

# PROGRAMA DIGITAL PARA EL ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL CALCULO DE FALLAS POR APANTALLAMIENTO Y FLAMEO INVERSO EN LINEAS DE TRANSMISIÓN

Canelos Raúl, Ing.  
Soto Marco, Ing.  
Trelles Vladimir, Ing.

Escuela Politécnica Nacional

## RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis completo de las causas que provocan las salidas de una línea de transmisión debido a descargas atmosféricas y se ha desarrollado un programa de computadora el cual permite calcular, de una manera probabilística, cuantas veces durante el año saldrá una línea de transmisión por descargas atmosféricas.

Se ha realizado una simulación que muestra que tan expuesta esta una línea de transmisión a las descargas eléctricas.

Luego se ha probado el programa digital en líneas ya construidas y comparado los resultados para de esta mane obtener conclusiones.

**Palabras Clave:** Apantallamiento, Flameo Inverso, Angulo de Blindaje, Nivel Cerámico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento de las líneas de transmisión frente al rayo ha sido objeto de gran atención durante los últimos años y existe una abundante literatura centrada exclusivamente en este campo. Sin embargo, todavía existen muchos puntos sobre los que no hay un conocimiento suficientemente preciso; probablemente, los más importantes sean la propia naturaleza del rayo y los principales parámetros que describen su comportamiento.

Este programa digital está dedicada al calculo probabilístico de las salidas que tendrá una línea de transmisión por causa de rayos, exceptuando las descargas que caen en las cercanías de una línea aérea que puede inducir en ésta voltajes superiores al nivel de aislamiento.

El objetivo es calcular la tasa de salidas de una línea de transmisión debido a descargas atmosféricas en función de los parámetros más característicos del rayo y de la línea, así como de la actividad atmosférica de la zona.

Permitir a los ingenieros realizar un cálculo aproximado y rápido que le permitirá tomar decisiones para el diseño y control de estos fenómenos y conocer si una línea de transmisión se encuentra correctamente apantallada, para lo cual se debe tener en cuenta cuantas salidas tendrá la línea durante un año debido a

descargas atmosféricas y flameos inversos. Para hacerlo de una manera rápida fácil y eficiente se ha diseñado un software llamado CSAFILT (**Cálculo y simulación del Apantallamiento y Flameo Inverso en líneas de Transmisión**).

Uno de los problemas que se presentan cuando se procede al diseño preliminar de una línea de transmisión es el conocimiento de ciertos parámetros que permitan determinar cual va a ser el comportamiento de la línea durante su operación, por lo cual esta tesis se enfoca en determinar un procedimiento con el cual va a ser posible conocer como se comportará la línea de transmisión ante descargas atmosféricas de una forma aproximada, pero lo suficientemente confiable como para poder tomar decisiones.

El CSAFILT puede ir cambiando los diferentes parámetros que influyen en una línea de transmisión, permitiéndole al ingeniero proponer alternativas en el diseño del apantallamiento.

## 2. CONCEPTOS BASICOS:

### 2.1. RAYO

El rayo es una poderosa descarga electrostática natural producida durante una tormenta eléctrica. La descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz (el relámpago). La electricidad que pasa a través de la atmósfera caliente y se expande rápidamente en el aire, produciendo el sonido característico del trueno.

### 2.2. NIVEL CERÁUNICO

El nivel cerámico de la zona en estudio se define como el número de días al año en el cual se a percibido la caída de un rayo al menos una vez durante esas veinticuatro horas.

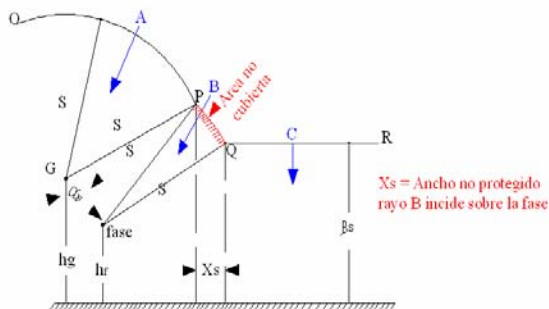
Los niveles cerámicos se suelen llevar a mapas isocerámicos, es decir, a mapas con curvas de igual nivel cerámico, pero estos mapas deben estar constantemente actualizándose, por que los niveles cerámicos alrededor del mundo cambian rápidamente

### 2.3. MODELO ELECTROGEOMETRICO

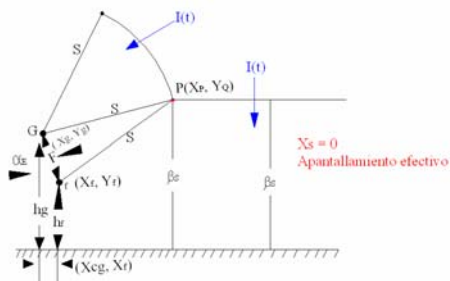
Es un modelo empleado para el estudio de las descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión. Se llama modelo electrogeométrico por que se basa en la geometría de la torre y de la corriente eléctrica del rayo. Para su estudio influye la distancia de impacto del rayo a cualquier objeto (S), y principalmente la corriente de este.

#### MODELO ELECTROGEOMÉTRICO PARA ANÁLISIS DE FALLAS POR APANTALLAMIENTO

a.



b.



### 2.3. CABLE DE GUARDA

Es un cable el cual tiene por función proteger de descargas atmosféricas a una línea de transmisión de energía eléctrica lo que viene a hacer un equivalente a un pararrayos horizontal que se coloca sobre la línea; el cable de guarda tiene como función posibilitar que las descargas se realicen a tierra.

### 2.4. RADIO CORONA

Es el radio de un círculo imaginario que se forma alrededor del conductor debido a la emisión de electrones que circundan en el campo electromagnético de este.

### 3. APANTALLAMIENTO

En condiciones ideales, el aislamiento de las líneas de transmisión debe tolerar cualquier sobrevoltaje que se presente en ellas, pero la longitud de las cadenas de aisladores y las distancias mínimas de aire deberán ser tan grandes que el costo del aislamiento resulta exageradamente alto, por consiguiente se diseña el aislamiento de las líneas de tal manera que soporte todo sobrevoltaje interno (sobrevoltajes por maniobra y sobrevoltajes de baja frecuencia), pero no todo impulso de voltaje ocasionado por descargas atmosféricas (sobrevoltaje externo).

La idea de apantallar una línea de transmisión es, como su nombre lo indica, crear una pantalla protectora para los conductores, de tal manera que las descargas se desvíen a tierra por medio de ella, una especie de pararrayos horizontal sobre toda la línea, y esta pantalla protectora la cumple el cable de guarda. El apantallamiento de una línea de transmisión es la protección que se logra mediante la colocación de un elemento que impide o atenúa en gran medida el paso de campos hasta la unidad que se desea proteger.

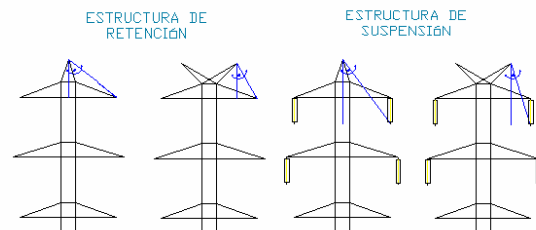
#### 3.1 ANGULO EFECTIVO

Es el ángulo ideal que debe existir entre el cable de guarda y el conductor de la fase, para que el cable de guarda realice su función de protección al 100%.

#### 3.2 ANGULO DE APANTALLAMIENTO

Es el ángulo real que existe entre el cable de guarda y el conductor de la fase. Como el que se muestra a continuación.

#### ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO



La experiencia con varias líneas indican que un ángulo de 20 grados da resultados satisfactorios, mientras que con ángulos de 45 grados se ha obtenido resultados pobres en la protección de la línea ante descargas atmosféricas.

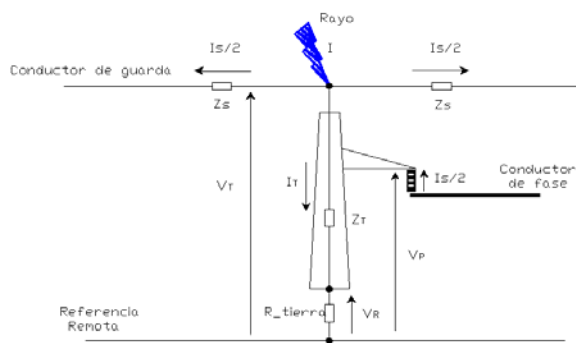
Pruebas en el laboratorio indican que un buen ángulo promedio es de 30 grados, sin embargo se encontró que si la torre esta recta sobre una ladera el ángulo debería ir decreciendo con respecto al gradiente de ladera.

#### 4. FLAMEO INVERSO

Cuando una descarga atmosférica cae sobre el cable de guarda viaja hasta las torres más cercanas (a cada lado del punto de impacto), ver figura 3.1 donde busca su camino a tierra. Parte de la onda de choque se reflejará por el cable de guarda hacia atrás, parte se refractará por el cable hacia delante y la mayor parte baja por la torre hacia tierra. Debido a la impedancia de la torre y a la resistencia de puesta a tierra, se forman a todo lo largo de aquella voltajes de un valor bastante alto.

Cuando el voltaje en la cruzeta es muy alto con respecto al conductor se produce un flameo, llamado flameo inverso o back flashover en inglés. Este flameo puede ocasionar dependiendo del sistema de protecciones, la salida de la línea.

#### INCIDENCIA DE RAYOS EN EL CABLE DE GUARDA



Donde:

- I:** Corriente de descarga del rayo
- Is:** Corriente derivada por los conductores de guarda
- It:** Corriente inyectada a la torre
- Zs:** Impedancia característica del conductor de guarda
- Zt:** Impedancia característica de la torre
- R\_tierra:** Resistencia del SCT (sistema de conexión a tierra) de la torre
- Vt:** Voltaje en el tope de la torre
- Vp:** Voltaje en el brazo de la torre
- Vs:** Voltaje en la cadena de aisladores

#### 4.1 IMPEDANCIA DE LA PUESTA A TIERRA

Para el cálculo de las salidas de las líneas debido a flameos inversos un factor de gran influencia es la impedancia de puesta a tierra de la torre "R\_tierra", esta se comporta de modo variable con el tiempo, ya que en los primeros instantes es muy importante el valor de la impedancia característica de los contrapesos y las varillas de puesta a tierra.

#### 4.2 ONDAS VIAJERAS

Cuando la frecuencia de una señal electromagnética que viaja por una línea es muy grande o cuando su duración es muy corta, se debe analizar en detalle la transmisión de la perturbación de los campos

electromagnéticos a través del tiempo, mediante un análisis de la onda viajera.

#### 4.3 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE UNA TORRE

Este valor se determina por lo general de modelos a escala de la torre. Debido a su complicada geometría el cálculo analítico es complejo.

Sin embargo, con base en medidas de este tipo y análisis teóricos, se han elaborado fórmulas que tienen buena coincidencia con los datos medidos. La fórmula más utilizada es la de Jordan:

$$Z_t = 60 * \ln\left(\frac{h}{r}\right) + 90\left(\frac{r}{h}\right) - 60 \quad (3.6)$$

**Zt:** Impedancia característica de la torre en ohmios.

**h:** Altura total de la torre en metros.

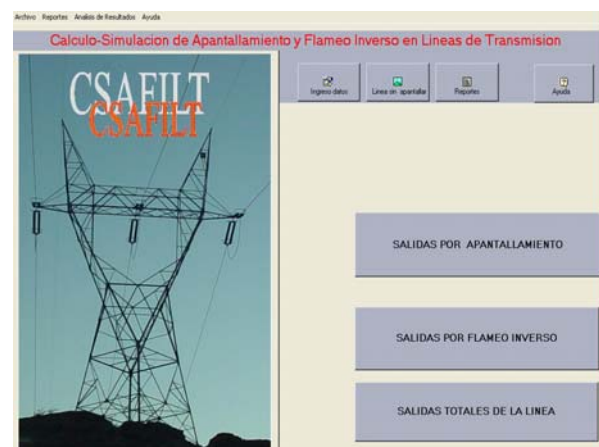
**R:** Radio equivalente para diferentes tipos de torres.

La impedancia de las torres utilizadas en Ecuador, en líneas de 230 kV, da entre 50 y 250 ohmios, siendo mayor mientras más esbelta sea la torre.

#### 5. "CSAFILT" "Cálculo y simulación del Apantallamiento y Flameo Inverso en líneas de Transmisión).

##### 5.1. PRESENTACION DEL "CSAFILT"

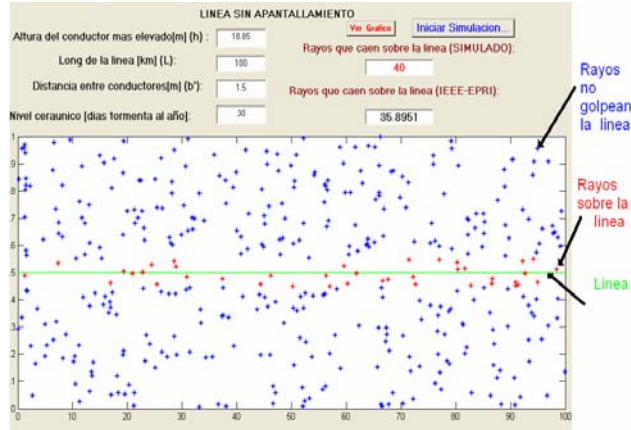
El programa digital "CSAFILT" funciona bajo el Matlab 6.5 versión 13. La carpeta "CSAFILT" se copia dentro de la carpeta "work" ubicada en el directorio de Matlab. Para iniciar el programa se escribe la palabra CSAFILT en la ventana de comandos del Matlab, luego de esto se desplegará el programa.



## 5.2 DESCARGAS QUE CAERÁN SOBRE UNA LÍNEA

El programa también permite ver la importancia del cable de guarda y conocer mediante una simulación cuantos rayos golpearán a la línea.

La siguiente figura muestra un ejemplo de una simulación.



## 5.3 NÚMERO DE SALIDAS V.S. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

El CSAFIL permite ver de que manera va influir las salidas de una línea con diferentes valores de puesta a tierra, como se muestra en la figura.

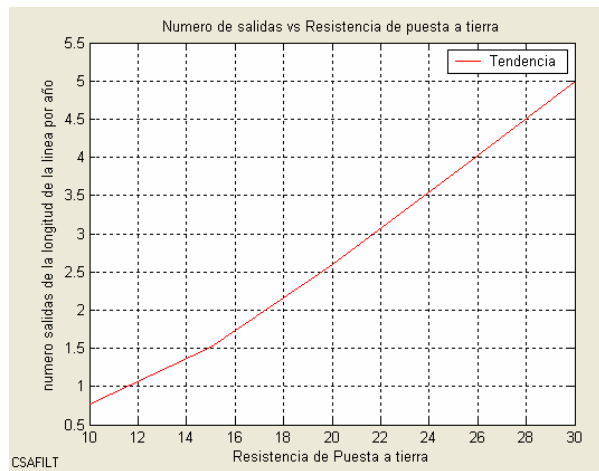
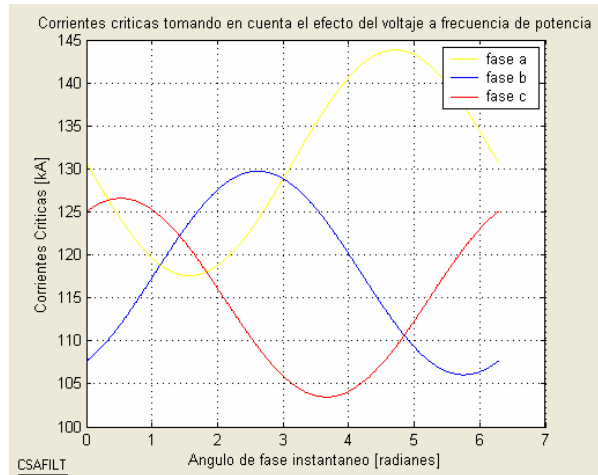


Gráfico de las curvas de las corrientes críticas para cada fase donde se encuentra el porcentaje en aue cada fase esta mas expuesta a flameos inversos.



## 6. CONCLUSIONES

La El CSAFIL permite a los ingenieros encargados del diseño del apantallamiento de líneas de transmisión probar sus diseños y de esta manera poder tomar mejores decisiones, también permite probar si esta bien diseñado el apantallamiento de líneas ya construidas.

El programa digital es amigable, posee un entorno de simulación y es código abierto, lo que ayudará de una manera didáctica al estudio del apantallamiento y flameo inverso en líneas de transmisión, permitiendo realizar cualquier modificación al programa para ajustarse al entorno en que vaya a utilizarse, por que ninguna de sus partes estructurales se encuentra compilada.

Probando el CASFILT en algunas líneas de transmisión, se observó que las fallas de apantallamiento en las líneas ecuatorianas parecen ser bastante escasas debido a los pequeños ángulos de protección que se utilizan, y las salidas de línea son en su mayoría provocadas por flameos inversos, los cuales aumentan de una manera considerable en época seca y esto se debe al incremento de la resistencia de pie de torre. Por lo que se recomienda dar mantenimiento de las puestas a tierra en especial a la llegada de esta época, para tener menos salidas por causa de flameos inversos.

Al realizar la simulación de los rayos que caerán sobre una línea de transmisión, se observó que el número de rayos que golpean la línea converge al valor exacto calculado con el método de la EPRI, de lo que se puede concluir que el modelo analítico y el modelo aleatorio son relativamente equivalentes, es decir dan un valor similar dentro de un rango. El CASFILT muestra estos dos valores, el valor dado por el modelo aleatorio cambiara con cada simulación mientras que el valor analítico se mantendrá constante para los mismos parámetros de entrada.

La causa más importante en la generación de flameo por descargas atmosféricas es el mecanismo de flameo inverso, particularmente en nuestro país donde tenemos niveles cerámicos altos. La mayoría de flameos inversos se dan cuando el rayo golpea la torre.

El fenómeno asociado a la descarga de rayos sobre líneas de transmisión de potencia eléctrica con conductores de guarda, es un fenómeno que involucra eventos electromagnéticos complejos con campos electromagnéticos que varían rápidamente con el tiempo, física de la descarga disruptiva en gases, además existen efectos no lineales como el desarrollo del efecto corona en los conductores, torres de la línea de transmisión; y especialmente el aspecto relacionado con la respuesta transitoria del sistema de conexión a tierra de la torre, el valor de resistencia a tierra influye mucho en la salida forzada de operación de la línea por flameo inverso. Para ver este grado de influencia se le dotó al CSAFILT con un opción que permite observar mediante un gráfico esta relación, para de esta manera decidir cual podría ser un sistema de conexión a tierra ideal, hasta el momento en el país no se realiza este análisis simplemente se lo hace mediante normas de acuerdo con la región (sierra, costa y oriente).

Los resultados obtenidos por el CSAFILT parten de que si el ángulo de blindaje existente es menor que el requerido para proporcionar blindaje efectivo, el índice de flameos por fallas de blindaje debe ser igual a cero. De otra forma se determina el índice de flameos correspondiente.

Se observa de las estructuras analizadas con ángulos de blindaje existentes entre nueve y diez grados presentan blindaje efectivo, es decir, no están sujetas a flameos por fallas de blindaje, mientras que las estructuras que tienen ángulos de blindaje de mayores a 25 grados ya no presentan blindaje efectivo y típicamente estarán sometidas a índices de flameos por descargas atmosféricas que penetran el blindaje, es decir aquellas descargas que terminan directamente en los conductores de fase.

Mientras mayor sea la longitud de la cadena de aisladores menores serán las salidas por flameos inversos, y esto es lógico por que existe una mayor distancia de aislamiento. En el flameo inverso el arco de aislamiento de la línea no se autoextingue y se requiere una desconexión o salida de operación de la línea para poder extinguirse.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] "A method of estimating lightning performance of transmission lines". AIEE COMITE REPORT – Tr. Vol. 69, 1950.

[2] "Distribution – System Protection Manual", McGraw Edition Power System Division.

[3] "EHV Transmission line reference book". Edison Electric. Inst. New York, 1968.

[4] "Electrical Transmission and distribution Reference Book", cuarta edición, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pennsylvania.

[5] "Transmission Lines Reference book 345 kV and above", EPRI, 1975.

[6] "Transmission lines reference book 345 kV and above", Electric Power Research Institute EPRI, Second Edition, Palo Alto, California 1982.


[7] Anderson J.G.: "Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above", second edition, Chapter 12, Electric Power Research, Palo Alto California

[8] Armstrong H.R, Whitehead E.R., "Field and Analytical studies of transmission line shielding". Enero 1968.

[9] Arteaga, G. y otros. "Estudio analítico y estadístico del comportamiento ante descargas atmosféricas de líneas de transmisión a 220kV en Colombia". Proyecto de grado U. Nacional. Director: Ing. Antonio Mejía Umaña. 1982.

[10] Barker, P. P., Short, T. A., Eybert-Berard, A. R., and Berlandis, J. P., "Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes," IEEE

Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2,  
pp. 980–995, Apr. 1996.

 [http://shop.ieee.org/ieeestore/Product.aspx?product\\_no=SH95218](http://shop.ieee.org/ieeestore/Product.aspx?product_no=SH95218)

 <http://www.ucv.ve/comir/documentos>

## 6. CURRICULUM VITAE

**Raúl Canelos.-** Nació en Quito, Ecuador. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional

**Trelles Ordóñez Wilman Vladimir.** Nació en Celica, Loja, Ecuador, en 1982. Obtuvo el título de ingeniero eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito el 4 de mayo del 2007.

e-mail: vladimirtrelles@yahoo.es

**Soto Lima Marco Iván.** Nació en Loja, Ecuador, en 1982. Obtuvo el título de ingeniero eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito

e-mail: poliserviciosss@yahoo.com