

## 8 Bibliografía

- Anderson, J.G. 1975. Electric Power Research Institute. "Transmission Line Reference Book: 345 kV and above". Chapter 12.
- IEEE. STD. 1243. 1997. "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines".
- IEEE. "Critical Issues in Distribution System Surge Protection". TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 24. No. 2. March-April.
- IEEE. STD. 1410. 1997. "Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines".
- Siegert, Luis. 1996. Alta tensión y Sistemas de Transmisión. Noriega Editores. Pag: 872-877.