

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA IDENTIFICAR LAS TORRES CON MAYOR ÍNDICE DE FALLAS POR EFECTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Martin T. Montesdeoca Espín

MBA Raúl Canelos

CELEC EP TRANSELECTRIC

RESUMEN

Este artículo resume el contenido de la tesis “ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA DETERMINAR LAS TORRES CON MAYOR ÍNDICE DE FALLAS POR EFECTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”. Donde se desarrolla un programa computacional “DEATLT” en el entorno de Visual Basic para identificar las torres con mayor riesgo después de analizar los parámetros generales que caracterizan a la línea de transmisión y los propios de cada una de las torres.

1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por sobrevoltaje una sollicitación variable en el tiempo cuyo máximo valor es superior al valor pico del voltaje nominal del sistema en estudio. Existen muchas causas por las que se pueden originar sobrevoltajes en una red de potencia, por esta razón su estudio se suele realizar atendiendo al origen, al tipo de proceso transitorio y al tiempo de duración. La clasificación más aceptada distingue tres tipos de sobrevoltajes:

- a) Sobrevoltajes temporales .- Son de larga duración (varios milisegundos), poco amortiguados y de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación. Ejemplos un cortocircuito entre una fase y tierra, o a un problema de ferro resonancia.
- b) Sobrevoltajes de maniobra.- De corta duración y puede presentar un rango de frecuencias que varía entre los 2 y los 10 kHz. Su origen puede estar en una maniobra de conexión o de desconexión, sin embargo, un cortocircuito puede provocar transitoriamente un sobrevoltaje que se clasificaría dentro de este grupo.
- c) Sobrevoltajes de origen atmosférico .- Son debidas a una descarga atmosférica, tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces el voltaje pico nominal.

La importancia de los sobrevoltajes de carácter atmosféricos crece conforme disminuye el voltaje nominal de los componentes afectados por el rayo.

En general, el nivel de los sobrevoltajes de origen interno es más reducido que el originado por sobrevoltajes atmosféricos directos o inducidos por el rayo. Un rayo puede originar un sobrevoltaje que termine provocando una falla en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en algún otro equipo.

2. AISLAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Es indispensable conocer el comportamiento del aislamiento para tener en cuenta las condiciones ambientales bajo las cuales puede encontrarse en el momento de ser aplicada una dicha sollicitación.

- a. El valor crítico de aislamiento ($V_{50\%}$): El valor de voltaje que produce un 50% de “descargas” en N aplicaciones, o que tiene un 50% de probabilidad de ser “resistido” por el aislamiento.
- b. El valor de la desviación normal (σ): Que corresponde aproximadamente a la diferencia entre el valor crítico del aislamiento y el valor de V correspondiente a una probabilidad de descarga del 16 %, o sea.

$$\sigma = V_{50\%} - V_{16\%}$$

- c. El valor de V para probabilidades de descarga distinta del 50% se puede obtener de la siguiente relación :

$$V_p = V_{50\%} - k \cdot \sigma$$

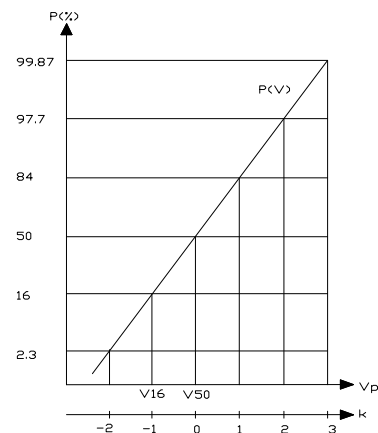


Figura 1: Relación entre Voltaje aplicado V_p y probabilidad de Descarga P

Los principales factores que ejercen influencia en la capacidad de resistir un determinado nivel de aislamiento son: la densidad del aire, la humedad y la lluvia. La ecuación que toma en cuenta estos factores es:

$$V_c = \frac{\delta^n \cdot K_{11}}{H} \cdot V_s$$

V_s Voltaje crítico a condiciones meteorológicas normales, V_c Voltaje corregido a diferentes condiciones meteorológicas, δ Factor de corrección por densidad relativa del aire, H Factor de corrección por efecto de la humedad del aire,

K_{11} Factor de corrección debido al efecto de la lluvia, n Exponente empírico de acuerdo a la longitud de la cadena de aisladores.

Existen varias literaturas con valores de estos factores por lo que depende de la confiabilidad de los mismos para tener un resultado aceptable.

$$\delta = \frac{3.92 \cdot b}{273 + t} ; \log b = \log 76 - \frac{h}{18.336}$$

b Presión barométrica [cm de Hg], t Temperatura del ambiente [°C], h Altitud de las instalaciones (con referencia al nivel del mar) [m].

• **CORRECCIÓN PROBABILÍSTICA**

A través de ensayos se ha comprobado que si la probabilidad de resistir una sollicitación un solo elemento aislante (cadena de aisladores) es P_1 entonces la probabilidad que dicha sollicitación sea resistida por N elementos de aislamiento en paralelo es $P_N = P_1^N$ por consiguiente la probabilidad de resistir el aislamiento de una línea frente a las diversas sollicitaciones decrece a medida que el número de elementos en paralelo aumenta.

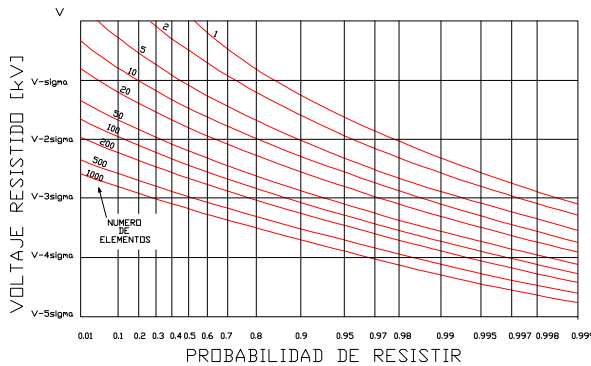


Figura 2 : Probabilidad de resistir un voltaje por elementos en paralelo

$$CFO = \frac{Vs}{1 - \mu \cdot \sigma}$$

- CFO : Voltaje crítico probabilístico.
- V_s : Voltaje crítico de una sollicitación dada.
- μ : Desviación estándar del voltaje crítico.
- σ : Número de desviaciones normales.

3. SALIDAS FORZADAS POR DESCARGAS DIRECTAS AL CONDUCTOR DE FASE (FLAMEO DIRECTO)

Es importante conocer la geometría de la línea con datos precisos de ubicación de los conductores de fase y guarda, dimensiones de la torre y brazos de la misma. Como es conocido a lo largo de una línea de transmisión existe más de un tipo de torres, por lo que se debe tomar como referencia el tipo de torre más numeroso.

3.1. NIVEL CERAÚNICO T Y DENSIDAD DE DESCARGA

El nivel ceraúnico es el número de día/año en el cual se oye al menos un trueno en un período de 24 horas (considerado como un día de tormenta).

La densidad de descargas es el número de rayos que inciden sobre el terreno (número de rayos/km²/año), este parámetro determina si el trueno oído se debe a rayos entre nubes o nube tierra. Las investigaciones realizadas correlacionando los niveles ceraúnicos con la información proporcionada por las redes de detección de rayos a tierra se ha podido establecer en primer lugar que el número de rayos nube-tierra es proporcional a nivel ceraúnico. Esta proporción se ha estimado entre 0.1 T y 0.19T. La referencia [1] sugiere utilizar la siguiente expresión:

$$N_g = 0.12 T$$

3.2. ALTURA MEDIA DEL CABLE DE GUARDA

$$Y_g = h_g - \frac{2}{3} \cdot f_{ct} \quad f_{ct} = 0.0009 \cdot \frac{l^2}{20}$$

- h_g : altura del conductor de guarda en la torre.
- f_{ct} : flecha del conductor de guarda.
- l : Longitud del vano.

3.3. NÚMERO DE RAYOS QUE INCIDEN SOBRE LA LÍNEA

Se ha definido una franja o sombra de la línea donde la probabilidad de incidencia de los rayos sobre la línea es elevada. Esta se define como se muestra en la figura 4.1

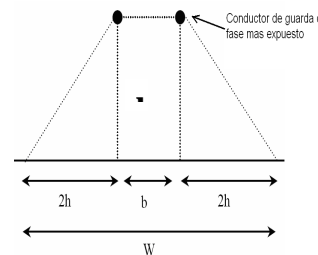


Figura 3: Franja o sombra de una línea

$$w = b + 4 \cdot h^{1.09}$$

h : altura desde el suelo hasta el conductor guarda. Si no existe cable de guarda se deberá tomar la altura al conductor de fase más alto.

Si en la parte superior existe un solo conductor de guarda o fase entonces $b=0$.

Si no existe cable de guarda y más de una fase esta expuesto en lo más alto (configuración horizontal, doble circuito) el valor de b será la distancia entre las fases a la misma altura como se indica en la figura 4.

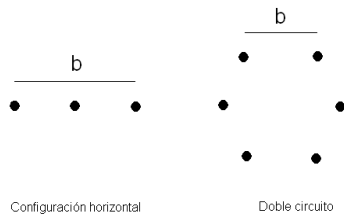


Figura 4: Valor de “b” para configuraciones de líneas de transmisión

El número de rayos nube-tierra por año que intercepta la línea por cada 100 km de la línea se determina mediante:

$$N_L = 0.012 \cdot (b + 4h^{1.09}) \cdot T$$

N_L : determina el número de rayos que inciden sobre la línea por cada 100km/año.

En general para una longitud en km de una línea, diferente de 100 km, el número de rayos que inciden por año está determinado por:

$$N_L = 0.012 \cdot (b + 4h^{1.09}) \cdot \frac{L \cdot T}{100}$$

3.4. VOLTAJE DE ARCO SUPERFICIAL DE LA CADENA DE AISLADORES A 6 US

De la geometría de la línea se selecciona los conductores de fase más expuestos a incidencias de rayos y obteniendo el voltaje de arco superficial (flashover) para un tiempo de 6us en la cadena de aisladores. Se puede determinar este valor de voltaje por medio de la siguiente ecuación donde la resistencia que ofrece el aislamiento depende del tiempo:

$$V(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) \cdot Ls$$

$V(t)$: Voltaje de arco superficial en la cadena de aisladores [kV].

t : Tiempo hasta la descarga disruptiva (2us o 6 us).

Ls : Longitud de la cadena de aisladores [m].

Esta información se puede obtener del fabricante, o se puede obtener experimentalmente en un laboratorio de alto voltaje o a su vez por medio de programas computacionales como es el ATP (Alternative Transients Program).

3.5. ALTURA MEDIA PARA EL CONDUCTOR DE FASE

$$Y_{fase} = h_{fase} - \frac{2}{3} \cdot fc \qquad fc = 0.0014 \cdot \frac{l^2}{20}$$

h_{fase} : Altura del conductor de fase en la torre.

fc : Flecha del conductor de fase.

L : Longitud del vano.

3.6. RADIO CORONA DEL CONDUCTOR DE FASE

Debido a la onda de voltaje asociada a la onda de corriente generada por la incidencia del rayo sobre el conductor de fase, se produce la ionización del volumen del aire alrededor del conductor de fase o efecto corona como se le conoce comúnmente. Este efecto sobre el conductor se traduce como un incremento del radio del conductor, afectando el valor de la impedancia característica del mismo. El radio R_c del efecto corona se extiende hasta un punto donde la intensidad del campo eléctrico decrece a un valor tal que no puede ionizar más el aire. Este radio R_c se determina mediante la siguiente expresión no lineal.

$$Rc \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{fase}}{Rc} \right) = \frac{V}{E_0};$$

$$E_0 = 30000 \cdot M \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \cdot 100$$

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

M : Factor de rugosidad del conductor.

δ : Densidad relativa del aire.

R : Radio del conductor en cm.

V es el valor del voltaje aplicado al conductor de fase por la fracción de corriente de descarga del rayo que viaja por el conductor. Se recomienda para el conductor de fase utilizar el voltaje de arco superficial de la cadena de aisladores para 6us V_{s6} . Para el conductor de guarda se recomienda un valor de V igual a 1.8 veces el voltaje de arco superficial de la cadena para un tiempo de 2 us V_{s2} .

3.7. RADIO EQUIVALENTE

En ciertas líneas para aumentar la capacidad de conducción de potencia y disminuir pérdidas se suele hacer con más de un conductor por fase, lo que hace necesario determinar el radio equivalente del conjunto de conductores por fase (haz de conductores).

Una aproximación final del radio se obtiene sumando el radio corona y el radio equivalente del haz.

$$R_{cr} = R_c + R_{eq}$$

R_{eq} : Radio equivalente del haz de conductores

r : Radio de un solo conductor

d : Distancia entre conductores dentro del haz.

3.8. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA ZII DEL CONDUCTOR

El efecto corona tiene mayor influencia sobre la capacitancia de los conductores, afectando en forma menor su inductancia. Para determinar la impedancia característica de un conductor tomando en cuenta el efecto corona se recomienda la siguiente expresión:

$$Z_{ii} = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{2 \cdot h_i}{r_i}\right) \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_i}{R_{cri}}\right)}$$

h_i : Altura del conductor.
 r_i : Radio del conductor
 R_{cri} : Radio incluyendo el efecto corona

El subíndice "i" indica a cada uno de los conductores a ser evaluados.

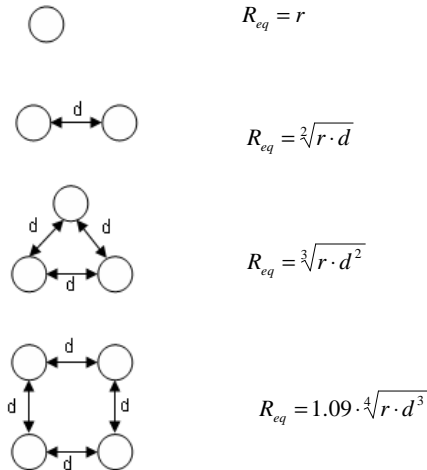


Figura 5: Haz de conductores por fase más usuales y sus ecuaciones para determinar el radio equivalente

3.9. MÍNIMA CORRIENTE QUE PRODUCE FLAMEO

Con V_{s6} calculado en el literal 3.6 y Z_{ii} en el literal anterior se determina el valor mínimo de la corriente que puede producir un arco superficial cuando se produce la descarga en el conductor de fase.

$$I_{\min} = \frac{2 \cdot V_{s6}}{Z_{ii}}$$

3.10. MÍNIMA DISTANCIA DE DESCARGA

La distancia de descarga r_c es un concepto clave en la teoría de los modelos electrogeométricos. La idea principal es que en la medida que un rayo se acerca al terreno, la influencia de los objetos en la superficie determina el punto u objeto de descarga. Esto se manifiesta con la distancia r_c del objeto. Esta distancia es función de la carga en el canal, y en consecuencia de la corriente de la descarga o rayo que se aproxima. Para determinar esta distancia la IEEE recomienda la siguiente expresión:

$$r_{c \min} = 10 \cdot I_{\min}^{0.65} \quad \text{I en kA.}$$

3.11. VALOR β DE UNA LÍNEA

Este factor β toma en cuenta la fuerte atracción sobre los rayos que el terreno ofrece por su amplitud, que es

completamente diferente de la atracción que puede ofrecer un conductor suspendido a una altura determinada sobre el terreno.

Para este valor de β , IEEE recomienda los siguientes valores de acuerdo al nivel de voltaje:

$\beta=1.0$ para líneas de alto voltaje ($V \leq$ de 230 kV)
 $\beta=0.8$ para líneas de Extra alto voltaje ($230 \text{ kV} \geq V > \geq 50 \text{ kV}$)
 $\beta=0.67$ para líneas de Ultra alto voltaje ($V \geq 750 \text{ kV}$)

3.12. APANTALLAMIENTO EFECTIVO

Este término implica tener una protección por medio del cable de guarda hacia los conductores de fase en un 100 % segura, donde evitará que ninguna descarga atmosférica caiga directamente sobre un conductor de fase:

$$X_{gE} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y_2)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y_1)^2} \quad (4.12)$$

$$(4.13)$$

$$r_g = r_c \cdot \beta$$

X_{gE} : Coordenada del cable de guarda para tener apantallamiento efectivo.

Apantallamiento efectivo significa reducir el espacio Z_f en la figura 6 a cero colocando apropiadamente el conductor de guarda.

3.13. ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO EFECTIVO

Este ángulo de apantallamiento se calcula a partir de la altura del cable de guarda Y_1 , del conductor Y_2 y la distancia horizontal del cable de guarda con respecto al conductor de fase X_g quedándonos la siguiente ecuación.

$$\alpha = \arctag\left(\frac{X_g}{y_1 - y_2}\right)$$

El ángulo de apantallamiento efectivo α_E se calcula con X_{gE} obtenida en el literal anterior

3.14. ESPACIO NO CUBIERTO POR EL APANTALLAMIENTO.

La zona no cubierta por el apantallamiento Z_f se puede determinar a partir de la figura 6 quedándonos la siguiente expresión

$$Z_f = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{r_g - y_2}{r_c}\right) \quad \alpha = \arctg\left(\frac{a_2 - a_1}{y_1 - y_2}\right)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{(y_1 - y_2) \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{2r_c}\right); \quad \text{Si } r_g < y_2 \text{ entonces}$$

$$\theta = 0$$

3.15. MÁXIMA DISTANCIA DE DESCARGA

La máxima distancia de incidencia relativa a la máxima corriente que ocasiona una falla en los conductores puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$r_c \max = \frac{y_1 + y_2}{2(1 - \text{sen} \alpha)}$$

α : El ángulo de protección.

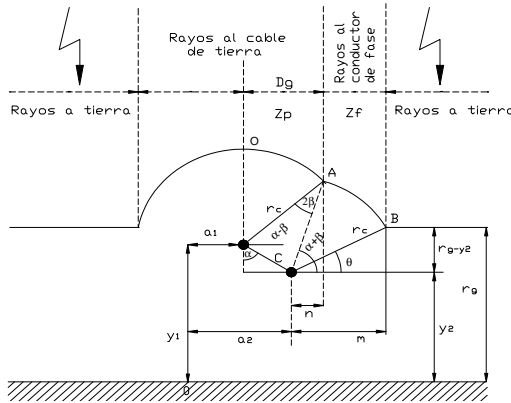


Figura 6: Modelo electro geométrico

3.16. CORRIENTE MÁXIMA (A MÁXIMA DISTANCIA DE DESCARGA)

La corriente I_{\max} correspondiente a la distancia de descarga máxima $r_{c\max}$ se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$I_{\max} = 0.029 (r_{c\max})^{1.54}$$

3.17. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE I MIN E I MAX

El valor máximo o valor pico de la corriente de descarga del rayo es uno de los factores determinantes en el sobrevoltaje generado y la probabilidad de falla asociada. Debe reconocerse la naturaleza estadística de este valor máximo. La probabilidad de que un rayo tenga un valor máximo mayor o igual que un valor determinado I se puede determinar mediante la siguiente expresión:

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

Esta expresión fue determinada para rayos de polaridad negativa, que son los que mayormente inciden en estructuras de líneas de transmisión convencionales, con altura menor de 60m.

P_{\min} se obtiene reemplazando el valor de la corriente mínima

P_{\max} se obtiene reemplazando el valor de la corriente máxima

3.18. NÚMERO DE FALLAS DE APANTALLAMIENTO

El número de fallas de apantallamiento que pueden provocar salidas forzadas de la línea por 100 km/año se obtiene mediante:

$$N_{FA} = \frac{0.012 \cdot Z_f \cdot (P_{\min} - P_{\max})}{2}$$

Para longitudes de línea L diferente de 100 Km., se multiplica el valor de N_{FA} por el valor de L y divide por 100.

3.19. NÚMERO TOTAL DE FALLAS DE APANTALLAMIENTO

Cuando más de un conductor de fase está expuesto a una falla de apantallamiento, se debe sumar las correspondientes a cada conductor. El caso más común es en líneas de transmisión con distribución horizontal de los tres conductores de fase y dos cables de guarda, si el apantallamiento no es efectivo, los conductores de fase ubicados en los extremos son los más expuestos. Debido a la simetría el número de fallas de apantallamiento son iguales para ambos conductores y estas deben sumarse.

4. SALIDAS FORZADAS POR DESCARGA RETROACTIVA (FLAMEO INVERSO)

4.1. VOLTAJES DE ARCO SUPERFICIALES DE LA CADENA DE AISLADORES.

Estos voltajes se determinan a los $2\mu s$ y $6\mu s$ conocido como el método de los dos puntos.

A falta de una información más precisa para una longitud de la cadena de aisladores L_s el voltaje de arco superficial para los tiempos indicados se puede estimar mediante las siguientes fórmulas:

$$V_{2\mu s} = 820 L_s \quad V_{6\mu s} = 585 L_s$$

L_s es la distancia de la cadena de aisladores.

$V_{2\mu s}, V_{6\mu s}$ Voltajes de soporte del aislamiento (resistencia) en dos y seis microsegundos en kV. Estos valores son evaluados para cada fase.

Estos voltajes se deberían obtener del fabricante o experimentalmente.

4.2. VOLTAJE EN EL TOPE DE LA TORRE

El voltaje obtenido en el paso anterior para $2\mu s$, $V_{2\mu s}$, se multiplica por un factor de 1.8 para obtener el voltaje promedio en la parte superior de la torre.

$$V_t = 1.8 V_{2\mu s}$$

4.3. RADIO CORONA EN EL CONDUCTOR DE GUARDA

Al igual como se calculó el radio corona para el conductor de fase en el análisis de salidas por falla de apantallamiento. Se calcula el radio corona para el cable de guarda cuando éste intercepta una descarga atmosférica por medio de la expresión:

$$R_c \cdot \ln\left(\frac{2h_g}{R_c}\right) = \frac{V}{E_o}$$

- R_c : Radio incluyendo el efecto corona.
- h_g : Altura del conductor de guarda en la torre.
- V : Valor del voltaje ($1.8 \cdot V_{us}$).
- E_o : Gradiente límite del campo eléctrico, por debajo del cual no se presenta corona V/m ver ecuación.

4.4. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR DE GUARDA

Para determinar la impedancia característica del cable de guarda se procede a calcular de la misma manera que se procedió en el análisis de salidas por falla de apantallamiento con la siguiente expresión:

$$Z_{ii} = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{2 \cdot h_{gi}}{r_g}\right) \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_{gi}}{R_c}\right)}$$

- h_{gi} : altura del cable de guarda i.
- r_g : radio del cable de guarda
- R_c : Radio incluyendo el efecto corona

El subíndice i indica a cada uno de los cables de guarda a ser evaluados.

Si existen dos cables de guarda, la impedancia característica es el equivalente entre las impedancias propias de los cables de guarda y las impedancias mutuas existentes entre ellos para lo cual se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$Z_{12} = 60 \cdot \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) \quad Z_s = \frac{Z_{ii} + Z_{12}}{2}$$

- Z_{12} : Impedancia mutua de los cables de guarda.
- Z_{ii} : Impedancia característica de cada cable de guarda
- H_{11}, H_{22} : Distancia desde los cables de guarda a sus imágenes, se considera que los dos están ubicados a la misma altura.
- Z_s : Impedancia característica cuando existe más de un cable de guarda Para un solo cable de guarda se tiene que $Z_s = Z_{ii}$

$$Z_{1c} = 60 \cdot \ln\left(\frac{H_{1c}}{d_{1c}}\right); \quad Z_{2c} = 60 \cdot \ln\left(\frac{H_{2c}}{d_{2c}}\right); \quad K_c = \frac{Z_{1c} + Z_{2c}}{Z_{11} + Z_{12}}$$

Subíndices 1 ; 2 :Indican el cable de guarda en estudio.
Subíndice C :Indica el conductor de fase.

Para un solo cable de guarda, simplemente se toma $K_c = Z_{1c} / Z_{ii}$

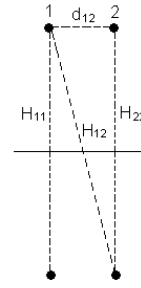


Figura 7: Distancias para la impedancia característica con dos cables de guarda

4.5. FACTOR DE ACOPLAMIENTO ENTRE EL CABLE DE GUARDA Y LOS CONDUCTORES DE FASE

La onda de corriente en el conductor de guarda se acopla electromagnéticamente con el conductor de fase generando o induciendo una onda de voltaje en el conductor de fase. Este factor depende de la geometría de la línea.

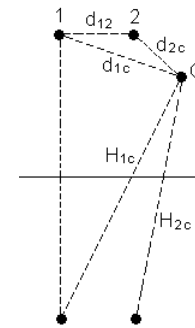


Figura 8: Distancias para el factor de acoplamiento entre cables de guarda y conductores de fase

4.6. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE LA TORRE

Para torres con configuración horizontal de conductores se tiene:

$$Z_r = 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot h}{r}\right) - 60$$

- r : Es el radio de la cintura de la torre (ancho de la cintura dividido por dos) en metros.
- h : Altura total de la torre en metros.

Para torres con configuración vertical de conductores se tiene:

$$Z_T = 30 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot (h^2 + r^2)}{r^2}\right)$$

- r : Es el radio de la base de la torre (ancho de la base dividido por dos) en metros.
- h : Altura total de la torre en metros.

Para estructuras tipo H se tiene:

$$Z_T = 30 \cdot \ln\left(\frac{h^2}{r \cdot d}\right) + 45 \cdot r \cdot \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{d}\right) - 60$$

r: Es el radio de uno de los soportes (ancho del soporte dividido por dos) en metros.
h: Altura total de la torre en metros.
d: Distancia en metros que separa a los dos soportes de la estructura en "H".

4.7. EL TIEMPO DE TRÁNSITO A TRAVÉS DE LA TORRE

El tiempo total que se demora en recorrer la onda de corriente de la descarga atmosférica desde el tope de la torre hasta la base se puede determinar con la siguiente expresión:

$$\tau_T = \frac{h}{300}$$

El tiempo "τ_T" se expresa en microsegundos y la altura de la torre "h" en metros.

4.8. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El fenómeno asociado a la descarga de rayos sobre líneas de transmisión de potencia eléctrica con conductores de guarda, es el aspecto relacionado con la respuesta transitoria del Sistema de Conexión a Tierra (SCT) de la torre es dependiente de la intensidad de la corriente, frecuencia y puede estar sujeto a la ionización del terreno adyacente.

El valor de resistencia a tierra del SCT de la torre interviene en la Salida Forzada de Operación de la Línea por descarga retroactiva.

$$R = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}$$

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\rho E_0}{R_0^2}$$

I_g es la corriente limitante para inicializar una ionización suficiente del suelo.

R₀ Resistencia medida a baja corriente y baja frecuencia, en ohm; ρ Resistividad del terreno, en ohm·m; E₀ Gradiente de ionización del suelo (400 kV/m)

4.9. TIEMPO DE VIAJE ENTRE LA TORRE INCIDIDA POR EL RAYO Y LAS TORRES ADYACENTES

Las reflexiones de las ondas de voltaje y corriente que ocurren en las torres adyacentes tienden a reducir el voltaje en la cadena de aisladores de la torre donde incidió el rayo. La mayor o menor reducción dependen de la longitud de los vanos (adelante y atrás) de la torre. En consecuencia el efecto de estas reflexiones debe ser tomado en cuenta porque si llegan con suficiente antelación pueden reducir la tasa de salidas forzadas. El tiempo de transito τ_v en microsegundos se determina mediante:

$$\tau_v = \frac{L}{270}$$

τ_v: Tiempo de duración de viaje por el vano, solo de ida. (Multiplicar por 2 para obtener el tiempo total de ida y vuelta)
L: Longitud del vano en metros.

4.10. TIEMPO DE TRÁNSITO ENTRE EL TOPE DE LA TORRE Y EL BRAZO QUE SOSTIENE EL CONDUCTOR DE FASE

Este tiempo se determina asumiendo que el fenómeno se desplaza a la velocidad de la luz.

$$\tau_{pn} = \frac{Y_n}{300}$$

Y_n : Distancia vertical entre el tope de la torre y la cruceta que sostiene el conductor de fase n.

4.11. IMPEDANCIA EQUIVALENTE DEL CIRCUITO

Al caer un rayo en una determina torre, éste va a producir un voltaje igual al producto de la corriente de descarga por la impedancia equivalente (Z_i) la misma que se puede determinar por medio del siguiente circuito equivalente.

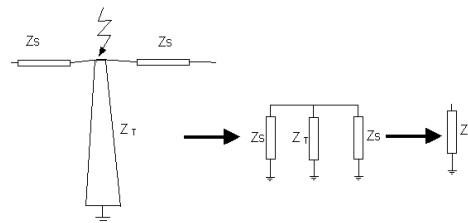


Figura 9: Circuito para obtener la impedancia equivalente vista por el rayo incidente

Para obtener Zi se resuelve el circuito equivalente, donde se tiene tres impedancias en paralelo como muestra la figura 9 quedándonos la siguiente expresión:

$$Z_i = \frac{Z_s \cdot Z_T}{Z_s + 2 \cdot Z_T}$$

Z_i: Impedancia equivalente del circuito vista por la corriente del rayo [Ω]. Z_s: Impedancia del cable de guarda [Ω]; Z_T: Impedancia de la torre [Ω].

4.12. IMPEDANCIA DE ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

$$Z_w = \frac{2 \cdot Z_s^2 \cdot Z_T}{(Z_s + 2 \cdot Z_T)^2} \cdot \frac{Z_T - R}{Z_T + R}$$

Z_w: Impedancia de onda constante de la torre en ohmios sobre la cual viaja la onda de corriente.

R: Resistencia de puesta a tierra de la torre [Ω].

4.13. FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO Y DE REFRACCION

$$\psi = \left(\frac{2Z_T - Z_S}{2Z_T + Z_S} \right) \cdot \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad \alpha_R = \frac{2 \cdot R}{Z_T + R}$$

4.14. VOLTAJE POR UNIDAD EN EL TOPE DE LA TORRE EN DOS MICROSEGUNDOS

Este voltaje se obtiene considerando un valor de corriente de 1kA inyectado por el rayo y se obtiene por medio de la siguiente ecuación :

$$V_{T2} = Zi - \frac{Z_w}{1-\psi} \cdot \left(1 - \frac{\tau_T}{1-\psi} \right) \quad \text{en kV.}$$

4.15. VOLTAJE REFLEJADO EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS DOS MICROSEGUNDOS.

Debido a las reflexiones de las torres adyacentes en el tope de la torre donde incide el rayo se produce un voltaje reflejado el mismo que se determina a los 2 microsegundos por medio de la siguiente expresión:

$$V_{rT2} = -\frac{4 \cdot K_S \cdot V_{T2}^2}{Z_S} \cdot \frac{1 - 2 \cdot V_{T2}}{Z_S} \cdot (1 - \tau_V) \quad \text{en kV.}$$

Si $\tau_V > 1$ no habrá reflexiones para 2 microsegundos y $V_{rT2} = 0$.

K_S : Se utiliza para tomar en cuenta el efecto amortiguador sobre las ondas viajeras que se desplazan por el cable de guarda. Se asume un valor de 0.85.

4.16. VOLTAJE REAL EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS DOS MICROSEGUNDOS

El voltaje real que aparece en el tope de la torre será la suma de los voltajes calculados en los pasos anteriores debido a las reflexiones y el voltaje en por unidad.

$$V_{Treal2} = V_{rT2} + V_{T2} \quad \text{en kV.}$$

4.17. VOLTAJE EN EL RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A LOS DOS MICROSEGUNDOS

$$V_{R2} = \frac{V_{T2}}{V_{Treal2}} \cdot \frac{\alpha_R \cdot Zi}{1-\psi} \cdot \left(1 - \frac{\psi \cdot \tau_T}{1-\psi} \right) \quad \text{en kV.}$$

$\frac{V_{T2}}{V_{Treal2}}$: Factor de reducción debido al efecto de las reflexiones de torres adyacentes.

4.18. VOLTAJE EN LA CRUCETA A LOS DOS MICROSEGUNDOS

$$V_{pn2} = V_{R2} + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} \cdot (V_{Treal2} - V_{R2}); \text{ En (pu) [kV].}$$

El subíndice “n” indica la fase en estudio.

4.19. VOLTAJE EN LA CADENA DE AISLADORES A LOS DOS MICROSEGUNDOS.

$$V_{sn2} = V_{pn2} - K_C \cdot V_{Treal2} \quad \text{en kV.}$$

K_C : Factor de acoplamiento entre cables de guarda y conductores de fase.

4.20. CORRIENTE CRITICA QUE PRODUCE ARCO SUPERFICIAL EN EL AISLAMIENTO A LOS DOS MICROSEGUNDOS

Este valor de corriente se expresa en por unidad, por lo que se obtiene dividiendo el voltaje resistido en el aislamiento por el voltaje que aparece en la cadena de aislamiento de la fase en estudio para 2 microsegundos.

$$I_{critica2} : \frac{V_{2us}}{V_{sn2}}$$

4.21. CÁLCULO DE VOLTAJES PARA SEIS MICROSEGUNDOS

Al igual que se calcularon los diferentes voltajes en el tope de la torre, en la resistencia de puesta a tierra y en la cruceta para un tiempo de dos microsegundos, se tiene también voltajes a los seis microsegundos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{T6} = V_{R6} = V_{pn6} = \frac{Z_S \cdot R}{Z_S + 2 \cdot R} \cdot I \quad ; I = 1\text{kA (pu)}$$

Estos valores en pu para seis microsegundos, se debe a que la corriente ha alcanzado el valor de cresta y descendido por la torre después de que el efecto de la impedancia de impulso haya desaparecido.

4.22. VOLTAJE REFLEJADO EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS SEIS MICROSEGUNDOS

Debido a las reflexiones de las torres adyacentes en el tope de la torre donde incide el rayo se produce un voltaje reflejado el mismo que se determina a los seis microsegundos por medio de la siguiente expresión:

$$V_{rT6} = -4 \cdot K_S \cdot Z_S \cdot \left(\frac{R}{Z_S + 2 \cdot R} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot R}{Z_S + 2 \cdot R} \right)$$

K_S : Se utiliza para tomar en cuenta el efecto amortiguador sobre las ondas viajeras que se desplazan por el cable de guarda de guarda. Se asume un valor de 0.85.

V_{rT6} : Componente del voltaje reflejado en seis microsegundos [kV].

4.23. VOLTAJE EN LA CADENA DE AISLADORES A LOS SEIS MICROSEGUNDOS

$$V_{sn6} = [V_{T6} + V_{rT6}] \cdot (1 - K_C) \quad ; \text{ en kV.}$$

K_C : Factor de acoplamiento entre cables de guarda y conductores de fase ecuación (4.39).

4.24. SELECCIÓN DE CORRIENTE CRÍTICA INCLUYENDO EL EFECTO DEL VOLTAJE A FRECUENCIA INDUSTRIAL

La selección de esta corriente I_{cm} con menor valor se logra comparando la corriente crítica a dos microsegundos y la corriente crítica a seis microsegundos.

Se obtendrá un valor crítico de corriente por cada fase. Con estos valores se debe analizar el efecto del voltaje a frecuencia industrial. Esto implica que se requiere un valor menor de corriente crítica de descarga del rayo ($I_{critica}$) para producir un arco superficial sobre la cadena de aisladores. El valor de esta corriente está determinado por la siguiente ecuación:

$$I_{critica} = \frac{V_{sn} - V_{on} \cdot \text{sen}(\theta_n - \alpha_n)}{V_{sn}} \cdot I_{cm}$$

$V_{on} \cdot \text{sen}(\theta_n - \alpha_n)$: Representa el valor de voltaje a frecuencia industrial.

V_{sn} : Voltaje del aislamiento cuando ocurre la corriente crítica con menor valor I_{cm} en la fase n.

V_{on} : Voltaje pico fase-tierra de la fase n.

θ_n : Ángulo asociado a la frecuencia angular (ωt).

α_n : Ángulo de desfase para la fase n: 0, $-2\pi/3$, $2\pi/3$.

En un ciclo completo de cada fase se puede determinar en que intervalo cada fase presenta su menor valor de corriente.

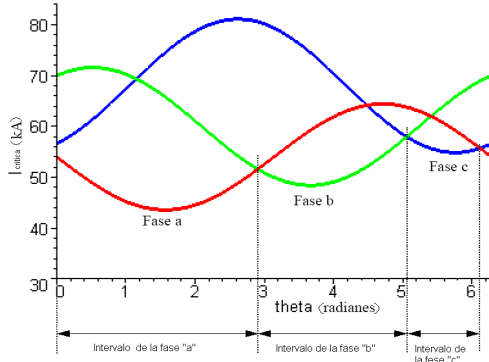


Figura 10: Intervalos de las fases donde son susceptibles a desarrollar contorneo.

4.25. CORRIENTE CRÍTICA PROMEDIO PARA CADA FASE

Como la corriente crítica calculada en el paso anterior es una función del tiempo, su valor cambia en el intervalo designado. Por tanto se necesita un solo valor, se realiza un promedio en ese intervalo y se obtiene integrando la ecuación de $I_{critica}$ en sus respectivos ángulos límites, quedándonos la siguiente expresión:

$$I_{pn} = I_{cm} \cdot \left(1 + \frac{V_o}{V_{sn}} \cdot \frac{\cos(\theta_2 - \alpha_n) - \cos(\theta_1 - \alpha_n)}{\theta_2 - \theta_1} \right)$$

θ_1, θ_2 : Ángulos límites de integración para cada una de las fases.

4.26. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE RAYOS CON CORRIENTE "IPN"

La probabilidad de ocurrencia de un rayo con corriente mayor o igual a un valor pico I se determina mediante la ecuación:

$$P(I \geq I_{pn}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{pn}}{31} \right)^{2.6}}$$

4.27. NÚMERO DE RAYOS QUE INCIDEN SOBRE LA TORRE

Por carecer de un mejor procedimiento, se adopta la guía del EPRI: 60% de los rayos inciden sobre la torre o tan cerca que pueden considerarse como "la torre sobre la cual caen los rayos". El restante 40 % caerán lejos de la torre y no se considerará su efecto por lo tanto se tiene la siguiente ecuación que nos simplifica los cálculos.

$$N_T = 0.6 \cdot (N_L - N_{FA})$$

N_L : Número total de rayos a la línea por 100 km / año.

N_{FA} : Número total de rayos que causan falla de apantallamiento por 100 km por año.

Para determinar el número de salidas que cada una de las fases puede provocar NFI_n , se multiplica el número de rayos que inciden en la torre por la probabilidad que cada una de ellas posee P_n .

$$NFI_n = P_n \cdot NT \quad NFI = \sum NFI_n$$

El número de salidas totales por flameo inverso será igual a la suma de las salidas que cada una de las fases ocasiona.

El desempeño ante descargas atmosféricas de una línea de transmisión entera está influenciada por el desempeño individual de cada torre, y por tanto el análisis de salidas será para cada una de las torres que componen la línea en estudio.

$$T = \frac{\sum T_n \cdot L_n}{\sum L_n}$$

T: Es la tasa total de salidas de servicio de la línea.

L_n : Es el tramo o vano de la torre en estudio.

T_n : Es la proporción de salidas de servicio computada para la torre en estudio.

5. DESARROLLO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL DEATLT

El programa DEATLT permitirá identificar en que porcentaje una torre aporta a la salida de operación de una línea, tomando en cuenta varios aspectos que afectan al número total de salidas como es la puesta a tierra de las torres, el vano existente (vano adelante y

vano atrás), La altitud (altura sobre el nivel del mar), El valor del radio corona de un conductor ya que mientras mayor sea la altitud mayor será este radio. El programa pretende tomar en cuenta los parámetros antes mencionados para calcular las salidas en cada una de las torres que conforman la línea y poder tomar las respectivas correcciones o soluciones para disminuir el fenómeno de flameo.

El programa se ha desarrollado en Visual Basic por ser un lenguaje de programación basado en objetos y a su vez presta un interfaz muy amigable con el usuario.

5.1. VARIABLES

Es importante identificar las variables que el usuario ingresará para los respectivos cálculos que realizará el programa, así como también las variables donde se almacenaran los resultados calculados para la visualización del usuario, las mismas que serán declaradas de manera global o publica para que se pueda tener acceso desde cualquier parte del programa.

Tabla 1: Variables de entrada del programa

NOMBRE	LÍMITE
Número de circuito	1 o 2
Zona	1 o 2
Número de cables de guarda	0,1,2
Nivel cerámico	>0
Longitud de la línea	>0
Voltaje fase-fase de la línea	>0
Longitud de la cadena de aisladores	>0
Resistencia de puesta a tierra	>0
Vano promedio	>0
Diámetro del conductor de fase	>0
Diámetro del cable de guarda	>0
Flecha del cable de guarda	>0
Flecha del conductor de fase	>0
Posición de los conductores de fase	>0
Posición de los conductores de fase	Real
Número de conductores por haz	1,2,3,4
Distancia entre conductores en el haz	>0
Posición de los conductores de fase	Real
Número de torres	>0 y <500
Tipo de torre	1,2,3
Altura de la torre	>0
Radio de la torre	>0
Distancia entre soportes	>0
Altura sobre el nivel del mar	>0

5.2. INTERFAZ

La interfaz que se utiliza en este trabajo entre el usuario y el programa DEATLT es a través del hardware común que posee una computadora personal (Mouse, teclado, monitor, impresora) donde por medio de imágenes y objetos pictóricos (iconos, ventanas...)

además de texto mostrados en la pantalla del monitor, el usuario puede interactuar con el programa, ingresando datos e información necesaria, manipulando los botones y visualizando los resultados

Para el ingreso de datos se clasifica en cuatro grupos cada uno en su respectiva ventana.

- Datos generales.
- Datos de los conductores de fase.
- Datos de los cables de guarda.
- Datos de las torres.

Para un mejor manejo del programa DEATLT se crea un archivo de ayuda para que el usuario pueda despejar sus dudas y utilizar este programa de la mejor manera.

5.3. CODIGO FUENTE

De acuerdo a lo expuesto en los ítems anteriores y con base al modelo electrogeométrico y el método de los dos puntos se a planteado en manera de algoritmo la forma de calcular los tipos de flameo, se desarrolla el código fuente según el lenguaje que Visual Basic 6.0 requiere.

6. APLICACIONES Y RESULTADOS

Para la aplicación del programa desarrollado se hará el análisis de la línea de transmisión Santa Rosa - Pomasqui I, la misma que se tiene torres desde los 2429 msnm hasta 4200 msnm aproximadamente y es un claro ejemplo de la variación de la altitud la misma que influye en el aislamiento.

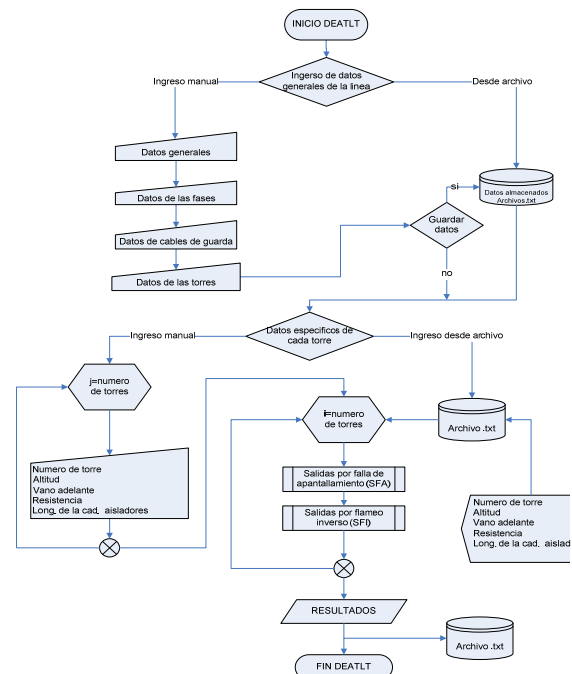


Figura 11: Diagrama de flujo general de DEATLT

Tabla 2: Datos generales de la línea I

Datos de la línea	
Número de circuitos	2
Número e cables de guarda	2
Zona	1
Nivel Ceraúnico	50
Longitud de la línea	45 km
Voltaje	230 kV.
Longitud de la cadena	3 m.
Resistencia de puesta a tierra	10 ohmios
Vano promedio	400m
Diámetro de los conductores	0,03202 m
Diámetro del cable de guarda	0,009144m
Haz de conductores	1
Tipo de torre	1
Número total de torres	85

Los datos generales necesarios para los cálculos internos del programa se ingresaran de acuerdo las ventanas lo vayan requiriendo.

Para ingresar los datos específicos de cada torre se recurre a la tabla de ubicación de estructuras o de estacamiento que cada una de las líneas de transmisión posee y se hace necesario crear un archivo con extensión .txt como lo indica en el manual y ayudas de este programa.

Una vez que se ha ingresado todos los datos requeridos y haciendo clic en el botón “graficar”, el programa muestra en forma gráfica los resultados calculados de acuerdo al modelo electrogeométrico y el método de los dos puntos (salidas de una línea por falla de apantallamiento y flameo inverso) para cada una de las torres que conforman la línea en estudio.

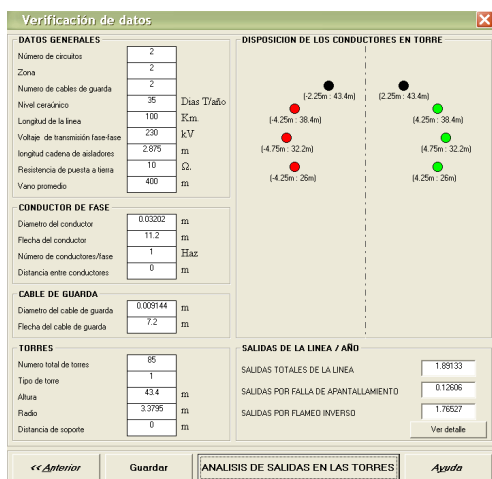


Figura 12: Resumen de datos generales y resultados de salidas de la línea

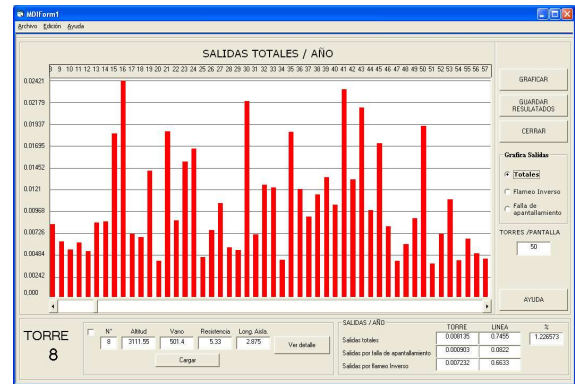


Figura 13: Resultado de salidas por torre

La siguiente figura muestra información relevante de cada torre de los tipos de salidas, como es las corrientes máximas y mínimas de producir flameo directo, las corrientes promedio y en qué porcentaje cada fase puede provocar salidas por flameo inverso, Las curvas indican el efecto que produce el voltaje a frecuencia industrial en la selección de las corrientes promedio de cada fase.

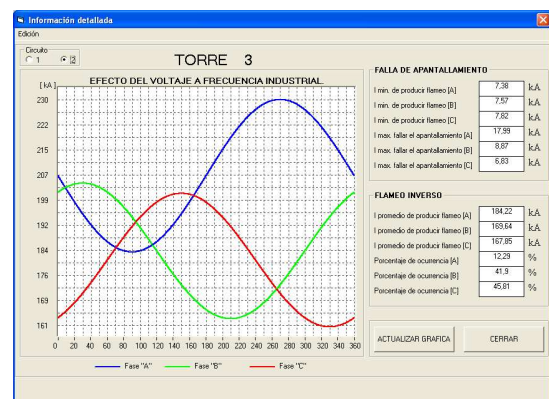


Figura 14: Valores de Corriente y efecto del voltaje a frecuencia industrial

7. CONCLUSIONES

- Cuando un rayo incide sobre una torre con su cable de guarda es importante estimar la respuesta en el tiempo del voltaje desarrollado en la torre con la finalidad de determinar el sobrevoltaje que puede aparecer en una cadena de aisladores que sostienen el conductor de fase. Si este sobrevoltaje iguala o supera la curva voltaje - tiempo del aislamiento de la línea entonces existe una probabilidad de ocurrencia de un arco superficial (flameo inverso) sobre la cadena de aislamiento. En la medida que el sobrevoltaje generado por la corriente de descarga del rayo sea mayor, la probabilidad de falla se eleva.
- Por medio del programa DEATLT se puede apreciar que las torres con mayor valor de resistencia tienen mayor número de salidas que puede ocasionar al año. De aquí surge la importancia de los sistemas de puesta a tierra y su correcto diseño, para garantizar la continuidad de servicio, con especial énfasis en zonas

geográficas con alto nivel cerámico y altas resistividades de suelo.

- El programa DEATLT da la suficiente información de una manera gráfica como también en archivo Excel de los porcentajes de salidas de operación de la línea de cada torre para tomar dediciones o cálculos necesarios y poder dar un mantenimiento preventivo a la torre en estudio, es así que el analista o usuario podrá variar ya en la práctica el parámetro que crea conveniente.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] ELECTRO PORCELANA GAMMA; Publicaciones técnicas; Método simplificado de los dos puntos para evaluar el comportamiento de una línea de transmisión ante descargas atmosféricas; Boletines N°09 y N°10; Colombia. 2005.

[2] RAKOV, V., UMAN, M. "Lightning: physics and effects" Cambridge University Press. ISBN 0 521 58327 6. Cambridge, UK 2003.

[3] IEEE TF ON FAST FRONT TRANSIENTS, Modeling Guidelines For fast Front Transients. IEEE Transacción on power Delivery, Volumen 11, Número 1, Enero 1996

[4] FURNAS CENTRAIS ELECTRICAS S.A. Transitorios Eléctricos de coordinación de aislamiento, aplicado en sistemas de potencia de alta tensión. Primera edición, Editorial Universitaria. Brasil. 1987.

[6] ENDESA; Publicaciones Técnicas; Curso de Líneas de Transmisión para profesionales; Determinación de la aislamiento en la estructura de líneas de transmisión; Quito-Ecuador.1974.

[7] Electro porcelana GAMMA; Publicaciones técnicas; Metodología para el aislamiento en una línea de transmisión; Boletines N°06 y N°07; Colombia. 2005.



Martín Montesdeoca Espín, nació en Ambato-Ecuador el 19 de Junio de 1981. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Técnico Superior San Vicente Ferrer. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero Eléctrico en el 2008. Actualmente desempeña el

cargo de Ingeniero Técnico de Diseño y Construcción en el área de líneas de transmisión de CELEC EP TRANSELECTRIC.

Áreas de interés: Líneas de Transmisión, Sistemas de Alto Voltaje.