

DISEÑO ÓPTIMO DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTO VOLTAJE Y EXTRA ALTO VOLTAJE

Salazar Flores Paúl Francisco

M.A.S.L. Construcciones
falazar77@hotmail.com

Resumen- Este estudio busca proporcionar al lector una metodología de cálculo para el diseño del apantallamiento por hilo de guarda en redes eléctricas de distribución y transmisión de energía en base a fallas del apantallamiento y con la ayuda del software computacional D.A.L.T... Además de ofrecer una metodología de cálculo que se adapte a las características climáticas Ecuatorianas y que permita evaluar el verdadero grado de protección proporcionado por el hilo de guarda.

Este estudio está dividido en dos grandes partes:

La primera parte trata del apantallamiento de circuitos de distribución, se parte de la premisa de que este tipo de circuitos no cuentan con una estructura tipo que incluya un hilo de guarda por lo que se diseñan diferentes tipos de estructuras que no afecten mayormente a la geometría del circuito y se propone un tipo de estructura que considera al hilo de guarda en una configuración totalmente nueva.

La segunda parte trata del apantallamiento de líneas de transmisión, en esta parte se evalúa el grado de efectividad de las líneas de transmisión utilizadas por CELEC EP -Transelectric, en función de los requerimientos necesarios para la construcción de una nueva línea de transmisión (Pifo – Yaguachi).

Palabras clave- Diseño de apantallamiento, circuitos de distribución, líneas de transmisión.

I. INTRODUCCIÓN

ESTE estudio busca determinar la posición y la altura óptima del hilo de guarda para la protección de redes eléctricas contra descargas atmosféricas (rayos). En base a una nueva metodología que analiza las fallas del apantallamiento en forma global (produzca o no una salida de operación de la red eléctrica) y en un lapso de tiempo, lo cual constituye una metodología más completa y efectiva que si se analizara el apantallamiento solamente por el número de salidas del circuito eléctrico.

En base a la ventana expuesta (ventana de falla) del modelo electrogeométrico y los datos que proporciona el simulador de descargas atmosféricas D.A.L.T. se logra obtener un

apantallamiento efectivo gracias a la variación gradual de la altura del hilo de guarda.

Se hace el análisis del primario C de la subestación Sangolquí¹ y se proponen diferentes estructuras que incluyen hilo de guarda para su protección contra descargas atmosféricas (rayos), analizadas en base a la metodología de la norma IEEE std. 1410 – 2004.

Por otra parte se analiza (en base a la metodología de la norma IEEE std. 1243 – 1997) si las estructuras utilizadas por CELEC EP -Transelectric en la línea de transmisión Pifo - Coca Codo Sinclair (500kV), pueden ser utilizadas (desde el punto de vista del apantallamiento) en la futura línea a construir de 500 kV, Pifo – Yaguachi.

II. DATOS DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS

La longitud total del primario C de la subestación Sangolquí es de aproximadamente 36.64 km (sumando todas las ramificaciones existentes). Las estructuras mayormente utilizadas son estructuras centradas (RVA1 según la normalización de la Empresa Eléctrica Quito), están soportadas en postes de hormigón de 11.5 m, enterrados a 1.75 m del suelo aproximadamente con una cruceta centrada de 1.5 - 2 m de longitud. Cada una de las tres fases de los extremos esta soportada sobre un aislador tipo espiga, mientras que la fase del centro está soportada por un perno espiga tope de poste.

Este es un primario de tipo industrial que maneja un voltaje de 22.8 kV y un nivel cerámico de 30, de gran importancia para el sector productivo de la zona.

Para la modelación y los posteriores cálculos el primario se ha considerado como un circuito sin ramificaciones de la longitud antes mencionada. A continuación se muestran las estructuras que ofrecen mejores resultados para la protección de este primario contra descargas atmosféricas (rayos).

A. Estructura “Normal” para primarios de distribución

Esta estructura plantea no realizar ningún cambio en la configuración de los conductores de fase del primario C, más si la adición de una nueva fase debajo de cualquier fase de los extremos para “cambiar de roles” ya que la fase de la mitad al

¹ Perteneciente a la E.E. – Quito, Ecuador

estar en la parte más alta vendría a ser el hilo de guarda y la nueva fase intermedia vendría a ser la nueva fase colocada. Las fases están colocadas sobre una cruceta de 1.5m que a su vez esta soportada por un poste de 11.5m.

B. Estructura “Árbol” para primarios de distribución

Esta estructura está pensada especialmente para posibles prolongaciones del primario o en su defecto para la construcción de un nuevo primario ya que pretende una arquitectura en “árbol” en donde el cable de guarda está en la punta del poste, la fase intermedia está en una cruceta de 0.40 m por debajo del hilo de guarda y las dos fases restantes están en una cruceta de 2 m, una en cada extremo.

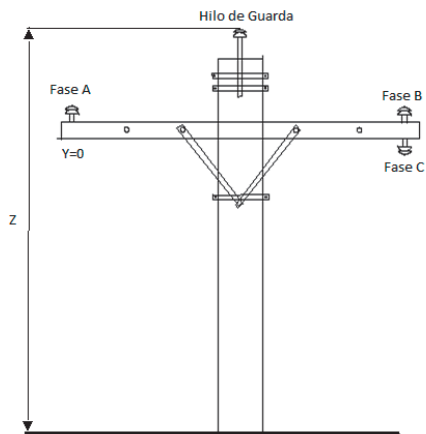


Fig. 1 Estructura “Normal”

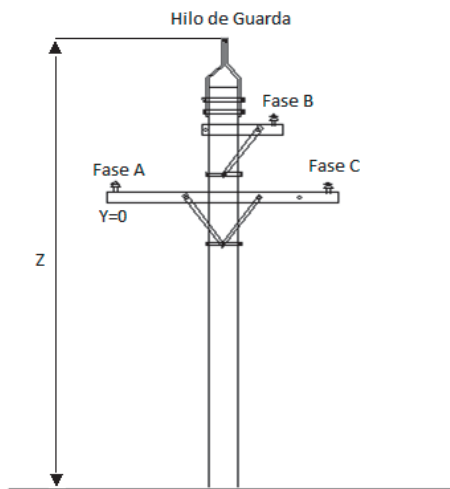


Fig. 2 Estructura “Árbol”

C. Línea de transmisión

La longitud total de la línea de transmisión es de aproximadamente 300 km y estaría conformada por un circuito con cuatro conductores en haz de conductor ACAR 750 Kcmil de 18 hilos de aluminio y 19 de aleación de aluminio (cableado concéntricamente) para uso como conductor aéreo en líneas de transmisión

Para la modelación y los posteriores cálculos de la línea de transmisión, se la dividió en dos grandes zonas denominadas “zona Sierra” y “zona Costa” y estas a su vez están subdividas en tramos más pequeños (5 tramos para la Zona Sierra y 6 en la Zona Costa) en función de los diferentes niveles cerámicos presentes en el recorrido, para finalmente analizarlos en conjunto. A continuación se muestran los tipos de estructuras utilizadas.

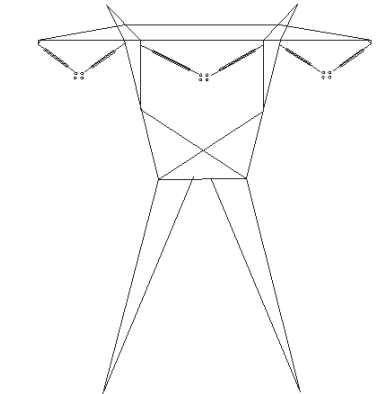


Fig. 3 Estructura “Zona Sierra”

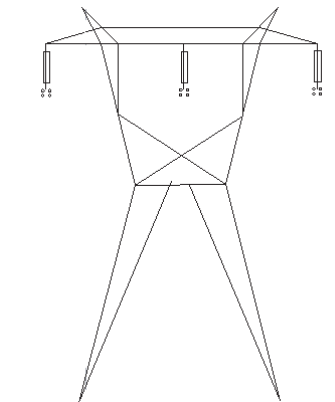


Fig. 4 Estructura “Zona Costa”

III. METODOLOGIA DE CÁLCULO

En esta sección se presenta la metodología de cálculo de los parámetros necesarios para el diseño del apantallamiento tanto para redes de distribución como para líneas de transmisión de energía.

A. Impedancia del conductor ante el frente de onda atmosférico

Para determinar Z_c (Ω) se utiliza la expresión [3].

$$Z_c = 60 * \ln \frac{2*yc}{re} \tag{1}$$

En las ecuaciones:

yc = “altura promedio de pantalla de cables” sobre el piso y se calcula según el tipo de terreno por el que pasa la red eléctrica.

$$yc = h - \frac{2}{3}fc \quad (2) \quad \text{Para terreno plano [1]}$$

$$yc = h \quad (3) \quad \text{Para terreno ondulado [1]}$$

$$yc = 2 * h \quad (4) \quad \text{Para terreno montañoso [1]}$$

En las ecuaciones:

h = Altura de los conductores de fase en la torre (m)

fc = flecha del conductor (m)

Un valor necesario para el cálculo es el radio equivalente del haz de conductores de fase o radio medio geométrico (re). Para un solo conductor de fase se usa re=6cm (según referencia [3]) para tomar en cuenta la atenuación por efecto corona.

$$re = Rh \sqrt[n]{n * \frac{rs}{Rh}} \quad (5)$$

En la ecuación:

n= Número de subconductores de fase.

rs= Radio de un subconductor (m).

Rh= Radio del haz de conductores de fase que se calcula con la expresión:

$$Rh = \frac{s}{2 * \text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (6)$$

En la ecuación:

s= Separación entre el haz de subconductores de fase (m).

Para el caso de análisis se utilizara s=45.7cm que es la dimensión de los espaciadores del haz de conductores.

B. Corriente crítica de arqueo del rayo

Para que exista una salida de operación de la línea de transmisión, la corriente de la descarga atmosférica (rayo), debe ser superior a la que produce la ruptura dieléctrica del aislamiento o cebado inverso (flameo) del arreglo apoyo – conductor. Es decir que solo los rayos de intensidad superior a un cierto valor crítico (Ic) darán lugar a un flameo si caen sobre el conductor de fase. Esta corriente es calculada por la expresión [1]:

$$Ic = \frac{2 * Vco\%}{Zc} \quad (7)$$

$$Vco\% = V50\% - 2.5\sigma_c = 0.9 V50\% \quad (8)$$

En las ecuaciones:

Ic= Corriente crítica de rayo que produce flameo (kA).

V50%= Tensión crítica de flameo (CFO) (kV).

σ_c = Desviación estándar respecto a V50% con valor de 0.03 para impulso por rayo.

C. Voltaje Crítico de Flameo (CFO)(V50%)

La caída de un rayo sobre un hilo de guarda, fase o torre, produce una elevación de voltaje en las mismas a causa de la resistencia no nula de la toma de tierra de las estructuras [1]. Si la magnitud de voltaje es lo suficientemente baja, el aislador no presenta un cebado inverso, pero si la magnitud de voltaje de impulso aumenta gradualmente, existe un nivel de voltaje en que los aisladores flamean el 50% (V50%) de las pruebas este voltaje es conocido como voltaje crítico de flameo (CFO).

La expresión matemática que describe la tensión crítica de flameo (V50%) y que relaciona el nivel básico de aislamiento (BIL) es la siguiente [1]:

$$V50\% = \frac{BIL}{0.961} \quad (9)$$

En la ecuación:

BIL= Nivel básico de aislamiento de impulso

0,961= viene de evaluar la ecuación del Bil para k=1,3 para una tensión tolerada o soportada (Vw) de 9% de probabilidad de falla y $\sigma=0,03$ para impulso por rayo [1].

Para el diseño es necesario utilizar la tensión crítica de flameo corregida por altitud, presión, temperatura y humedad para lo cual se relaciona el V50% diseño con el factor de densidad del aire de acuerdo con la altitud y temperatura (δ).

$$\delta = \frac{3.93 * b}{273 + T^{\circ}C} \quad (10)$$

En la ecuación:

b= Presión barométrica (cmHg).

T°C= Temperatura en grados centígrados.

Por lo tanto la expresión de voltaje (V50%diseño) corregida por los factores antes mencionados se presenta de la siguiente manera:

$$V50\% = \frac{V50\%nominal * Kh}{\delta^n} \quad (11)$$

$$V50\% = \frac{\frac{NBI}{0.961} * Kh}{\delta^n} \quad (12)$$

En las ecuaciones:

V50% diseño= Tensión crítica de flameo para diseño (kV).

Kh= Factor de humedad atmosférica con valor igual a uno.

n= Constante de rayo con valores de 0.8 a 1; la cual n=1 para impulsos por rayo.

D. Cálculo del Ángulo de Apantallamiento

El ángulo de apantallamiento está definido como el formado entre la recta del hilo de guarda y tierra con la recta entre el hilo de guarda y el conductor de fase, el cual puede ser positivo o negativo dependiendo de la disposición de los elementos antes mencionados y del nivel de seguridad de la

red eléctrica, según norma la IEEE std. 1243 se establece que el ángulo de apantallamiento debe ser máximo de 30° para líneas de transmisión mientras que la norma IEEE std. 1410 establece que el ángulo de apantallamiento debe ser menos de 45 ° para redes de distribución. Cabe recalcar que mientras más pequeño sea este va a proporcionar una protección mayor a los conductores de fase.

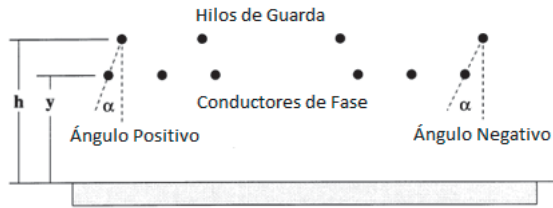


Fig. 5 Ángulo de apantallamiento

E. Modelo Electrogeométrico

Cuando el líder se aproxima hacia tierra, llega a un punto en donde puede ser atraído por el hilo de guarda, los conductores de fase o la tierra. Cuando este punto es alcanzado, el líder da el salto final hacia uno de los puntos antes mencionados y produce una descarga. El modelo electrogeométrico representa este concepto (Fig.6) mediante distancias críticas de arqueo hacia tierra y hacia los conductores.

En la figura 6 la superficie CB constituye una superficie de atracción del rayo originada por el hilo de guarda, la superficie BA está originada por el conductor de fase (protegido) y a la izquierda de C y la derecha de A se encuentra las superficies de atracción originadas por la tierra. La superficie horizontal bajo el arco BA se le denomina “Ventana de Falla”.

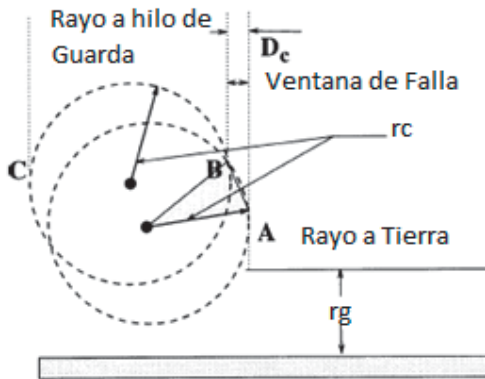


Fig. 6 Ventana de falla

Los gradientes de campo eléctrico alrededor de los conductores de guarda y de los de fase son mayores que los que presenta la tierra, dando como resultado que la distancia de arqueo a los conductores (representada por círculos concéntricos de radio rc centrados en el conductor de fase y en el hilo de guarda) sean usualmente consideradas mayores que la distancia de arqueo a tierra (rg).

Ahora dependiendo de la corriente que presente la descarga atmosférica (Rayo), este puede caer en una fase si está entre A

y B, en el hilo de guarda si está entre B y C o en su defecto en la tierra si no se encuentra en los tramos antes mencionados. Si todas las descargas fueran consideradas como verticales (en línea recta) la ventana de falla del apantallamiento estaría representada por Dc.

Según la norma IEEE std. 1243 y la norma IEEE std. 1410 se establecen dos ecuaciones para el cálculo de estas distancias, que son las siguientes:

$$rc = 10 * I^{0.65} \tag{13}$$

$$rg = (3,6 + 1,7 \ln(43 - yc)) * I^{0.65} \quad \text{si } yc < 40\text{m} \tag{14}$$

$$rg = 5.5 * I^{0.65} \quad \text{si } yc \geq 40\text{m} \tag{15}$$

En las ecuaciones:

rc= Distancia crítica (m).

rg= Distancia crítica a tierra (m).

yc= Altura promedio de pantalla de cables (m).

I: Corriente crítica de arqueo (kA).

F. Modelo Electrogeométrico

El modelo electrogeométrico se basa en parámetros geométricos para disposición de los conductores de guarda y las fases a fin de poder determinar la ventana de atracción del rayo (ventana de falla), que es el área desprotegida que queda entre la distancia que puede atraer descargas atmosféricas (rayos) el hilo de guarda y la distancia que puede atraer descargas atmosféricas (rayos) la tierra. Todas las descargas atmosféricas (rayos) que incidan en esta área desprotegida serán atraídas por las fases (Falla del apantallamiento) y podrían provocar una salida de operación de la red eléctrica.

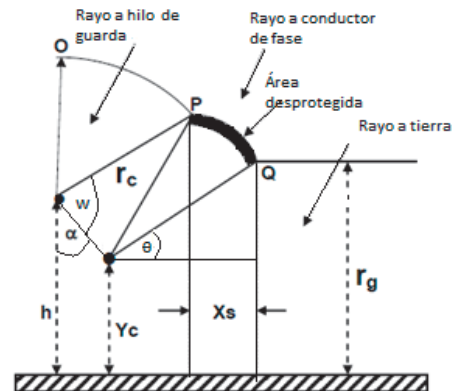


Fig.7 Modelo electrogeométrico

El desarrollo del modelo electrogeométrico propone las siguientes ecuaciones:

$$Xs = rc * (\cos\theta + \text{sen}(\alpha - \omega)) \tag{16}$$

Para lo cual:

$$\theta = \arcsen \frac{rg - yc}{rc} \tag{17}$$

$$\omega = \arccos \frac{dcg}{2 * rc} \tag{18}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{xc - xg}{h - yc}\right) \quad (19)$$

En las ecuaciones:

- yc= Altura promedio de pantalla de cables (m).
- dcg= Distancia entre el hilo de guarda y el conductor (m).
- xc= Coordenada del conductor en el plano x (m).
- xg= Coordenada del conductor en el plano Y (m).
- h= Coordenada del hilo de guarda en el plano Y (m).
- Xs= Área desprotegida (m).

Para la línea de transmisión Pifo – Yaguachi en la Zona Sierra esta ventana de falla fue en promedio de 1 m, mientras que para la Zona Costa fue en promedio de 1.7m. En el primario C de la EEQ esta ventana de falla es en promedio de 2 m para la estructura normal, mientras que para la estructura en árbol fue de 1 m.

IV. SOFTWARE D.A.L.T. [5]

El programa D.A.L.T es un software que fue creado para el diseño y verificación del apantallamiento de líneas de transmisión, pero que puede ser utilizado para el diseño y verificación del apantallamiento de redes de distribución. Para esto el programa presenta los resultados tabulados de descargas atmosféricas (rayos) interceptados por el (los) hilo(s) de guarda y los resultados tabulados de las descargas atmosféricas (rayos) que podrían causar una falla del apantallamiento. Además presenta los resultados por punto de falla para conocer el lugar en donde se produjo la descarga y complementa esos resultados con una modelación grafica del circuito analizado.

El software está creado para que el análisis sea realizado mediante el modelo electrométrico y solamente para descargas atmosféricas (rayos) verticales, pero es decisión del usuario escoger la ecuación de la distancia crítica de arqueo y la curva de densidad de probabilidad de corriente del rayo que más le convenga según los requerimientos, para este caso de estudio se escogió la ecuación de la distancia crítica de arqueo desarrollada por IEEE y la curva de densidad de probabilidad de corriente del rayo desarrollada por Cigré, además es necesario especificar una distancia de seguridad para la modelación en el software, es un parámetro fundamental en la simulación ya que el objetivo es colocar el hilo de guarda a una altura tal que el número de fallas del apantallamiento sea mínimo. Esta distancia de seguridad no es la misma para todos los circuitos de transmisión de energía eléctrica, ya que debe ser proporcional a la ventana expuesta del apantallamiento.

V. INFLUENCIA DEL PERIODO DE PROTECCIÓN SOBRE LA DISTANCIA DE SEGURIDAD

La distancia de seguridad representa una distancia adicional desde las fases exteriores más expuestas y de una longitud

determinada por el usuario. Con el fin de que todas las descargas que caigan en esta zona sean consideradas como fallas del apantallamiento y se pueda tener una medida relativa de descargas atmosféricas (rayos) que pudieran caer en forma horizontal (inclinada).

Es necesario realizar un análisis comparativo para determinar la distancia de seguridad óptima, con la cual los resultados presenten el menor grado de error, para eso es necesario el periodo de protección del circuito eléctrico (tiempo que se encuentra protegido el circuito eléctrico para que ocurra una falla).

De las figuras 8 y 9 se puede observar que:

Para una distancia de seguridad de 0m a cualquier altura a la que se coloque el hilo de guarda se tiene periodos de protección altos. Ahora se debe tener en cuenta que se simulan rayos verticales, por lo que un área de seguridad de 0 m no considera los rayos que pudieran caer de forma inclinada y al no poder simular todos los rayos que pudieran ocasionar una falla es necesario tener un área de seguridad mínima que para disminuir el error producido. También nótese que un área de seguridad de 0 m significaría una protección sólo de la base del elemento protector, lo cual no tendría efectos prácticos.

Para una distancia de seguridad de 1m el periodo de protección es muy elevado (de cientos o miles de años) y podría pensarse que esta medida es equivocada o difícil de alcanzar, debe considerarse que las estructuras de distribución son “pequeñas” no de las dimensiones de una línea de transmisión y al considerar una distancia de seguridad de 1m se está tomando un área de falla de casi el doble del ancho de la estructura (considerando una cruceta 1.50m) a cada extremo de la misma, por lo que la cantidad de rayos interceptados y de falla podría ser la adecuada.

Por lo dicho anteriormente, una distancia de seguridad de 2m podría parecer excesiva ya que se está considerando un ancho mucho más grande que el de la estructura y podría pensarse en un principio que se están considerando demasiadas descargas que podrían producir fallas pero debe recordarse que el software es probabilístico y que no se está simulando toda la gama de rayos que pudieran producir una falla por lo que al considerar un área mayor estamos compensando (de alguna manera) este número de descargas no simuladas con otras de diferente magnitud de corriente.

Para distancias de 3m y 4m se puede ver que el periodo de protección es bajo, esto se debe a que se están considerando muchas descargas aledañas que caen a tierra dentro del área definida como protegida, pero que excede la de la instalación, por lo cual los resultados no reproducen la realidad.

Un aspecto fundamental para conocer la correcta distancia de seguridad a utilizar es la ventana expuesta al rayo ya que el objetivo de un buen apantallamiento es que esta ventana sea la menor posible y la distancia de seguridad debe ser parecida a esta ventana a fin de considerar todas las descargas que podrían perforar el apantallamiento y producir una falla.

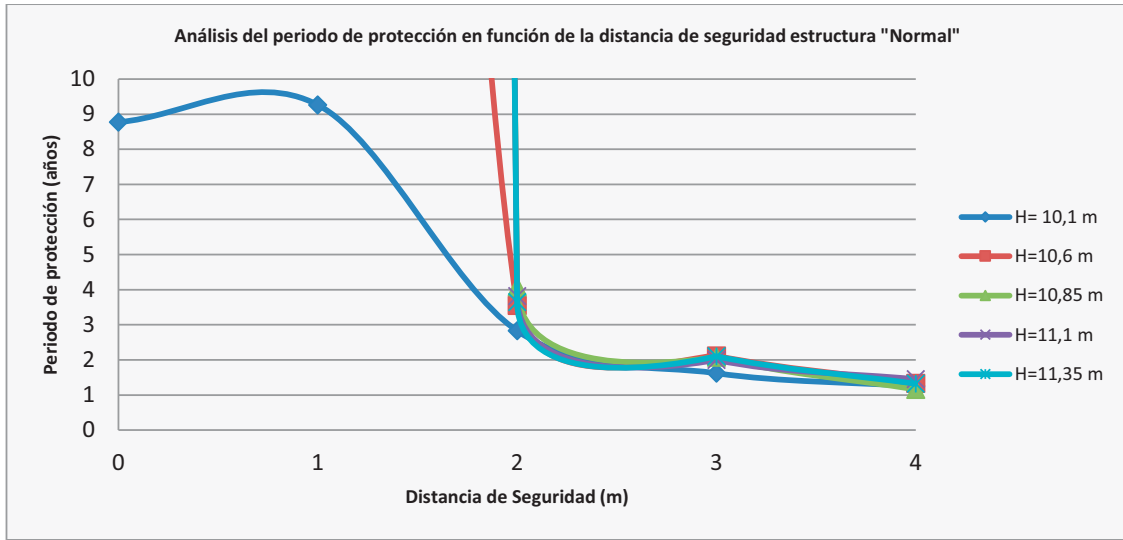


Fig.8 Análisis del periodo de protección en función de la distancia de seguridad estructura "Normal"

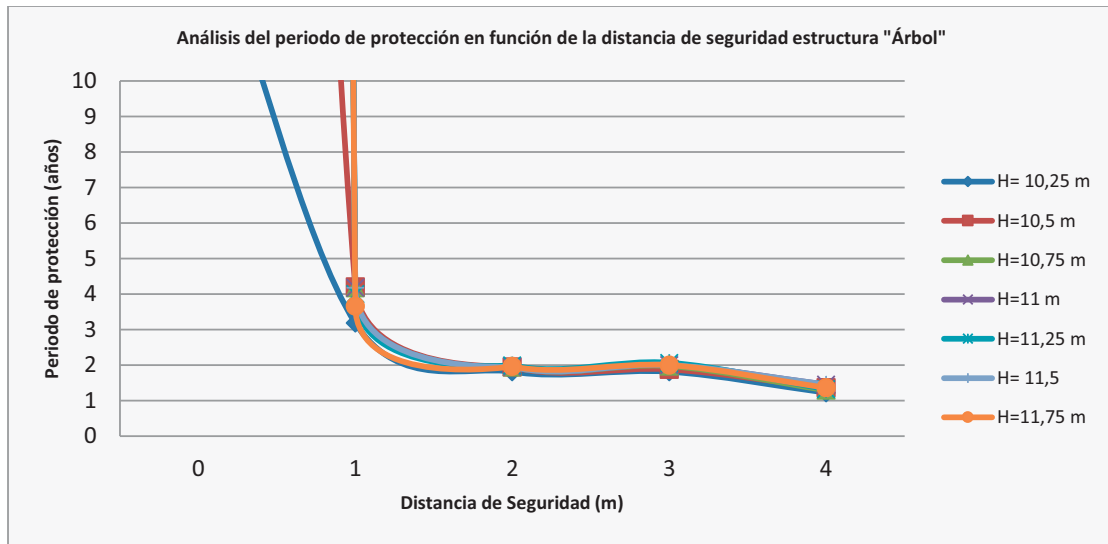


Fig.9 Análisis del periodo de protección en función de la distancia de seguridad estructura "Árbol"

Para el análisis de una línea de transmisión el procedimiento es el mismo que el descrito anteriormente, con la diferencia que debe realizarse para cada tramo en que se haya dividido la línea de transmisión debido a las diferentes estructuras y alturas del hilo de guarda para después analizarlas en forma unificada en función del número de salidas.

VI. RESULTADOS

Mediante las simulaciones en el software D.A.L.T., tomando en cuenta las ventanas de falla mencionadas anteriormente y según el ángulo de apantallamiento se obtuvieron los resultados presentados en las tablas siguientes.

TABLA I
RESULTADOS ESTRUCTURA "ÁRBOL"

Estructura	Altura Hilo Guarda (m)	Ángulo de apantallamiento (°)	Distancia de seguridad (m)	número de fallas/100k m/año
Árbol	10.25	28.3	1	0.86
	10.5	21.3	1	0.65
	10.75	16.9	1	0.65
	11	14.0	1	0.65
	11.25	12.0	1	0.68
	11.5	10.4	1	0.65
	11.75	9.2	1	0.75

TABLA II
RESULTADOS ESTRUCTURA “NORMAL”

Estructura	Altura Hilo Guarda (m)	Ángulo de apantallamiento (°)	Distancia de seguridad (m)	número de fallas/100k m/año
Normal	10.1	60.25	2	0.96
	10.6	37.87	2	0.77
	10.85	31.33	2	0.67
	11.1	26.56	2	0.72
	11.35	22.99	2	0.75

TABLA III
RESULTADOS POR TRAMOS LÍNEA DE TRANSMISIÓN PIFO - YAGUACHI

	Tramos	Alturas hilos de guarda (m)	Distancia de seguridad (m)	número de fallas totales/328k m/año
Zona Sierra	1, 2, 3, 4, 5	30.2	0	0.10
			1	0.47
			2	0.74
Zona Costa	1, 2, 3, 4, 5, 6	30.5	3	2.69
			4	2.95
Zona Sierra	1, 2, 3, 4, 5	30.7	0	0.12
			1	0.21
			2	0.77
Zona Costa	1, 2, 3, 4, 5, 6	31	3	2.67
			4	2.94
Zona Sierra	1, 2, 3, 4, 5	31.2	0	0.08
			1	0.41
			2	0.70
Zona Costa	1, 2, 3, 4, 5, 6	31.5	3	2.73
			4	2.90
Zona Sierra	1, 2, 3, 4, 5	31.7	0	0.04
			1	0.34
			2	0.65
Zona Costa	1, 2, 3, 4, 5, 6	32.1	3	2.63
			4	2.90
Zona Sierra	1, 2, 3, 4, 5	32.2	0	0.04
			1	0.30
			2	0.67
Zona Costa	1, 2, 3, 4, 5, 6	32.1	3	2.63
			4	2.94

I. CONCLUSIONES

De lo analizado para el primario C la mejor opción de apantallamiento la presenta la estructura Normal con una altura del hilo de guarda de 11,1 m sobre el piso. Por presentar

el menor número de fallas/100km/año y además no modifican mayormente a la estructura original.

La mejor opción de apantallamiento para posibles prolongaciones o en su defecto la construcción de un nuevo primario es la estructura en “árbol” con una altura del hilo de guarda de 10.5 m ya que presenta los mejores resultados de protección, gracias a su configuración que puede ser adaptada a postes de distribución.

Las alturas óptimas para hilos de guarda de la línea de transmisión son:

- Para los tramos 1, 2, 3, 4 de la zona sierra 31.2 m sobre el piso
- Para el tramo 5 de la zona sierra 30 m sobre el piso
- Para los tramos 1, 2, 3, 4, 5, 6 de la zona costa 31,5 m sobre el piso

Ya que estas alturas en conjunto ofrecen 0.7 fallas del apantallamiento por la longitud total de la línea de transmisión cada año.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std. 1410 – 2004 “Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”.
- [2] IEEE Std. 1243 – 1997 “Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines”.
- [3] T. Gilberto, “Actualización del Mapa Isoceraúnico de Guatemala y su Influencia en el Diseño de Líneas de Transmisión”, Universidad de San Carlos de Guatemala, mayo 2004.
- [4] IEC 71-2 – 1996, “Insulation Co-ordination – Part 2 (Application Guide)”, Third Edition.
- [5] N. Correa, Diseño del apantallamiento contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión con ayuda computacional, EPN, septiembre 2011.

Ing. Paúl Salazar Flores



Nacido en Quito el 26 de Octubre de 1988 realizo sus estudios secundarios en colegio Paulo Sexto y sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional realizando este trabajo como proyecto de titulación. Actualmente se encuentra cursando una maestría en Ingeniería Eléctrica en distribución y se desempeña como Ingeniero Eléctrico en la constructora M.A.S.L..