

Ingenieros

Marco Soto y Vladimir Trelles

Noviembre , 2006

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

**PROGRAMA DIGITAL PARA EL ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL
CÁLCULO DE FALLAS POR APANTALLAMIENTO Y FLAMEO INVERSO
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

MARCO IVÁN SOTO LIMA

WILMAN VLADIMIR TRELLES ORDÓÑEZ

DIRECTOR: ING. RAUL CANELOS SALAZAR

Quito, noviembre 2006

DECLARACIÓN

Nosotros, Soto Lima Marco Iván, Trelles Ordoñez Wilman Vladimir, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Marco Iván Soto Lima

Wilman Vladimir Trelles Ordoñez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marco Iván Soto Lima y Wilman Vladimir Trelles Ordoñez, bajo mi supervisión.

ING. RAÚL CANELOS

CONTENIDO

CONTENIDO	1
RESUMEN.....	6
DESCRIPCIÓN Y PRESENTACIÓN	7
CAPÍTULO 1	9
GENERALIDADES ACERCA DE LA “DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SUS EFECTOS SOBRE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	9
1.2.1 FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA.....	10
1.2.1.1 Carga eléctrica en las nubes.....	10
1.2.1.2 Evolución de la descarga eléctrica.....	11
1.2.1.3 El trueno.....	12
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA ELÉCTRICA	14
1.4 MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	17
1.5 NIVEL CERÁUNICO	18
1.6 MECANISMOS PARA EL ESTUDIO DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	21
1.7 NÚMERO DE DESCARGAS EN UNA LÍNEA	23
1.7.1 DENSIDAD DE DESCARGAS.....	24
1.7.2 SOMBRA ELÉCTRICA	24
1.7.3 NÚMERO DE DESCARGAS DIRECTAS SOBRE LA LÍNEA	26
CAPÍTULO 2.....	27
APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	27
2.1 INTRODUCCIÓN	27
2.2 DEFINICIONES.....	27
2.2.1 APANTALLAMIENTO	27
2.2.2 CABLE DE GUARDA.....	28
2.2.3 ANGULO EFECTIVO.....	28
2.2.4 ANGULO DE APANTALLAMIENTO	28
2.3 GENERALIDADES.....	29
2.4 IMPORTANCIA DEL APANTALLAMIENTO.....	29
2.4.1 LÍNEAS SIN APANTALLAMIENTO	29
2.4.2 SIMULACIÓN DE UN LÍNEA SIN APANTALLAMIENTO	31
2.5 CRITERIOS DE APANTALLAMIENTO	33
2.6 MODELOS PARA EL ESTUDIO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE UNA LÍNEA.....	36
2.6.1 MODELO GEOMÉTRICO.....	36
2.6.1.1 Área no cubierta por el cable de guarda	36
2.6.1.2 Diseño del cable de guarda.....	39
2.6.1.3 Ángulo de Apantallamiento	39
2.6.1.4 Método para conseguir un apantallamiento efectivo	40
2.6.1.4.1 Distancia de impacto	41
2.6.1.4.2 Probabilidad de falla del apantallamiento	42

2.7 MÉTODO SIMPLIFICADO DE “LOS DOS PUNTOS” PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	46
2.7.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO	46
2.7.2 ESPECIFICACIÓN DEL MÉTODO.....	49
2.7.2.1 Simbología:	50
2.7.3 DESARROLLO	50
CAPÍTULO 3.....	61
FLAMEO INVERSO.....	61
3.1 GENERALIDADES FLAMEO INVERSO	61
3.2 DESCARGAS RETROACTIVAS (DESCARGAS DIRECTAS SOBRE POSTES, TORRES O CABLES DE GUARDA)	62
3.2.1 CÁLCULO DEL VOLTAJE A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO	63
3.2.2 ONDAS VIAJERAS.....	65
3.2.3 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE UNA TORRE	67
3.2.4 IMPEDANCIA DE LA PUESTA A TIERRA	67
3.3 MÉTODO SIMPLIFICADO DE “LOS DOS PUNTOS” PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS RETROACTIVA (BACK- FLASHOVER)	68
3.3.1 ESPECIFICACIÓN DEL MÉTODO.....	72
3.3.2 SIMBOLOGÍA:	74
3.3.3 DESARROLLO DEL MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DEL SOFTWARE.....	75
CAPITULO 4.....	102
SALIDAS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	102
4.1 GENERALIDADES.....	102
4.2 CAUSAS DE SALIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	103
1.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LÍNEAS REALES UTILIZANDO EL CSAFILT.....	103
1.4 OBSERVACIONES	104
CAPÍTULO 5.....	101
CSAFILT	101
5.1 QUE ES EL CSAFILT.....	101
5.2 INSTALACIÓN DEL CSAFILT	101
5.3 UTILIZANDO EL CSAFILT	101
5.3.1 COMENZANDO A UTILIZAR EL CSAFILT	101
5.3.2 CREACIÓN DE REPORTE.....	104
5.3.3 DESCARGAS QUE CAERÁN SOBRE UNA LÍNEA	104
5.3.4 NÚMERO DE SALIDAS VS RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	105
5.4 PREGUNTAS FRECUENTES.....	105
5.4.1 ¿COMO CARGAR LOS DATOS ANTERIORES?	105
5.4.2 ¿GENERACIÓN DE REPORTE EN OTROS FORMATOS?	106
5.5 CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DEL CSAFILT	108
CAPITULO 6.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

TABLA DE ANEXOS

ANEXO No 1	115
CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DE LA SIMULACIÓN DE LOS RAYOS QUE CAEN EN UNA LÍNEA.....	115
ANEXO No 2	118
MÉTODO NUMÉRICO QUE PERMITE CALCULAR LOS PORCENTAJES EN QUE CADA FASE ESTA EL NIVEL MAS BAJO.....	118
ANEXO No 3	120
REPORTES DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS REALES.....	120
ANEXO No 4	182
CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DEL CSAFILT	182

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	13
EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA ELÉCTRICA.....	13
FIGURA 1.2.....	15
CURVA TÍPICA DEL PORCENTAJE DE RAYOS EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE DESCARGA.....	15
FIGURA 1.3	16
DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO DE CRESTA EN LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS....	16
FIGURA 1.4.....	17
CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA DESCARGA ELÉCTRICA	17
FIGURA 1.5	19
NIVELES ISOCERÁUNICOS A NIVEL MUNDIAL	19
FIGURA 1.6.....	20
NIVELES ISOCERÁUNICOS DEL ECUADOR	20
FIGURA 1.7	23
PROCESO DE LA DESCARGA SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	23
FIGURA 1.8.....	25
SOMBRA ELÉCTRICA DE LA LÍNEA	25
FIGURA 2.1	28
ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO	28
FIGURA 2.2.....	30
ZONA DE ATRACCIÓN DE RAYOS O SOMBRA ELÉCTRICA.....	30
FIGURA 2.3.....	35
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL CABLE DE TIERRA, SEGÚN PEEK	35
FIGURA 2.4	35
DETERMINACIÓN DEL ESPACIO PROTEGIDO SEGÚN SCHWAIGER	35
FIGURA 2.5	37
MODELO ELECTROGEOMÉTRICO PARA ANÁLISIS DE FALLAS POR APANTALLAMIENTO.....	37
FIGURA 2.6.....	41
GUÍA PARA EL DISEÑO DEL CABLE DE GUARDA	41

FIGURA 2.7	44
POSICIÓN DEL CABLE DE GUARDA, (C_G) DEL CONDUCTOR (C_F) Y DEL TERRENO.....	44
FIGURA 2.8	46
FORMA DE ONDA DE INTENSIDAD DE DESCARGA	46
FIGURA 2.9	47
ONDA NORMALIZADA DEL RAYO	47
FIGURA 2.10	49
ESQUEMATIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA.....	49
FIGURA 2.11	53
CURVA POR EL MÉTODO CIGRE DE TENSIÓN VS. TIEMPO PARA FLAMEO DEL AISLAMIENTO	53
FIGURA 2.12	59
CURVA POR EL MÉTODO DEL CIGRE DE TENSIÓN VS. TIEMPO PARA FLAMEO DEL AISLAMIENTO.....	59
FIGURA 3.1	63
DESCARGA ATMOSFÉRICA SOBRE EL CABLE DE GUARDA A LO LARGO DEL VANO Y SOBRE LA ESTRUCTURA	63
FIGURA 3.2	69
INCIDENCIA DE UN RAYO SOBRE UNA TORRE EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	69
FIGURA 3.3	71
SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DESCARGA EN LA TORRE Y EN EL VANO (ANÁLISIS CON EMTP)	71
FIGURA 3.4	72
FORMA DE ONDA DE CORRIENTE USADA PARA SIMULAR LA DESCARGA ...	72
FIGURA 3.5	73
TENSIÓN (p.u) DEL AISLAMIENTO SEGÚN LA CURVA V(Voltaje)-T(Tiempo) CONSIDERANDO O NO, LAS ONDAS DE TENSIÓN REFLEJADAS	73
FIGURA 3.6	76
ESTRUCTURA PARA DOS HILOS DE GUARDA	76
FIGURA 3.7	77
ESTRUCTURA PARA UN SOLO CIRCUITO	77
FIGURA 3.8	79
ESTRUCTURA PARA DOS CIRCUITOS	79
FIGURA 3.9	81
ESTRUCTURA CON UN SOLO CIRCUITO Y CON DOS HILOS DE GUARDA	81
FIGURA 3.10	84
ESTRUCTURA CON DOS CIRCUITOS Y CON DOS HILOS DE GUARDA.....	84
FIGURA 3.11	87
TIPOS DE ESTRUCTURAS CON SUS RESPECTIVAS IMPEDANCIAS CARACTERÍSTICAS.....	87
FIGURA 3.12	88
TORRES ADYACENTES CONECTADAS AL CONDUCTOR DE GUARDA A UNA DISTANCIA DEL VANO V.....	88
FIGURA 3.13	89
ESTRUCTURA DE SUSPENSIÓN.....	89
FIGURA 3.14	90
ESTRUCTURA DE RETENCIÓN	90

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA 1.....	51
NIVELES CERÁMICOS DEL ECUADOR.....	51
TABLA 2.....	55
PARÁMETROS MAS UTILIZADOS PARA LA ECUACIÓN S_{min}	55
TABLA 3.....	55
FACTOR β PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ALTO VOLTAJE.....	55
TABLA 4.....	68
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA PARA PIE DE TORRE.....	68

RESUMEN

En este trabajo se realizara un análisis completo de las causas que provocan las salidas de una línea de transmisión debido a descargas atmosféricas, se ha realizado 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 desarrollado de una manera resumida, fácil y didáctica el método de los dos puntos dado por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para el calculo de la salidas de una línea debida a descargas atmosféricas; se a elabora un software que permite realizar el calculo de cuantas salidas tendrá una línea debido a rayos; también de manera didáctica, 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 comparar resultados para de esta mane obtener conclusiones.

Como resultado de este trabajo se ha elaborado el presente documento, dividido en seis capítulos, con cuatro anexos y un software.

DESCRIPCIÓN Y PRESENTACIÓN

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.

Esta Tesis está dedicada al cálculo probabilístico de las 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, pudiendo inducir en ésta tensiones 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 por donde transcurre la línea.

Y permitir a los ingenieros, realizar un cálculo aproximado y rápido de las salidas que tendrán las líneas de transmisión debidas a descargas atmosféricas y flameos inversos, lo que le permitirá tomar decisiones en el diseño y control de estos fenómenos.

Y su finalidad es 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.

El capítulo uno describe las generalidades de “las descargas atmosféricas”.

El capítulo dos trata sobre; el apantallamiento de una línea, conceptos generales, modelos que se utilizan para su estudio, y en detalle se muestra el modelo empleado para la elaboración del CSAFILT (Cálculo y simulación del Apantallamiento y Flameo Inverso en líneas de Transmisión).

En el capítulos tres se trata sobre el flameo inverso, conceptos generales, y los modelos que se emplea para su calculo, y se detalla el proceso que sigue el CSAFILT para el calculo de las salidas provocadas por flameos inversos.

El capítulo cuatro representa la cantidad de veces saldrá una línea, fuera de servicio esto es la suma de las salidas debidas a fallas de apantallamiento más las salidas provocadas por flameos inversos, y se compara los resultados dados por el CSAFILT con los dados por líneas reales en el campo.

En el capítulo cinco se presenta el manual de usuario del CSAFILT.

En el capítulo seis se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Los anexos contienen información que sirve como complemento a lo tratado y se anexa el código fuente principal del CSAFILT.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES ACERCA DE LA “DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”

1.1 INTRODUCCIÓN

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.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SUS EFECTOS SOBRE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Hacia la mitad del siglo XVIII Benjamín Franklin demostró por primera vez la naturaleza eléctrica del rayo. Elevando una cometa en medio de una tormenta eléctrica y conduciendo una descarga hasta un condensador (botella de Leyden), demostró que había almacenado algo que presentaba el mismo comportamiento que las descargas eléctricas (que se generaban en esa época por fricción). Simultáneamente en otros lugares del mundo se realizaban investigaciones similares como la del científico ruso Giorgi W. Richman, quien pereció electrocutado en una de sus pruebas.

Más tarde, el mismo B. Franklin inventaría el pararrayos, para defender las edificaciones y personas de los efectos del rayo.

Cuando a principios del siglo XX, aparecieron las primeras líneas de transmisión, volvió el rayo a causar problemas que representaban grandes perjuicios al transporte de energía eléctrica; desde entonces comienzan proyectos de investigación de gran magnitud.

Con la construcción en los años veinte de las primeras líneas a 220 kV se empieza a considerar importante la realización de mapas isoceráunicos, se van perfeccionando cada vez más las metodologías de recolección y procesamiento de datos de salidas de las líneas y se va adquiriendo una buena comprensión del efecto de las descargas atmosféricas sobre las líneas.

Sin embargo, hoy se hace necesario emprender proyectos que eviten el alto número de salidas en algunas líneas y elaborar un diseño más apropiado de líneas futuras, para evitar tanto exceder un número establecido de salidas, como también, el sobredimensionamiento que se hace evidente en un número de aisladores exagerado.

1.2.1 FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA

1.2.1.1 Carga eléctrica en las nubes

Las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12 km). Al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV entre nubes y tierra.

La descarga se forma en nubes de tormenta del tipo cumulo-nimbus. Estas se caracterizan por estar formadas por columnas de aire caliente que ascienden por convección, cuando la atmósfera se hace inestable, debido a grandes gradientes de temperatura. El interior de esas nubes, es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendente y descendente de velocidades hasta de 300 km.

La carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo en partículas ionizadas. La carga se concentra en un disco de un diámetro de 10 km, y una altura aproximada de 5 km. Esta carga es en la mayoría de los casos predominantemente negativa.

A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente crítico, (30 kV en aire seco, 10 kV en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes). Se empieza a presentar ionización del aire y por lo tanto, se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra.

1.2.1.2 Evolución de la descarga eléctrica

El camino de ionización que se inicia, lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas. Este primer flujo es llamado el líder. El líder desciende unos 50 a 100 m en un microsegundo, detiene su marcha unos 50 microsegundos mientras se acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del líder ver figura 1.1. Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el **líder escalonado**. Este sigue avanzando hasta llegar cerca de los objetos y estructuras más altos, los cuales empiezan a emitir chispas que van al encuentro del líder.

Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la **descarga de retorno** de gran luminosidad, etapa del rayo considerada como la más energética de todas.

Luego, con intervalos de 0,01 a 0,1 segundos se producen nuevos flujos de electrones hacia abajo, abriéndose paso por el camino ionizado que dejó el líder escalonado. Estos son los **líderes rápidos** que al golpear tierra producen descargas de retorno menos energéticas que la primera. En un rayo es típico que existan tres o cuatro líderes, pueden existir hasta 20 o 30.

El canal de la descarga en cuyo interior existe un hilo conductor de plasma, puede llegar a temperaturas de 30.000 °C y la presión del aire subir hasta 100 atmósferas. El diámetro del canal es de unos 10 cm.

La descarga de una nube puede generar nuevas reparticiones de carga en la atmósfera, presentándose descargas horizontales entre varias nubes de tormenta. Es posible por lo tanto, que se desencadene otra descarga atmosférica de similar ubicación a la anterior, que utilice los mismos caminos ionizados que dejó la primera.

1.2.1.3 El trueno

“El trueno es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente”, [18] de el, se puede extraer información sobre la localización, tamaño y orientación del rayo.

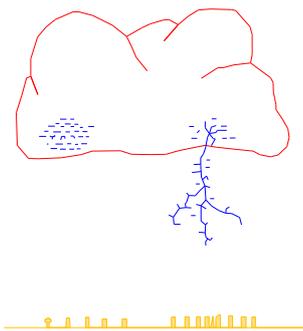
Una teoría aceptada del trueno y sus principales rasgos, solo existe desde hace unos 25 años.

El aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque. Posteriormente, esta onda se vuelve energía acústica produciéndose el trueno. Cada componente del rayo (el líder escalonado, los líderes rápidos y las descargas de retorno), contribuyen al trueno. Los componentes más energéticos producen las frecuencias más bajas del sonido, estas frecuencias bajas se atenúan menos que las altas ya que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia, por ello un rayo no muy energético puede no oírse a 10 km.

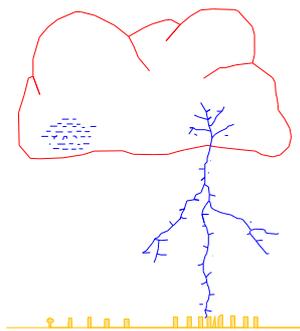
El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de la descarga en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información.

La siguiente figura muestra la evolución de la descarga eléctrica, la cual tiene una duración promedio de 0,32 segundos.

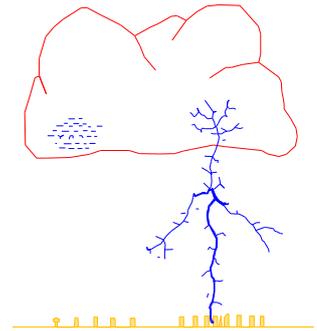
FIGURA 1.1
EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA ELÉCTRICA



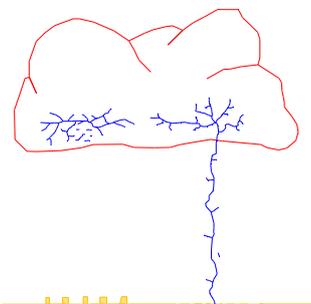
a) Propagación de líder escalonado



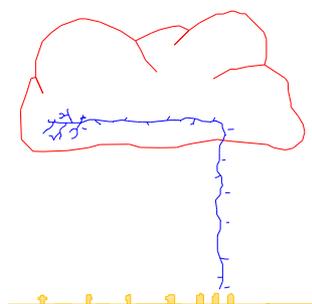
b) Descarga piloto a punto de golpear el terreno



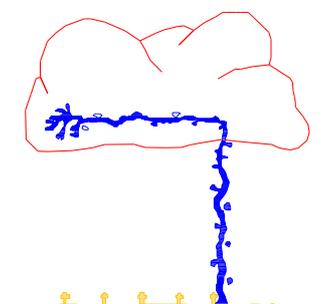
c) Descarga de retorno de gran intensidad



d) Flujo de carga entre centros cargados al interior de la nube por descarga del primer centro



e) Líder rápido a punto de golpear el terreno



f) Descarga de retorno menos fuerte que la inicial

FUENTE: Electrical Transmission and Distribution Referente Book.

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA ELÉCTRICA

Al impactar la descarga “de retorno” la línea de transmisión, produce corrientes altísimas que aumentan en unos pocos microsegundos. Se presentan corrientes pico entre 20 y 200 kA, aunque estas últimas son muy raras. La probabilidad de que se produzca una descarga mayor o igual a una determinada magnitud de corriente, se puede obtener de la figura 1.2.

Para el comportamiento del sistema ante la descarga, es importante la tasa de aumento de la corriente proveniente del rayo. Se suele suponer en los cálculos, que la corriente aumenta linealmente desde cero hasta el valor pico en forma de rampa, con un determinado tiempo de duración (tiempo de frente, o de cresta), que se estabiliza un instante en el valor pico y luego decrece más lentamente hasta volver a cero.

Curvas típicas del porcentaje de rayos en función de la corriente de descarga:

A – De la AIEE “*American Institute of Electrical Engineers*” (1950)

B – De Popolansky (1972)

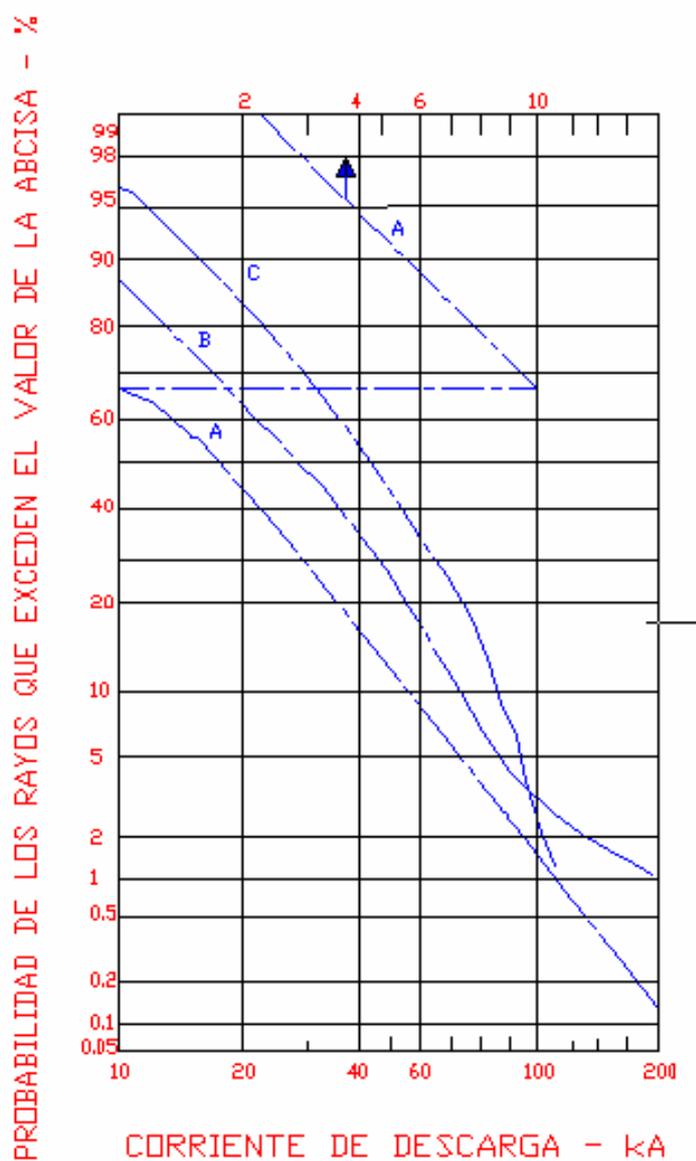
C – De Anderson (1978)

La probabilidad de un determinado tiempo de frente de la descarga se observa en la figura 1.3.

Las características de corriente son diferentes cuando el objeto golpeado sobresale excesivamente del suelo. Así las mediciones hechas en el *Empire State Building* revelan valores de corriente diferentes a los mencionados, y aún mecanismos diferentes de la descarga. En estos casos el líder no sale de la nube sino del objeto alto.

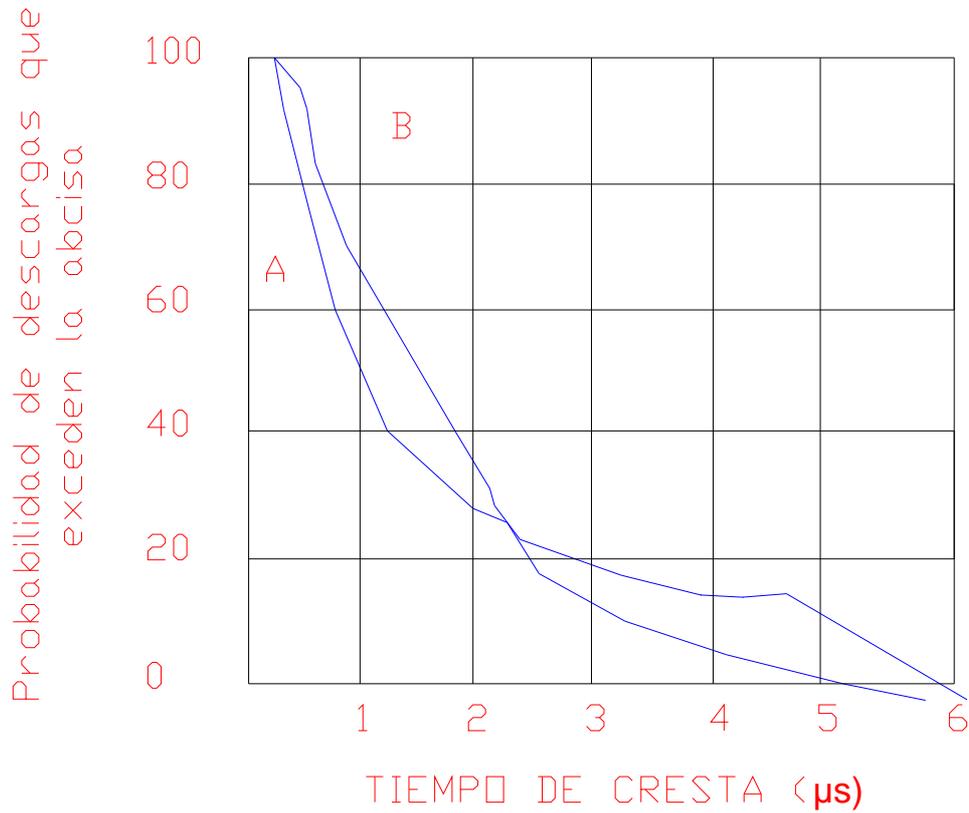
La probabilidad de ocurrencia de un rayo con corriente mayor o igual aun valor pico se muestra en la siguiente figura.

FIGURA 1.2
CURVA TÍPICA DEL PORCENTAJE DE RAYOS EN FUNCIÓN DE LA
CORRIENTE DE DESCARGA



FUENTE: Castillo, G. y otros. "Metodología de diseño de aislamiento por descargas Atmosféricas en líneas de transmisión".

FIGURA 1.3
DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO DE CRESTA EN LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS



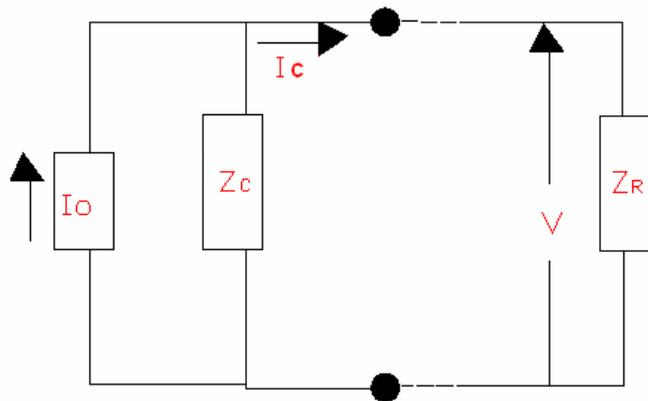
A – De Mc Echaron

B – De Anderson

Para el valor de la corriente también se observó dependencia con respecto a la impedancia característica, tanto del sistema golpeado como del canal de la descarga. Ver figura 1.4.

FUENTE: Castillo, G. y otros. "Metodología de diseño de aislamiento por descargas Atmosféricas en líneas de transmisión".

FIGURA 1.4
CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA DESCARGA ELÉCTRICA



I_o : Corriente de descarga prospectiva (fuente de corriente constante).

I_c : Corriente de descarga en la impedancia Terminal (Z_R).

Z_c : Impedancia característica del canal de descarga.

Z_R : Impedancia característica resultante.

V : Tensión sobre el objeto golpeado.

FUENTE: Castillo, G. y otros. "Metodología de diseño de aislamiento por descargas Atmosféricas en líneas de transmisión".

1.4 MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Son incontables las herramientas que se han utilizado para medir las corrientes y voltajes de los rayos, desde los usados en 1910 y 1930 como el klidonógrafo, el oscilógrafo, la cámara de Boys, los medidores de corriente de cresta (*magnetic links*), hasta los sofisticados equipos utilizados por el proyecto francés del Massif Central de producción y medición de rayos "artificiales". Allí se emplean *magnetic links*, registradores de campo eléctrico y magnético cada uno con varios osciloscopios y equipo fotográfico integrado, goniómetro para localizar relámpagos; contadores CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos) de relámpagos; medidores del campo de tierra (*field mills and radioactive probe electrometer*) y equipo fotográfico y acústico.

1.5 NIVEL CERÁUNICO

El nivel ceráunico 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 ceráunicos se suelen llevar a mapas isoceráunicos, es decir, a mapas con curvas de igual nivel ceráunico.

La comparación del mapa isoceráunico de Ecuador con el de Europa y aún el de EE.UU. muestra la magnitud que este problema tiene para nosotros figura 1.5 y figura 1.6.

La densidad de descargas a tierra, esta relacionado al nivel isoceráunico por la relación:

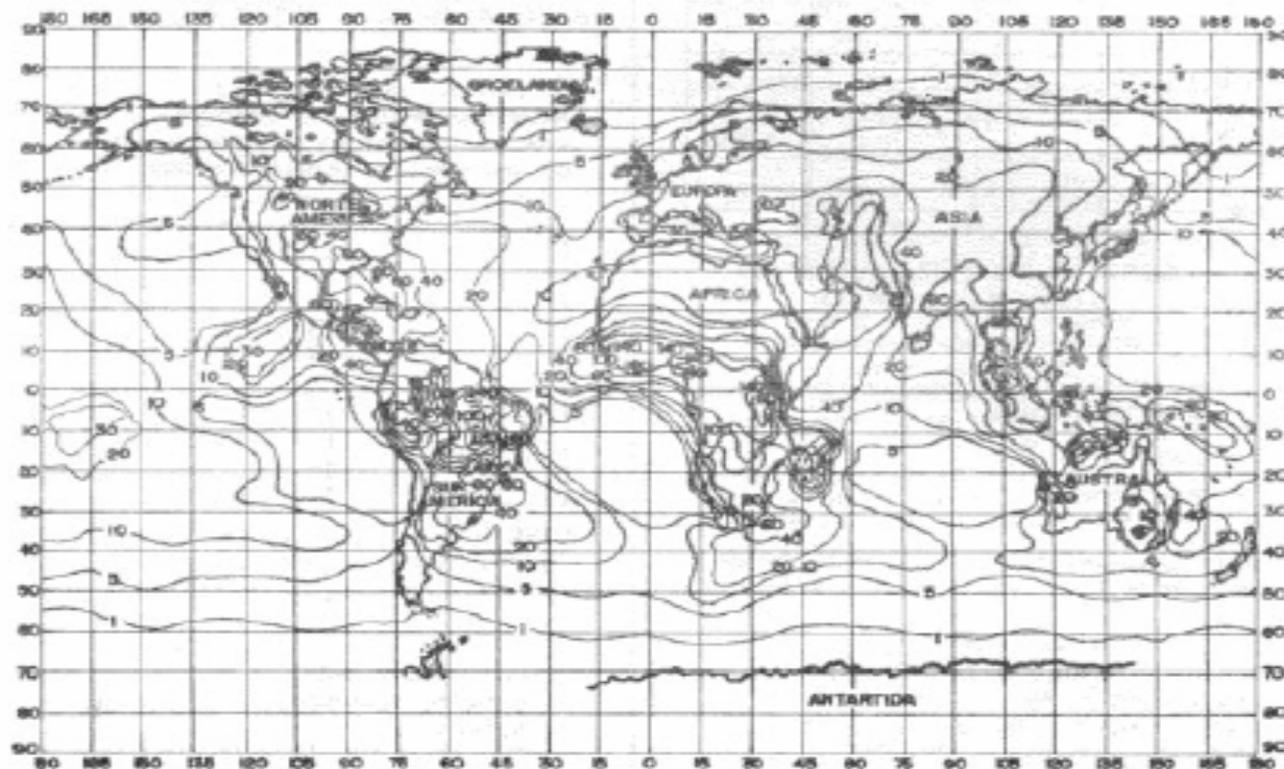
$$N_o = C * NI \quad \text{descargas / km}^2 \text{ por año} \quad (1.1)$$

No: densidad de descargas a tierra.

C: Constante para una determinada región tiene valores entre 0,1 y 0,2

NI: Nivel isoceráunicos.

FIGURA 1.5
NIVELES ISOCERÁUNICOS A NIVEL MUNDIAL



FUENTE: <http://www.ucv.ve/comir/documentos/habitat%20y%20riesgo/ASPECTOS%20ACADEMICOS/PONENCIAS/9.-PROPUESTA%20ACADEMICA%20PARA%20FORMAR%20UN%20GRUPO%20INTERDISC%20Carmen%20V%C3%A1squez%20UNEXPO%20Vzla.pdf>

1.6 MECANISMOS PARA EL ESTUDIO DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Mediante observaciones y experimentos en laboratorios se ha llegado a determinar expresiones matemáticamente que ayudan a explicar la mecánica de las descargas atmosféricas, que al mismo tiempo cuantifican sus influencias y efectos.

Un concepto de mucha importancia para el desarrollo del presente trabajo es la llamada “Distancia Crítica de arqueo” (*Strike distance*). Esta distancia es la que existe desde el punto de encuentro de las guías descendentes y ascendentes, hasta el punto en tierra de donde partió la guía ascendente. En otras palabras la descarga completa tiene lugar en dos etapas: en la primera, el líder o guía descende de la nube sin influencia de objetos en tierra, hasta cierta distancia; en la segunda, una guía ascendente parte del objeto en tierra hasta encontrar la descendente.

Se ha determinado que esta distancia es función de la magnitud de la corriente de descarga. La relación entre la distancia de arqueo y la magnitud de la corriente de descarga fue encontrada por una serie de dependencias.

$$V = V(I) \tag{1.2}$$

$$V_s = V_s(I, V) \tag{1.3}$$

$$R_s = R_s(V_s) \tag{1.4}$$

$$\text{Entonces: } R_s = R_s(I) \tag{1.5}$$

Unas primeras aproximaciones fueron encontradas [7] a base de estudios realizados por Wagner [4], [9] y están dadas por las siguientes expresiones:

$$V = \frac{I^{\frac{1}{3}}}{13,4} \quad (1.6)$$

$$V_s = 0,276 * \frac{I}{V} \quad (1.7)$$

$$R_s = 1,4 * V_s^{1.2} \quad (1.8)$$

$$\text{De donde: } R_s = 6,72 * I^{0.8} \quad (1.9)$$

- V: Velocidad de retorno de la descarga en por unidad de la velocidad de la luz.
- Vs: Voltaje del líder o guía de la descarga (Megavoltios).
- Rs: Distancia crítica de arqueo (metros).
- I: Magnitud de la corriente de descarga (kiloamperios).

Se ha demostrado [9] que la velocidad de retorno de la corriente de descarga depende solamente de su magnitud y no de la velocidad con que está alcanza su máximo valor, por lo que las expresiones (1.6) a (1.9) fueron obtenidas a base de considerar ondas rectangulares que se mueven a velocidad constante.

Una nueva aproximación de la distancia crítica de arqueo fue determinada por Whitehead y utilizada en su trabajo sobre apantallamiento de líneas de transmisión. [6].

Esta expresión es:

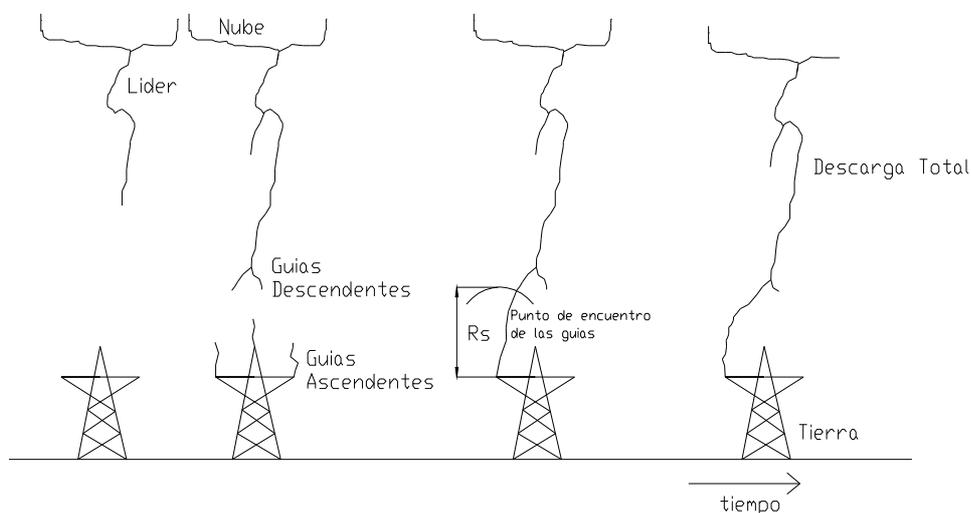
$$R_s = 7.1 * I^{\frac{3}{4}} \quad (1.10)$$

Rs en metros y I en kA.

Para esta tesis R_s lo representaremos con la letra S en el siguiente capítulo se explicará con más detalle.

En la figura 1.7 se muestra en forma gráfica el proceso de la descarga sobre una línea de transmisión.

FIGURA 1.7
PROCESO DE LA DESCARGA SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN



FUENTE: Riofrío Carlos., "Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.- Modelos de análisis", Escuela Politécnica Nacional, 1977.

1.7 NÚMERO DE DESCARGAS EN UNA LÍNEA

El número de descargas a una línea de transmisión para un nivel isocerámico dado no es conocido actualmente con mucha certeza, porque el problema es de naturaleza estadística, [10] por lo tanto los métodos aquí expuestos en los cuales este número se encuentra determinísticamente, da solo una aproximación al valor medio de la distribución.

Se parte de considerar una densidad de descargas (número de descargas sobre kilómetro cuadrado) uniforme para una región con nivel cerámico constante, a partir de esta densidad se determinará el número de descargas

interceptado por la línea de transmisión. Para ver esto de una manera didáctica se programado por computador una simulación, en la cual se ve claramente los rayos que golpearán a una línea según las condiciones de esta (nivel cerámico y geometría de la línea), esto se explicará en detalle en el siguiente capítulo.

1.7.1 DENSIDAD DE DESCARGAS

Esta densidad esta dada por el número de descargas por kilómetro cuadrado al año (N_g) y es proporcional al nivel isocerámico.

$$N_g = K.T \quad (1.11)$$

- Ng: Número de descargas por km² por año.
 T: Nivel cerámico
 K: Constante determinada con base en investigaciones de campo

Para nuestro país se ha tomado una constante de 0,12 porque es el recomendado por la IEEE-EPRI (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Electric Power Research Institute*) para zonas como las nuestras.

1.7.2 SOMBRA ELÉCTRICA

Se considera que la zona de influencia de una línea, llamada sombra eléctrica ver figura 1.8 o ancho de banda de atracción, depende de la altura del punto más alto de la línea sobre el terreno, que es el cable de guarda y de la distancia horizontal entre cables de guarda, si existe más de uno.

$$A = 4h + b \quad (1.12)$$

- A: Ancho de la sombra eléctrica.
 b: Distancia horizontal entre cables de guarda.

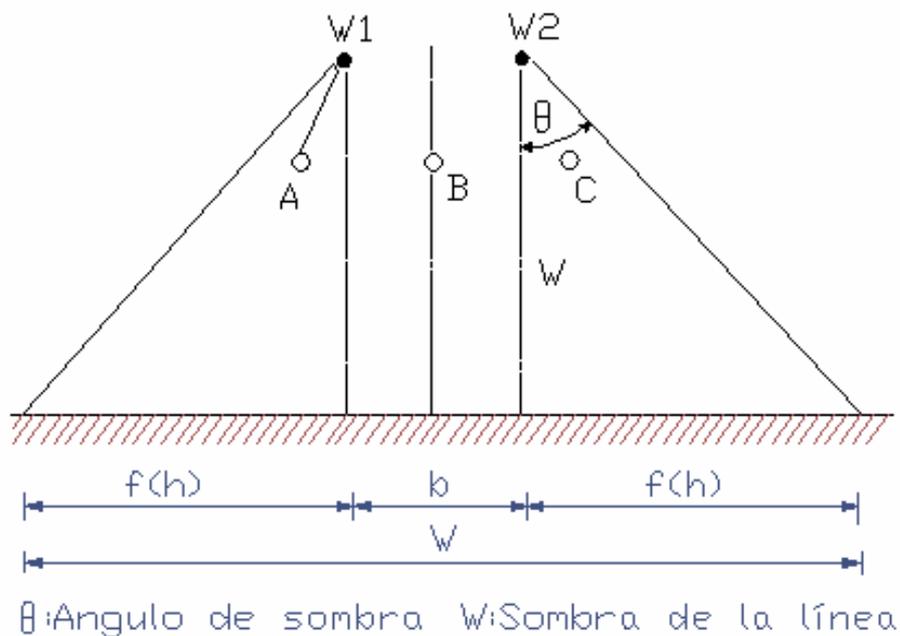
h: Altura efectiva sobre el terreno del cable de guarda.

La altura efectiva tiene en cuenta que la altura del cable varía desde h_g en la torre, hasta h_{gv} en la mitad del vano. Si el vano es plano:

$$h = h_g - \frac{2}{3}(H_g - h_{gv}) \quad (1.13)$$

Se debe tener en cuenta que no está cuantificada la influencia del paso de la línea por un terreno boscoso, el cual disminuye su altura efectiva, ni tampoco que la línea pueda estar en el borde de una montaña muy alta, lo que aumenta la posibilidad de la intercepción de los rayos.

FIGURA 1.8
SOMBRA ELÉCTRICA DE LA LÍNEA



FUENTE: Documento NE-86-03: Guía de Diseño Estructural para líneas de transmisión – Preliminar, Septiembre de 1986.

1.7.3 NÚMERO DE DESCARGAS DIRECTAS SOBRE LA LÍNEA

Es el producto de la densidad de descargas a la zona por la línea de influencia de esta. Si queremos determinar el número de descargas a la línea por 100 km de longitud, N_L , será entonces:

$$N_L = N \left(\frac{A}{1000} \right) * 100 \quad (1.14)$$

N_L : Número de descargas sobre la línea por 100 km por año.

N : Descargas por km^2 – año.

A : Sombra eléctrica en metros.

CAPÍTULO 2

APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

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.

2.2 DEFINICIONES

2.2.1 APANTALLAMIENTO

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.

2.2.2 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 atraer los rayos y mandarlos a tierra.

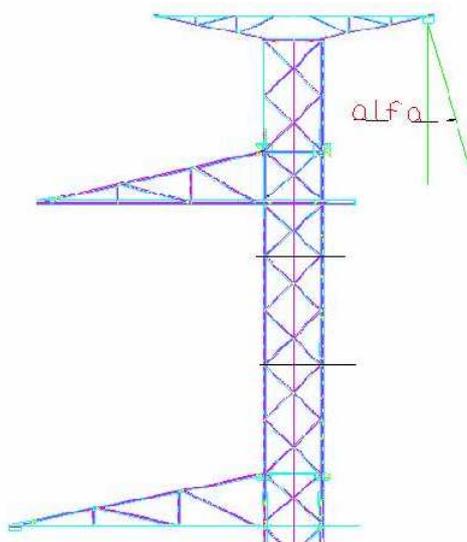
2.2.3 ANGULO EFECTIVO

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%.

2.2.4 ANGULO DE APANTALLAMIENTO

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

FIGURA 2.1
ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO



2.3 GENERALIDADES

El comportamiento de una línea de transmisión frente a las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas se mide por el número de salidas que éstas pueden provocar.

Las descargas directas a los conductores de fase producen los más altos sobrevoltajes para una cierta corriente de descarga. Un valor aproximado del potencial del conductor en el punto de descarga es fácilmente calculado bajo la consideración de que la magnitud de la corriente de descarga (I) es afectada muy poco por el valor de la impedancia Terminal la cual, en este caso, es la mitad de la impedancia transitoria del conductor de fase (Z_o) por cuanto la corriente inyectada fluye en ambas direcciones. [24]

$$\text{Entonces: } V = \frac{1}{2}IZ_o \quad (2.1)$$

Una corriente de descarga tan baja como 10 kA, (la cual de acuerdo a la figura 1.2, capítulo 1; curva A) tiene una probabilidad de ser excedida del 65%) causará un sobrevoltaje de 2000 kV, para un valor de $Z_o = 400 \Omega$. Si se toma en cuenta las curvas B y C de la figura 1.2, aproximadamente un 90% de las corrientes de descarga excederá de 10 kA.

2.4 IMPORTANCIA DEL APANTALLAMIENTO

La importancia de apantallar una línea de transmisión se puede observar al realizar una simulación y ver cuantas salidas tendría la línea si no tuviera un cable de guarda.

2.4.1 LÍNEAS SIN APANTALLAMIENTO

La evaluación del número de salidas de una línea sin cables de guarda puede realizarse en forma sencilla mediante el siguiente análisis:

- a. Determinar el número de descargas sobre la línea en base a una cierta zona de “atracción” dada por la siguiente relación:

$$N_D = N_o(4 * h + b')L \quad (2.2)$$

Donde: N_D : Número de descargas sobre la línea.

N_o : Densidad de descargas a tierra, dado por la expresión (1.1); Descargas / km².

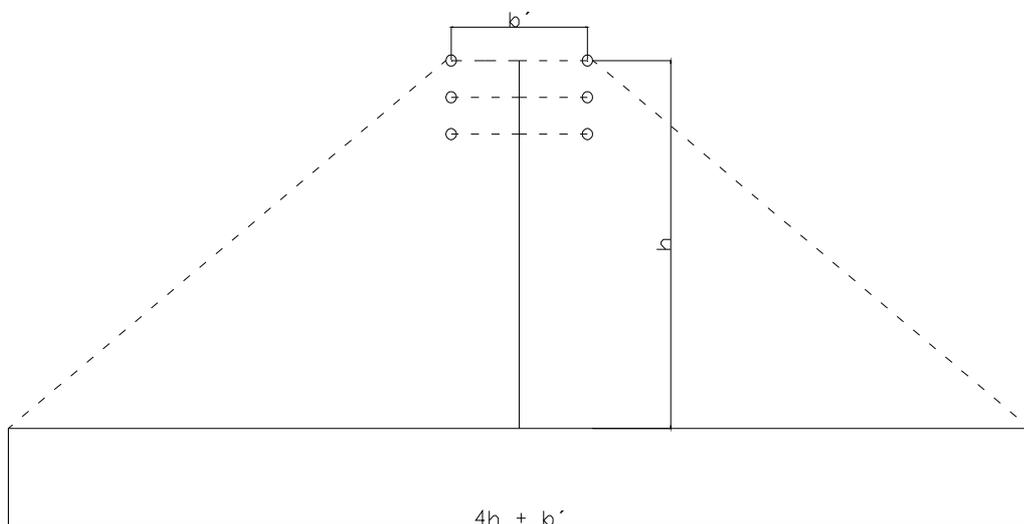
h : Altura media del conductor más elevado.

b' : Distancia entre conductores superiores extremos.

L : Longitud de la línea.

$(4 * h + b')L = \text{Área estimada de la zona expuesta. (km}^2\text{)}$.

FIGURA 2.2
ZONA DE ATRACCIÓN DE RAYOS O SOMBRA ELÉCTRICA



FUENTE: Riofrío Carlos., “Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.- Modelos de análisis“, Escuela Politécnica Nacional, 1977.

- b. Determinar la corriente mínima de descarga que produciría a través del aislamiento.

De la expresión (2.1) se tiene:

$$I_{mín} = \frac{2 * CFO}{Z_o} \quad (2.3)$$

Aquí el CFO representa el voltaje crítico de contorno del aislamiento (*Critical Flashover*) o BIL de la línea. Puede expresarse el voltaje crítico del aislamiento fase-tierra o fase-fase, dependiendo cuál sea mínimo

- c. Con el valor de (I_{min}) obtenido de la ecuación 2.3, determinamos la probabilidad de que las corrientes en las descargas exceden dicho valor. Esta probabilidad se la puede ver en la figura 1.2.
- d. Las referencias [7], [5], [13] indican que no todas las descargas que causan contorno, producen salida de la línea, es decir, la falla franca de potencia industrial o de 60 Hz. Esta probabilidad (P_2) varía entre 0,8 y 1,0 para estructuras metálicas. Los valores mas usados en son: 0,9 y 0,5 para estructuras metálicas

De acuerdo al análisis anterior, el número de salidas (N_s) de una línea sin apantallamiento, viene dado por la expresión:

$$N_s = P_1 * P_2 * N_D \quad (2.4)$$

2.4.2 SIMULACIÓN DE UN LÍNEA SIN APANTALLAMIENTO

El CSAFILT simula cuantas salidas tendrá la línea si esta no esta protegida con un cable de guarda a continuación se detalla los pasos:

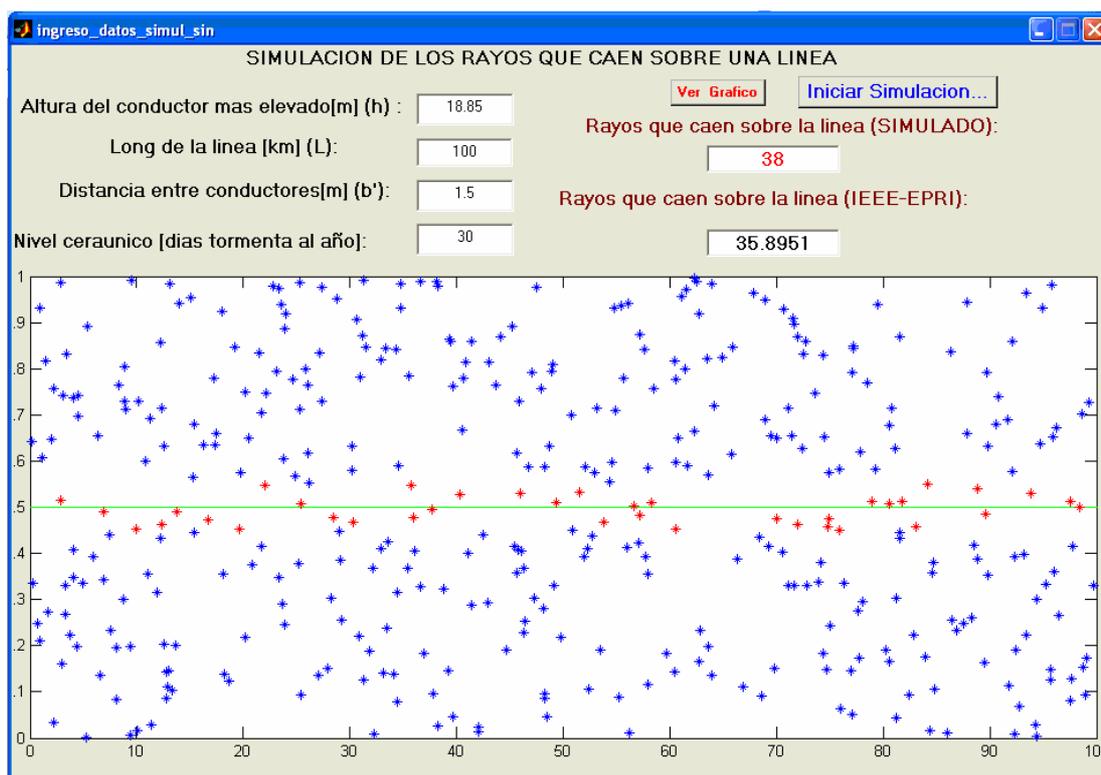
- ✓ Para la simulación se escogió un generador de números aleatorios que sigue una distribución uniforme.
- ✓ Se define la Área expuesta a rayos esto es la zona de atracción con la siguiente formula:

$$(4 \cdot h + b')L = \text{Área estimada de la zona expuesta. (km}^2\text{)}. \quad (2.5)$$

- ✓ Luego se obtiene la densidad de rayos a tierra, por el método de la IEEE-EPRI (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Electric Power Research Institute*), que es propuesto en el “Libro Rojo”, explicado en 1.7.1
- ✓ El valor de densidad se redondea por que en la realidad no se da la caída de por ejemplo 3,5894 rayos.
- ✓ Este valor se multiplica por la longitud de la línea, lo que se asemeja mas a la realidad.
- ✓ Se ha colocado a línea en el centro de la pantalla y esta representada por una línea de de color verde.
- ✓ Luego se calcula la densidad de rayos que caerá por cada metro cuadro y se multiplica por la longitud de esta manera se obtiene, el número total de rayos que caerán aleatoriamente sobre la toda la longitud de la línea.
- ✓ Los valores de Y1 y Y2 determinan el ancho esto es la posición en eje Y de la zona de atracción del rayo.
- ✓ Los rayos que caen dentro de esta zona son pintados de color rojo y contabilizados, ya que representan los rayos que caerán sobre la línea.
En el cogido fuente muestra este proceso, ver anexo N° 1
- ✓ El programa también calcula los rayos que caerán sobre la línea por el método de la IEEE-EPRI (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Electric Power Research Institute*), el cual puede dar cualquier número real, mientras que por el método de simulación, siempre dará un numero entero como sucede en la realidad, el valor entero cambiara con cada corrida de

la simulación, pero al realizar sucesivas simulaciones se obtendrá que al final el número de rayos que cae en la línea convergerá en un valor cercano al calculado por el método de la IEEE-EPRI (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Electric Power Research Institute*).

- ✓ Esta simulación se ha realizado con fin didáctico, el cual permite ver de una mejor manera cuantos rayos caen en línea dependiendo de sus parámetros en un año, y de esta manera comprender de mejor manera la importancia del cable de guarda.
- ✓ A continuación se muestra una simulación del CSAFILT.



2.5 CRITERIOS DE APANTALLAMIENTO

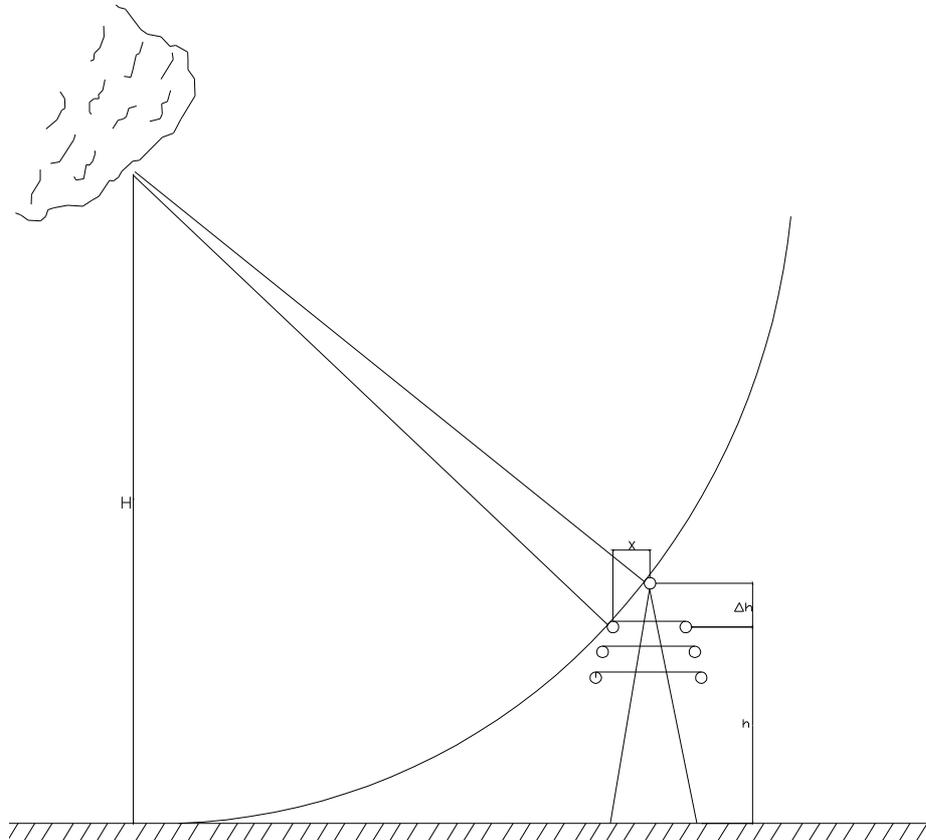
Los cables de guarda, sirven para proteger a los conductores de la red de los efectos directos de las descargas atmosféricas, siempre que estos se encuentren dentro de su “campo de acción”.

Según Peek, el cable de tierra tiene que colocarse por encima de los conductores que han de proteger, a una altura tal, que las relacionadas de distancias (de acuerdo a la notación de la figura 2.2, cumplan la siguiente relación.

$$\Delta h \geq 1.1 \left(\frac{x^2}{2h} + x \sqrt{\frac{2h}{H}} \right) \quad (2.6)$$

La altura mínima de las nubes (H), se suponen en 200 m, ambas magnitudes (h) y (x) se refieren al conductor más saliente en relación a la ubicación del cable de guarda. [24]

FIGURA 2.3
DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL CABLE DE TIERRA, SEGÚN PEEK

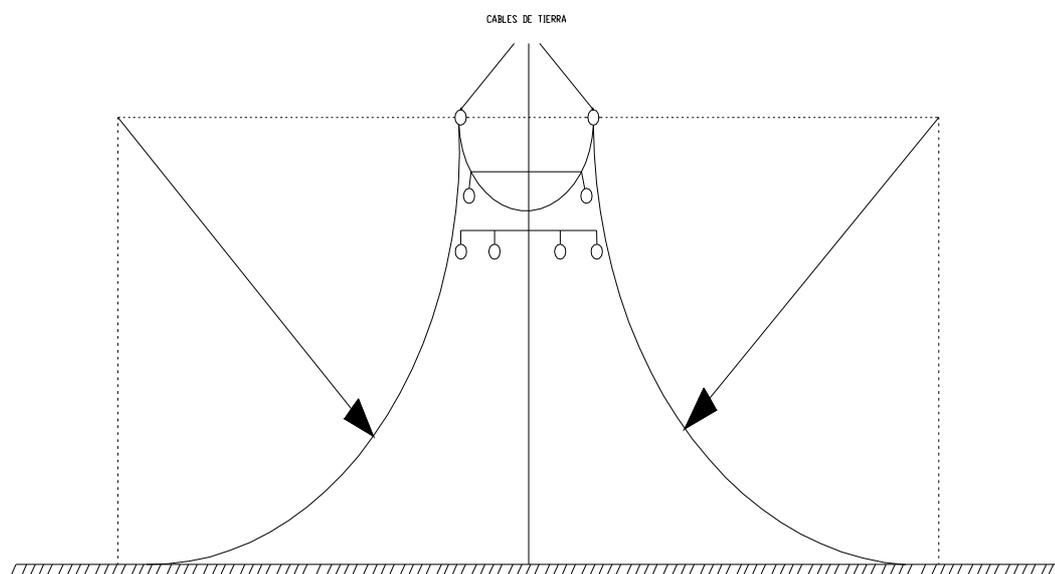


FUENTE: Riofrío Carlos., "Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.- Modelos de análisis", Escuela Politécnica Nacional, 1977.

Según Schwaiger, puede dibujarse el espacio protegido delimitándolo con un arco circular del radio igual a la altura del cable de tierra sobre el suelo, como se muestra en la figura 2.4.

Ha sido conocido por varios años que para obtener una protección efectiva, se requieren ángulos de apantallamiento relativamente pequeños. Un ángulo de apantallamiento de 30° fue considerado adecuado para líneas con estructuras no más altas de 30 m.

FIGURA 2.4
DETERMINACIÓN DEL ESPACIO PROTEGIDO SEGÚN SCHWAIGER



FUENTE: MOELLER F., "Manual del Electrotécnico". Tomo II, Editorial Labor, S.A., primera edición.

La evolución de los sistemas eléctricos han llevado a incrementos considerables en los voltajes de transmisión, con lo que fue necesario aumentar las alturas de las estructuras y desarrollar nuevas técnicas de análisis de las mismas, que tomen en cuenta una adecuada seguridad de acuerdo a su importancia y tratando de reducir al mínimo costo.

2.6 MODELOS PARA EL ESTUDIO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE UNA LÍNEA

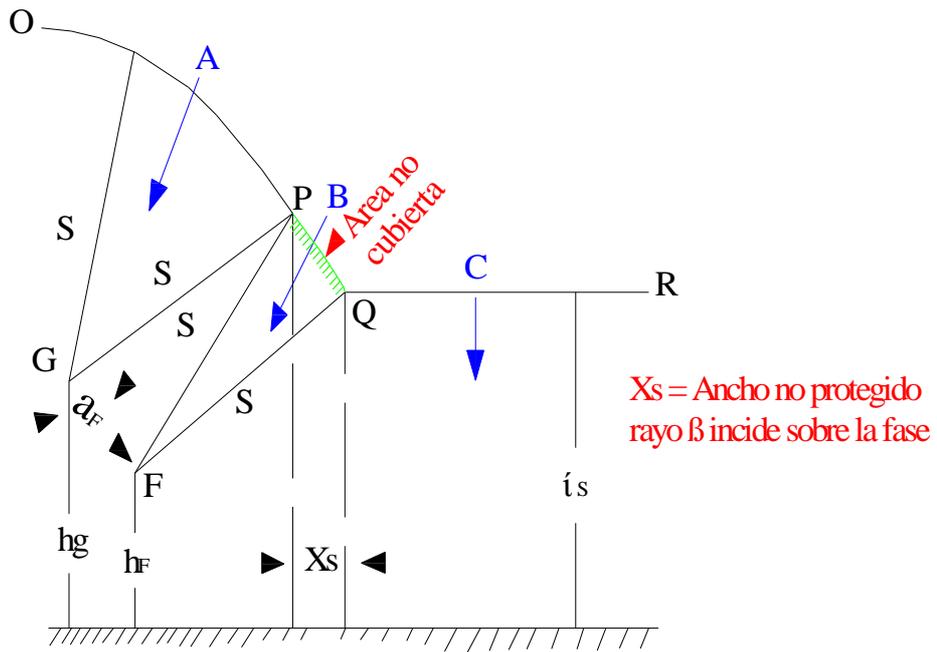
2.6.1 MODELO GEOMÉTRICO

2.6.1.1 Área no cubierta por el cable de guarda

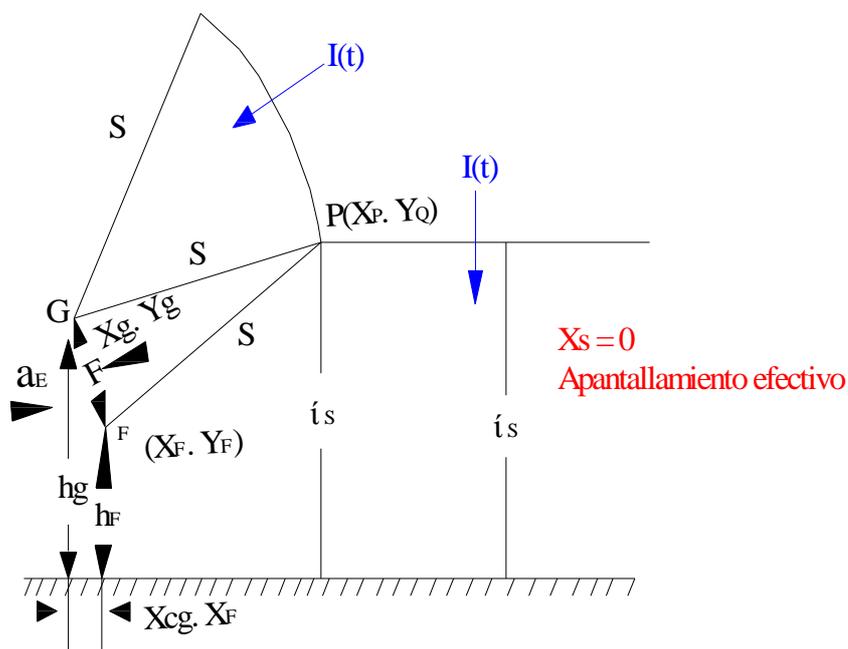
El rayo cae directamente sobre la fase, incidiendo verticalmente. En la figura 2.4 pueden observarse que el rayo A saltará solamente sobre el cable de guarda, dado que para cualquier punto sobre el arco OP la distancia al conductor de fase será siempre mayor que S.

FIGURA 2.5
MODELO ELECTROGEOMÉTRICO PARA ANÁLISIS DE FALLAS POR
APANTALLAMIENTO

a.



b.



FUENTE: Tomada de transmisión Line Referente Book 345 kV and above, second edition, 1982, peri. Pag. 563.

El rayo C sólo podrá saltar a una distancia βS ya que para cualquier punto sobre QR la distancia al conductor de fase es muy grande.

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

La distancia X_S corresponde a una zona no protegida en la cual los rayos que normalmente alcanzaría la tierra incidirán en cambio sobre la fase

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

Para la evaluación del número de salidas se toma la fase más expuesta y se calcula la tensión crítica de flameo de su aislamiento (kV) para seis microsegundos. Igualmente se calcula la impedancia impulso de la fase teniendo en cuenta el efecto corona. Con esta información obtenemos la corriente mínima del rayo sobre el conductor de fase necesaria para que haya flameo en su aislamiento. Con base en la corriente mínima se obtiene la distancia de atracción

mínima del rayo para la fase más expuesta, S_{min} , con la cual se calcula el ancho de zona no protegido, X_s .

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

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

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

2.6.1.2 Diseño del cable de guarda

El diseño de un cable de guarda consiste básicamente en la determinación de su ubicación en la estructura. Las características mecánicas se deben considerar de tal forma, que resista la carga mecánica y no vaya a tener una flecha excesiva. Las características eléctricas, deben garantizar bajas pérdidas por inducción y bajos voltajes de paso y de contacto.

La ubicación del cable de guarda debe ser tal, que sea escasa la probabilidad de que caiga un rayo con una corriente suficiente para producir flameo. Básicamente, se pueden dividir las metodologías de diseño de la ubicación del cable de guarda en dos grandes grupos: las que encuentran una posición “efectiva” del cable de guarda, tal que permita un “buen” apantallamiento y las que asignan a una posición determinada del cable de guarda, una cierta probabilidad de falla de apantallamiento.

2.6.1.3 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.

2.6.1.4 Método para conseguir un apantallamiento efectivo

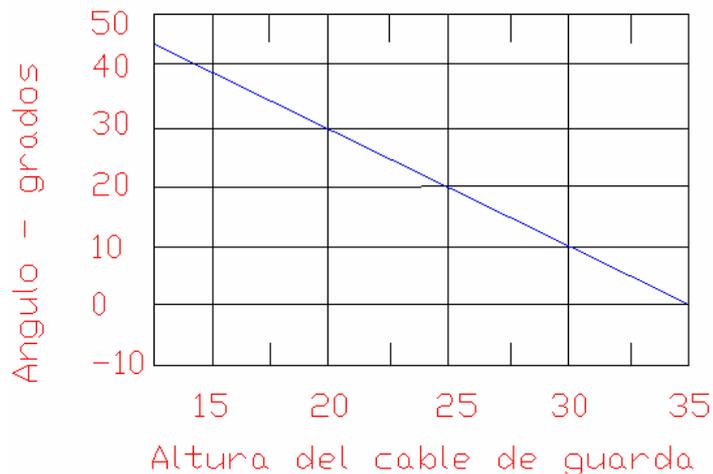
Existen metodologías más o menos sencillas para la ubicación de la posición efectiva. La más sencilla de todas, es mediante una gráfica como la de la figura 2.5 en la cual se encuentra la combinación de altura del cable con el ángulo de apantallamiento, los cuales producen un buen funcionamiento de líneas de Extra Alto Voltaje (EHV). [5]

Una forma más elaborada es mediante el modelo electrogeométrico, y este modelo se empleara para el desarrollo del software.

A continuación se explicara otros métodos que se ocupan para conseguir un apantallamiento efectivo.

En la figura 2.6 se muestra la posición del cable de guarda, (Cg) del conductor (F) y del terreno. En el punto P se interceptan las áreas de atracción de estos tres elementos, de tal forma que los rayos que caen a la izquierda de P son interceptados por el cable de guarda, y los que caen a la derecha de P son atraídos a tierra

FIGURA 2.6
GUÍA PARA EL DISEÑO DEL CABLE DE GUARDA



FUENTE: "Transmisión lines referente book 345 kV and above", EPRI, 1975.

El área de influencia del conductor y el cable de guarda, se extiende hasta una distancia S que se llama distancia de impacto. Para una altura de conductor determinada h_f se supone una altura del cable de guarda h_g y para ella se encuentra el ángulo de apantallamiento θ_s y la distancia horizontal x , conductor y cable, según las siguientes fórmulas:

$$\theta_s = \tan^{-1}(x/hg - hg) * hg \quad (2.7)$$

$$x = S \left[\left(1 - (B - hg/s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(1 - (b - hf/s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.8)$$

2.6.1.4.1 Distancia de impacto

Si el líder escalonado se acerca hasta una distancia S del conductor o del cable de guarda podrá vencer la rigidez dieléctrica del aire y golpear sobre el elemento en mención. Por eso de lo que se trata, es que el rayo se acerque primero al cable de guarda o a tierra antes que al conductor. Esta distancia de impacto es

mayor mientras la carga que ha descendido hasta la punta del líder sea mayor. Esta carga es la que produce una mayor o menor corriente en el rayo. Existen varias formulas empíricas basadas en diferentes mediciones. En [5] se presenta la siguiente expresión:

$$S = 10I^{\frac{2}{3}} \quad (2.9)$$

S: Distancia de impacto en metros

I: Corriente de rayo en kA

El conductor debe ser protegido de corrientes mayores o iguales a I_c . Siendo I_c la corriente de la descarga que al caer sobre el cable de guarda producirá un voltaje igual al BIL (*Basic Isolation Level*) de la cadena de aisladores. De tal forma que para el apantallamiento efectivo la distancia de impacto S se calcula con base en la corriente crítica:

$$I_c = 2 \frac{BIL}{Z_0} \quad (2.10)$$

Bil: Nivel básico de aislamiento de la cadena de aisladores kV

Zo: Impedancia característica en ohmios

La impedancia de un conductor con retorno por tierra y de resistencia cero, despreciando resistencia y conductancia será:

$$Z_0 = 60Ln(2h/r) \quad (2.11)$$

h: Altura del conductor en metros.

r: Radio del conductor en metros.

2.6.1.4.2 Probabilidad de falla del apantallamiento

Existen varios métodos cuyo resultado de una determinada posición del cable de guarda, define una probabilidad de falla del apantallamiento.

El más directo de estos métodos es el que se basa en la ecuación de Burgsdorf-Kostenko.

$$\text{Log}(P_{\theta}) = \theta_s \sqrt{h_t / 90} - 2 \quad (2.12)$$

Θ_s : Ángulo de apantallamiento, grados.

P_{θ} : Probabilidad de falla del apantallamiento (%).

H: Altura de cable de guarda, metros.

Para encontrar el número de fallas por apantallamiento, se multiplica $P_{\theta} / 100$ por el número de descargas directas a la línea, por 100 km de longitud y por año (NL).

De acuerdo con experiencias de campo en Rusia, aplicables a torres entre 25 y 30m de altura teniendo en cuenta la altura promedio (h) del cable de guarda, tenemos otra expresión equivalente para NL:

$$N_L = 2.7\bar{h}(NI) / 30 \text{ descarga/100 km - año} \quad (2.13)$$

Es apropiado, entonces, acoplar P_{θ} y NL. Solamente una porción de fallas por apantallamiento producirá flameos. La magnitud de corriente crítica de descarga que produce flameo es:

$$I_c = \frac{2V}{Z_0} \quad (2.14)$$

Donde:

V: Voltaje de flameo crítico del aislamiento de la torre.

Zo: Impedancia característica del conductor.

Burgsdorf, también proporciona una fórmula empírica para la probabilidad (P_1 0/0) en que una descarga excederá el valor (I , kA):

$$\text{Log}(P_1) = 2 - \frac{I_{\text{mín}}}{60} \quad (2.15)$$

La expresión anterior daría una curva similar a la presentada en la figura 2. La tasa de flameo por apantallamiento está dada por:

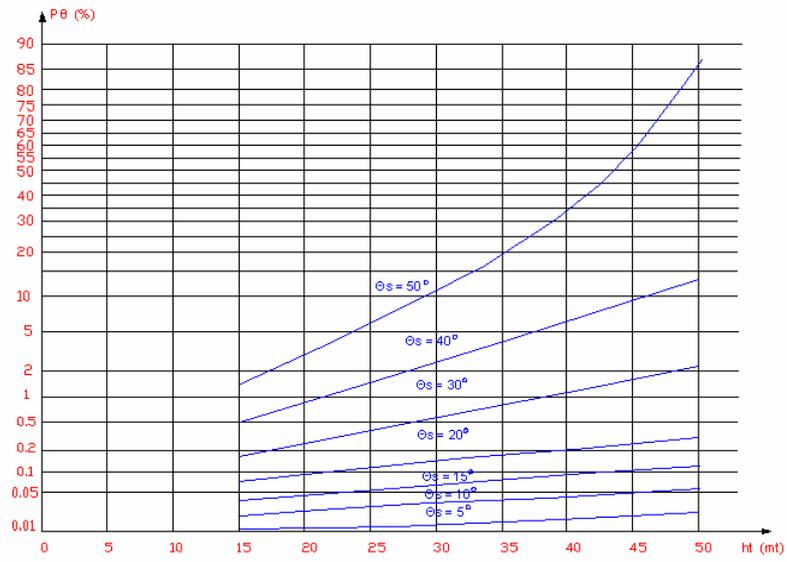
$$SFO = N_L P_1 P_\theta 10^{-4} \quad (2.16)$$

Métodos más refinados tienen en cuenta la probabilidad existente de que un rayo caiga haciendo un determinado ángulo con la vertical, la probabilidad de que caiga un rayo de una determinada magnitud, el BIL (*Basic Isolation Level*) del aislamiento, etc.

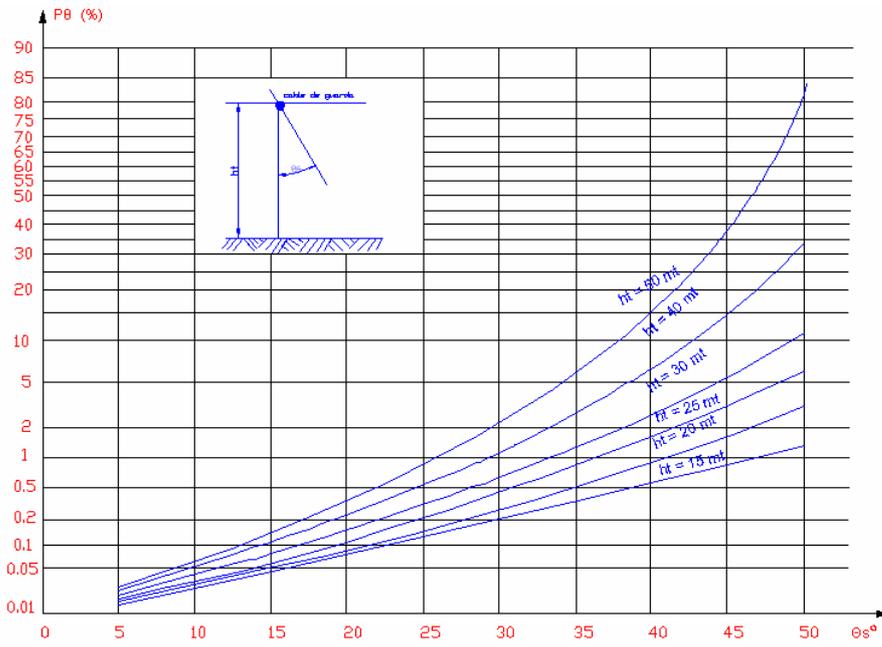
Un método tal es el desarrollado por Whitehead y Brown. [9]

FIGURA 2.7
POSICIÓN DEL CABLE DE GUARDA, (C_G) DEL CONDUCTOR (C_F) Y DEL TERRENO

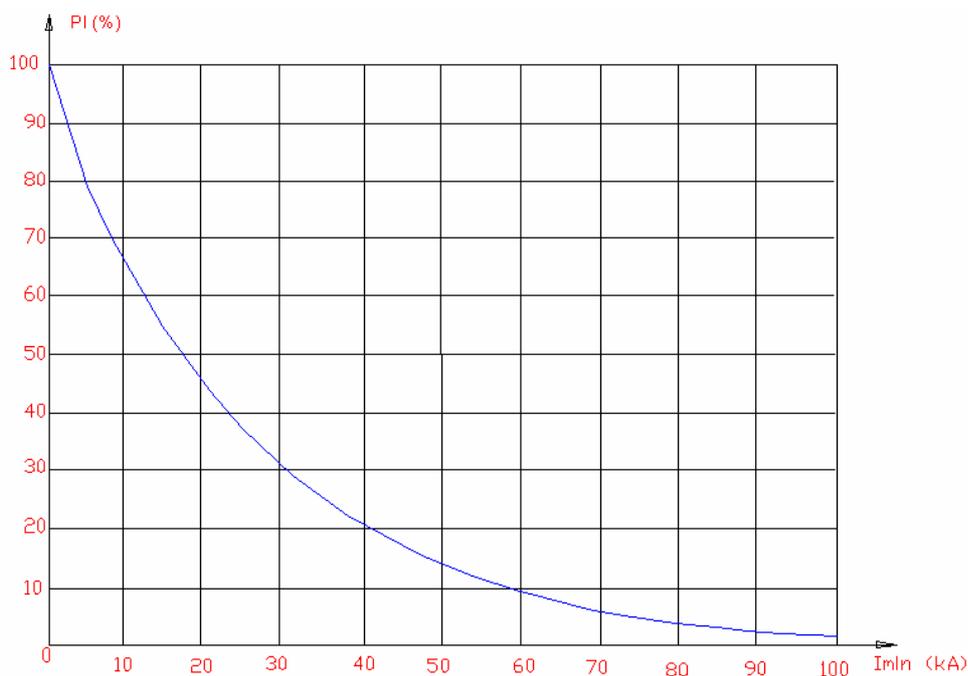
a.



b.



c.



FUENTE: "Transmisión lines referente book 345 kV and above", EPRI, 1975.

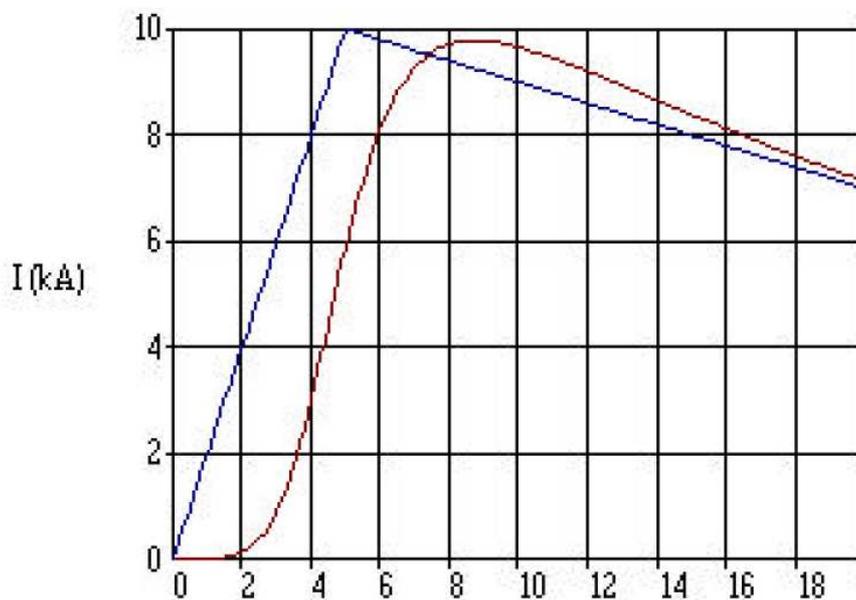
2.7 MÉTODO SIMPLIFICADO DE "LOS DOS PUNTOS" PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

En este método se explicara detalladamente y lo mas simple posible, debido que a que el método ocupado por el CSAFILT, para evaluar las salidas de una línea debida a fallas en el apantallamiento, su programación se muestra en el anexo N° 4.

2.7.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO

La corriente de un rayo generalmente se puede representar como una onda, transitoria amortiguada. Ver figura 2.7.

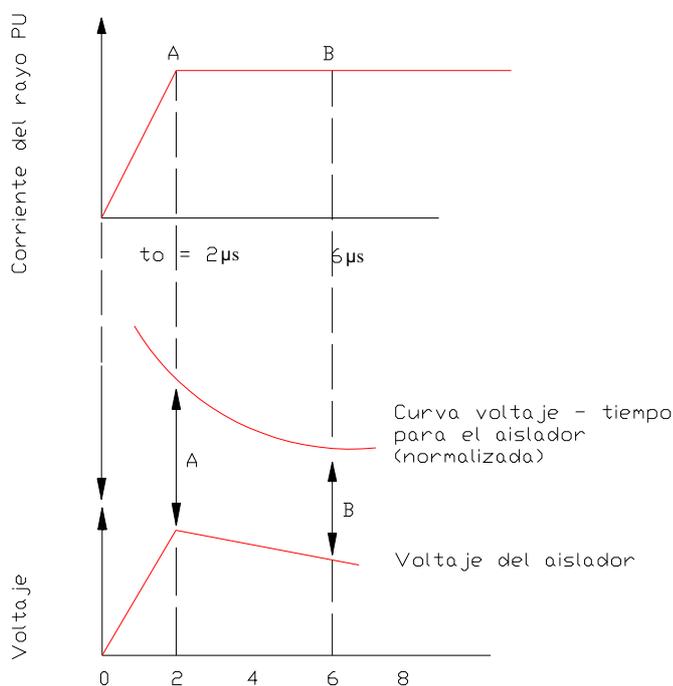
FIGURA 2.8 FORMA DE ONDA DE INTENSIDAD DE DESCARGA



En esta descarga se puede ver una intensidad de 10 kA, un tiempo de frente de onda de cinco microsegundos.

A esta forma de onda de intensidad de descarga cóncava (rojo), se la aproximo a una forma de onda de intensidad de descarga doble rampa (azul). Por lo que para este método la onda normalizada del rayo se toma como una función rampa con un tiempo de cresta igual a 2 microsegundos y con la parte superior aplanada. Ver figura 2.9.

FIGURA 2.9
ONDA NORMALIZADA DEL RAYO



FUENTE: Tomada de transmisión Line Referente Book, 345 kV and above, second edition, 1982, IEEE-EPRI, Pag. 573.

La principal ventaja de este método es su sencillez, comparado con el método de simulación estocástica. Se desarrollará con base en las siguientes premisas:

- a. Debido a la complejidad del problema, este debe ser linealizado para que se pueda resolver sin una computación iterativa excesiva;
- b. Debe tener en cuenta tanto los métodos clásicos reconocidos, como la naturaleza probabilística del problema;
- c. El método ha sido presentado en forma de algoritmo general, de tal manera que puede ser programado fácilmente;
- d. El método es lo suficientemente flexible para permitir incorporar avances y nueva información, a medida que estas se tengan año tras año.

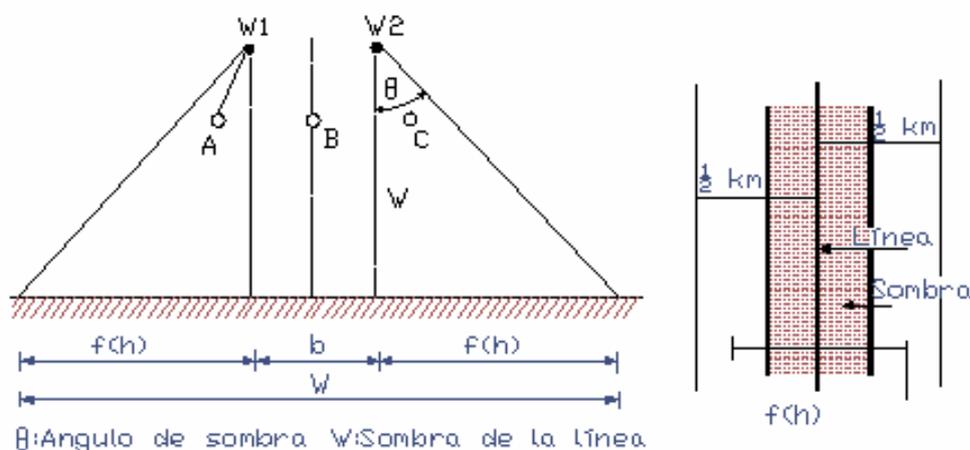
El método supone que la línea describe una especie de sombra eléctrica sobre la tierra, de tal manera que cualquier rayo que normalmente caería en dicha sombra, se considera que hará contacto con la línea. Esto se puede ver esquematizado en la figura 2.10.

El método simplificado de los dos puntos utiliza el modelo geométrico el cual establece:

Una distancia mínima de choque S , que determina el punto de incidencia de una descarga atmosférica.

La magnitud de S , depende de la magnitud de la corriente de rayo.

FIGURA 2.10
ESQUEMATIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA



FUENTE: Documento NE-89-09 Metodología de diseño de transmisión y guía de aplicación de las estructuras normalizadas.

A partir de esta sombra, se determina el número total de rayos a tierra por 100 km-año, y allí se inicia el proceso probabilístico. Las ideas generalmente del método de los dos puntos están a continuación.

2.7.2 ESPECIFICACIÓN DEL MÉTODO

Es imprescindible conocer la geometría de la línea con datos precisos de ubicación de los conductores de fase y guardia, dimensiones de la torre y brazos de la misma. Es obvio que pueden existir diferentes tipos de torres en una línea de transmisión. Se puede tomar como relevante el tipo de torre más numeroso.

2.7.2.1 Simbología:

LI = longitud de la línea [km].

N = número de conductores por fase

DB = diámetro del as [m]

DC = diámetro del conductor[m]

T = nivel cerámico [días de tormenta por año]

Wcad = longitud de la cadena de aisladores [m]

hgm = altura del hilo de guarda a medio claro [m]

hfm = altura del conductor a medio claro [m]

t = tiempo de interrupción del rayo (2-6 us) [micro segundos]

hg = altura del cable del guarda [m]

hf = altura del conductor [m]

Xo = distancia horizontal al conductor [m]

X_G = distancia horizontal al cable de guarda [m]:

b= distancia de separación de cables de guarda [m]

Y_G = Altura media del cable de guarda

2.7.3 DESARROLLO

- a. El primer paso consiste en poner la densidad de rayos a tierra (número de rayos/km²/año), a partir del nivel cerámico en la venciencia de la línea, ya que en el país, no se dispone en la actualidad de mediciones de esta densidad. Entre las variaciones relacionadas propuestas para estimar la

densidad de rayos a tierra (N_g) en función del nivel cerámico de la región (T), en el cual para nuestro país el Ecuador tenemos dividido en dos zonas:

- **Zona 1:** Corresponde a la parte baja del territorio, comprendida entre el océano y los faldeos de la cordillera hasta una altura de 1000 m sobre el nivel del mar.
- **Zona 2:** Corresponde básicamente a la meseta andina y comprende terrenos desde 1000 m hasta 3500 m sobre el nivel del mar, con una altura predominante de 2500m.

En la siguiente tabla se muestra los niveles cerámicos para cada zona ya especificada.

En nuestro caso la zona 1 corresponde a toda la región de la costa y la zona 2 corresponde a la región Sierra y Oriente.

**TABLA 1
NIVELES CERÁMICOS DEL ECUADOR**

ZONA 1	ZONA 2
30	50

FUENTE: Instituto Ecuatoriano de Electrificación.

la expresión utilizada es la siguiente:

$$N_g = 0.12 * T \quad [\text{Número de rayos /km}^2/\text{año}] \quad (2.17)$$

Método de EPRI es el propuesto en el "libro rojo" de EPRI

- Calculo del número de descargas que inciden en la línea (descargas a los conductores, descargas a las torres o descargas al cable de guarda) depende de la mayor o menor área de exposición de la línea; la cual a su

vez, está determinada por la altura y forma de la estructura, la disposición de los conductores y del cable de guarda, las características topológicas del corredor y la magnitud de la corriente de descarga. Un estimado del valor medio del número de descarga a la línea (NL) es el siguiente:

$$NL = 0.12 \times (b + 4 \times Y_G^{1.09}) \times \left(\frac{LI \times T}{1000} \right) \quad (2.18)$$

Donde:

$$Y_G = h_g - \frac{2}{3} \times (h_g - h_{gm}) \quad (2.19)$$

- c. Cálculo de la altura media del conductor de fase seleccionado para un tiempo de 6 μ s.

$$Y_o = hf - \frac{2}{3} * (hf - h_{fm}) \quad (2.20)$$

- d. Cálculo del Rc del efecto corona alrededor del conductor, esto es 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 de aire alrededor del conductor de fase o **efecto corona** como se lo conoce, el efecto corona sobre el conductor se traduce como un incremento del radio del conductor lo cual afecta el valor de la impedancia característica del mismo. El radio Rc del efecto corona se extiende hasta un punto donde la intensidad del campo eléctrico decrece a un valor tal que no puede ionizarse más el aire, este radio Rc se determina mediante la siguiente ecuación no lineal:

$$R_c \times \ln\left(\frac{2 \times hf}{R_c}\right) = \frac{V_c}{E_o} \quad (2.21)$$

Donde:

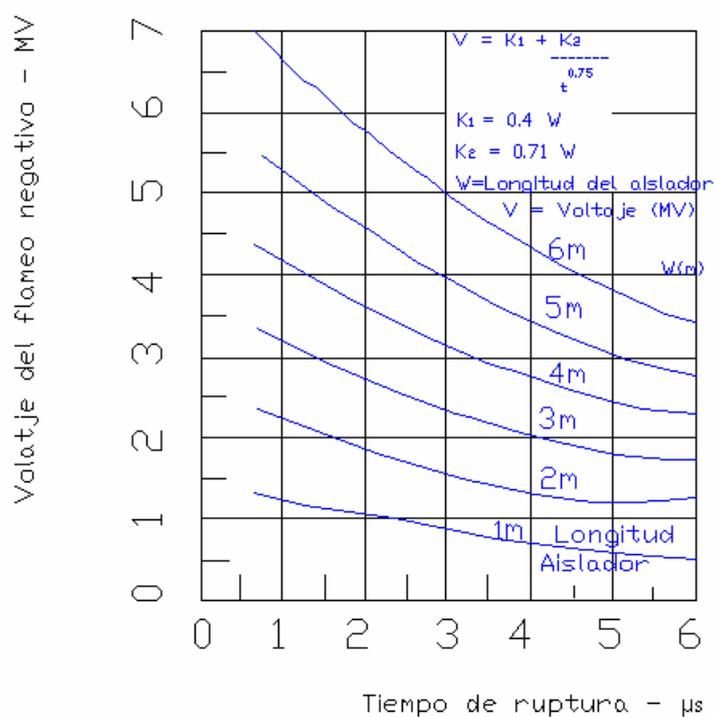
$$V_c = \left(K_1 \times W_{cad} + \frac{K_2 \times W_{cad}}{t^{0.75}} \right) \times 1000 \text{ (kV)} \quad (2.22)$$

Vc: Voltaje crítico

Eo es el valor límite del campo eléctrico para el cual el radio corona no crece mas, para Eo se asume el valor de 1500 kV/m

De esta ecuación salen las curvas de la figura 2.11 en donde se puede ver de mejor manera la relación del tiempo de ruptura, el voltaje de flameo negativo y la longitud del aislador.

FIGURA 2.11
CURVA POR EL MÉTODO CIGRE DE TENSIÓN VS. TIEMPO PARA FLAMEO DEL AISLAMIENTO



FUENTE: Tomada de Transmisión Line Referente Book, 345 kV and above, second edition, 1982, EPRI. Pag. 564.

- e. Cálculo de la impedancia característica, en la cual se toma en cuenta el radio corona.

Primero calculamos el radio equivalente

$$re = 0.5 \times D_B \times \left(\frac{N \times D_C}{D_C} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (2.23)$$

Donde Zc:

$$Z_c = 60 \times \sqrt{\ln\left(\frac{2 \times hf}{re}\right) \times \ln\left(\frac{2 \times hf}{R_{cri}}\right)} \quad (2.24)$$

Donde:

$$N = 1; \quad R_{cri} = r_c \quad \text{y} \quad \text{si } N \neq 1; \quad R_{cri} = r_c + re$$

- f. Cálculo de la corriente mínima que puede producir un arco superficial cuando falla el apantallamiento:

$$I_{min} = \frac{2 \times V_c}{Z_c} \quad (2.25)$$

- g. Cálculo de la determinación de la distancia mínima de descarga, 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 Smin del objeto. Esta distancia es función de la carga en el canal y en consecuencia de la corriente del rayo

que se aproxima. Para determinar esta distancia S_{min} se utiliza la siguiente expresión:

$$S_{min} = COEF \times I_{min}^{EXP} \quad (2.26)$$

Los valores de los parámetros COEF y EXP más usados son los siguientes:

TABLA 2
PARÁMETROS MAS UTILIZADOS PARA LA ECUACIÓN S_{min}

COEF	EXP
10,0	0,65
6,7	0,80
7,1	0,75
9,4	0,67

El recomendado por IEEE – EPRI es COEF = 10 y EXP = 0,65

- h. Factor que relaciona la distancia critica de arqueo a tierra con la correspondiente a los conductores y cables de guarda, para lo cual vamos a escoger dependiendo del tipo de voltaje.

TABLA 3
FACTOR β PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ALTO VOLTAJE

Tipos de Voltaje	Alto voltaje HV (hasta 230 kV)	Extra Alto Voltaje EHV (231 – 750 kV)	Ultra Alto Voltaje UHV (> 750 kV)
β	1	0,8	0,64

El recomendado por, IEEE – EPRI

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.

- i. Cálculo de la abscisa del cable de guarda para apantallamiento efectivo X_{cg} .

$$Y_o = hf - \frac{2}{3} \times (hg - hfm) \quad (2.27)$$

$$Y_G = hf - \frac{2}{3} \times (hg - hgm) \quad (2.28)$$

$$X_{cg} = \sqrt{S \min^2 - (\beta \times S \min - Y_o)^2} - \sqrt{S \min^2 - (\beta \times S \min - Y_G)^2} \quad (2.29)$$

- j. Cálculo del ángulo α_E de apantallamiento efectivo

$$\alpha_E = \arctg \left(\frac{X_{cg}}{Y_o - Y_G} \right) \quad (2.30)$$

Si el ángulo α en la geometría de la línea es menor que α_E entonces la línea está efectivamente apantallada, si este es el caso entonces no se esperan fallas de apantallamiento $NSF = 0$, y se puede proceder a estimar las salidas forzadas por descargas retroactivas. Si $\alpha > \alpha_E$ entonces se esperan salidas forzadas por apantallamiento no efectivo y se prosigue con el paso siguiente si se mantiene la geometría inicial de la línea.

k. Cálculo del espacio no cubierto por el apantallamiento

$$X_s = S_{\min} \times (\cos(\theta) + \text{sen}(\alpha - w)) \quad (2.31)$$

Donde:

$$w = a \cos\left(\frac{F}{2 \times S_{\min}}\right) \quad (2.32)$$

$$F = \sqrt{\Delta X^2 + (h_g - h_f)^2} \quad \text{y} \quad \Delta X = X_o - X_G \quad (2.33)$$

$$\theta = a \sin\left(\frac{\beta \times S_{\min} - h_f}{S_{\min}}\right) \quad (2.34)$$

$$m = \frac{(X_o - X_G)}{(Y_G - Y_o)} \quad (2.35)$$

$$\alpha = a \tan(m) \quad (2.36)$$

- i. Cálculo de la máxima distancia de descarga S_{\max} , de la expresión 10.9 para la distancia de descarga S_{\min} , se puede ver que si la corriente se incrementa la distancia S_{\min} se incrementa. Se parte de la hipótesis que existe una distancia S_{\max} para la cual se consigue hacer cero la zona X_s no cubierta por el apantallamiento. Que geoméricamente es equivalente a reducir a cero la distancia PQ. Desde el punto de vista del modelo electrogeométrico lo que esto significa es que existe un valor de corriente del rayo I_{\max} asociado a esta distancia S_{\max} . Solo los rayos cuya corriente sean menor que I_{\max} y superiores a la I_{\min} determinada en la expresión 2.24 pueden provocar falla de apantallamiento. La solución para S_{\max} se obtiene resolviendo la ecuación no lineal:

$$[\text{Cos}\theta + \text{Sen}(\alpha - w)] = 0 \quad (2.37)$$

Una aproximación para S_{\max} se puede hacer mediante la siguiente expresión:

$$S_{\max} = Y_{\text{medio}} \times \frac{\sqrt{-B - B^2 + A \times C}}{A} \quad (2.38)$$

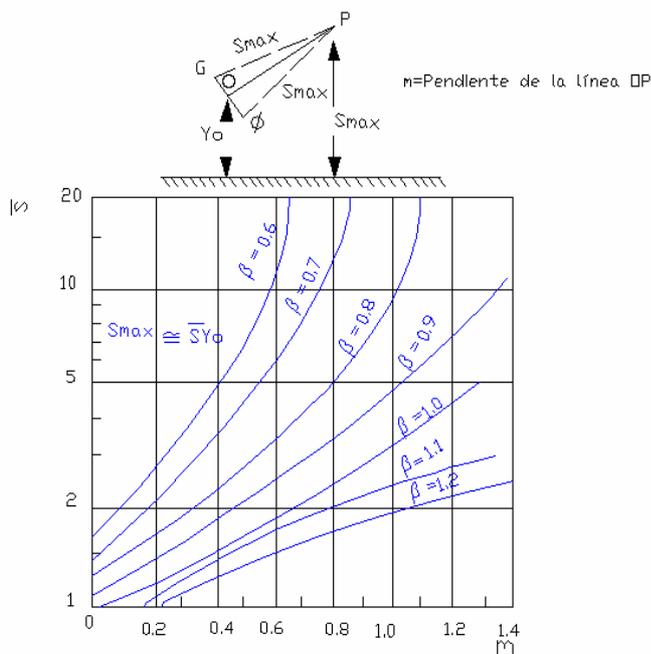
$$A = m^2 - m^2 \times \beta - \beta^2 \quad (2.39)$$

$$B = \beta \times (m^2 + 1) \quad (2.40)$$

$$C = m^2 + 1 \quad (2.41)$$

Con la expresión 2.37 se puede dibujar las distintas curvas para diferentes valores de β como se puede apreciar en la figura 2.12.

FIGURA 2.12
CURVA POR EL MÉTODO DEL CIGRE DE TENSIÓN VS. TIEMPO
PARA FLAMEO DEL AISLAMIENTO



FUENTE: Tomada de Transmisión Line Referente Book, 345 kV and above, second edition, 1982, EPRI. Pag. 569.

m. Cálculo I_{max} correspondiente a la máxima distancia de descarga S_{max}

$$I_{max} = 0.029 \times S_{max}^{1.54} \tag{2.42}$$

n. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de la 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 asociado. Debe reconocerse la naturaleza estadística de éste valor máximo. La probabilidad de que un rayo tenga un valor máximo mayor o igual que I se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.43)$$

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

Para determinar la probabilidad P_{min} de que I_{min} sea excedida, basta sustituir el valor correspondiente por I . De igual forma para la probabilidad P_{max} de I_{max} , como se lo muestra a continuación.

$$P_{min} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{min}}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.44)$$

$$P_{max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{max}}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.45)$$

- o. Cálculo del número de fallas por apantallamiento, el número de fallas de apantallamiento que pueden provocar salidas forzadas de la línea por 100 km/año se obtienen mediante:

$$NSF = 0.012 \times T \times \frac{Xs}{2} \times (P_{min} - P_{max}) \quad (2.46)$$

Para longitudes de línea L km diferentes de 100 km, se multiplica el valor obtenido mediante la expresión 2.43 por L y se divide para 100

CAPÍTULO 3

FLAMEO INVERSO

3.1 GENERALIDADES FLAMEO INVERSO

Cuando una descarga cae sobre el cable de guarda, viaja hasta la torre más cercana (a cada lado del punto de impacto), 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 cruceta es muy alto con respecto al conductor, tenemos el flameo cuyo punto de mayor voltaje es la cruceta, llamado **flameo inverso** (back flashover). Este flameo puede ocasionar, dependiendo del sistema de protecciones, una salida de la línea.

3.2 DESCARGAS RETROACTIVAS (DESCARGAS DIRECTAS SOBRE POSTES, TORRES O CABLES DE GUARDA)

Para las sobretensiones que se generan tras la incidencia de una descarga sobre la torre o en algún cable de guarda, implica la solución de un fenómeno de onda viajera que toma en cuenta diversos parámetros del sistema en cuestión.

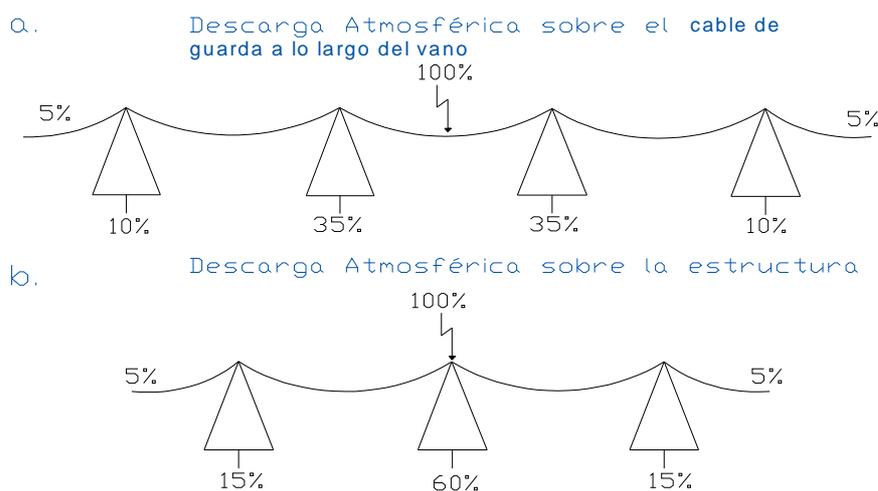
Por lo tanto son necesarios los siguientes datos:

- √ Impedancias de onda del o los cables de guarda
- √ Impedancia de onda de la torre utilizada
- √ Impedancias dinámicas de puesta a tierra
- √ Existencia o no de algún componente adicional que pueda afectar en forma y magnitud a la onda viajera (descargadores de sobretensiones, capacitores, transformadores, etc.)
- √ Factor de acoplamiento entre cables de guarda y conductores de fase
- √ Tensión de 60 Hz a la cual está operando el sistema

- √ Cantidad de descargas que van a incidir por año, sobre cables de guarda o torres

La descarga atmosférica puede incidir tanto en una estructura, como en cualquier punto del cable de guarda a lo largo del vano; el caso en el cual por la torre se drena mayor cantidad de corriente, es cuando el rayo incide directamente sobre la estructura.

FIGURA 3.1
DESCARGA ATMOSFÉRICA SOBRE EL CABLE DE GUARDA A LO LARGO DEL VANO Y SOBRE LA ESTRUCTURA



3.2.1 CÁLCULO DEL VOLTAJE A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO

Se han utilizado diferentes metodologías para conocer esos voltajes, estas técnicas básicamente pueden ser análogas o digitales.

La técnica más utilizada, es la de construir un **modelo geométrico** de la torre con cada uno de sus componentes [13]. Se inyecta momentáneamente una gran corriente por medio de un cable colocado verticalmente sobre la torre simulando el canal de la descarga. Se producen en ese momento campos eléctricos y magnéticos similares a los presentes en la línea cuando cae un rayo.

Mediante la medición directa del voltaje entre la cruceta y el conductor y utilizando escalas se conoce el voltaje real que se presentaría en la línea. La escala es tal que si por ejemplo, se reducen las dimensiones de la torre en 25 veces, la frecuencia debe aumentar en esas 25 veces. Esto significa que en el modelo se deben realizar medidas a muy altas frecuencias y en tiempos muy reducidos.

Las técnicas digitales que se utilizan, son procedimientos que deducen analíticamente el valor del voltaje a partir del valor de la corriente, de su tiempo de frente de ondas y su forma. Parten de la teoría de campos electromagnéticos o directamente de la teoría de circuitos, bien sea de parámetros concentrados o distribuidos.

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, se pueden desarrollar formulas para el voltaje con base en la corriente, utilizando los métodos de lazo de potencial o de cancelación de campo, [22] [23] y [24]. En estos casos para simplificar la complejidad de la geometría, se suele reducir la línea a cilindros o conos equivalentes.

Se puede partir directamente de la teoría de circuitos, en cuyo caso, se debe considerar que cualquier fenómeno transitorio es una “mezcla de efectos de las ondas viajeras (en cables y líneas) y de oscilaciones de circuitos de parámetros concentrados (tierras, etc.)”. [16]

Los problemas de ondas viajeras se pueden resolver mediante las técnicas de Bew ley (lattice) o de Bergeron (características), utilizando además técnicas adicionales para la consideración de los parámetros concentrados.

Se han intentado también, algunas simplificaciones en el tratamiento de estos fenómenos transitorios:

- a. El método de la AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*), [1] considera la torre en serie con su resistencia de puesta a tierra como un

circuito RL serie. El valor de referencia para la inductancia de la torre fue de 20uH. Considera además la variación de la impedancia de los contrapesos en el tiempo, debido a la impedancia característica del contrapeso de alrededor de 150Ω que evoluciona hasta su valor en DC. Este método fue revaluado a partir de experiencias con líneas de voltaje a 220 kV y superiores.

- b. El método utilizado por J.G. Anderson para líneas de más de 345 kV, [5] desprecia prácticamente la inductancia y se concentra simplemente en el efecto de la resistencia de puesta a tierra. Esta aproximación es factible debido a que el voltaje producido por el cambio de campo magnético en la torre, es menor que BIL de las líneas a esos niveles de voltaje.

El método aquí presentado es diferente de los anteriores; considera la torre como una impedancia característica y mediante el análisis de las reflexiones de la onda viajera, determina el voltaje a través del aislamiento.

3.2.2 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 deben analizar en detalle la transmisión de la perturbación de los campos electromagnéticos a través del tiempo, mediante un análisis de la onda viajera.

Se puede demostrar que el viaje de una perturbación de voltaje de valor V en una línea de inductancia por unidad de longitud L y capacidad unitaria C , produce una perturbación de la corriente I que está totalmente en fase con la de voltaje y cuya relación es una constante llamada la impedancia característica Z , tal que:

$$V = IZ \quad (3.1)$$

Siendo:

$$Z = (LC)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Cuando una onda viajera pasa de un medio con impedancia característica Z_1 a otro de impedancia Z_2 , se producen ondas de voltaje y corriente reflejadas y refractadas.

Los coeficientes de reflexión B y de refracción A tienen las siguientes expresiones:

$$B = (Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2) \quad (3.3)$$

$$A = 2Z_2/(Z_1 + Z_2) \quad (3.4)$$

El coeficiente de reflexión del voltaje en la base de la torre sería B_{bt} :

$$B_{bt} = (R - Z_t)/(R + Z_t) \quad (3.5)$$

R : Resistencia de la puesta a tierra.

Z_t : Impedancia característica de la torre.

Como se puede ver en la ecuación, el coeficiente de reflexión puede ser positivo o negativo. Si es negativo, la onda reflejada va a restarse al voltaje que está subiendo a medida que sube la corriente de la descarga hasta su valor máximo; por lo tanto una reflexión negativa reduce el riesgo de flameo inverso.

Inversamente, el peligro de flameo aumenta considerablemente si B_{bt} es positivo, es decir, si el valor de la puesta a tierra es superior al de la impedancia de la torre.

3.2.3 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:

$$Z_t = 60 * \ln(h / r) + 90(r / h) - 60 \quad (3.6)$$

Z_t : Impedancia característica de la torre en ohmios.

h: Altura total de la torre en metros.

r: Radio equivalente para diferentes tipos de torres utilizadas en Ecuador calculadas de acuerdo con la referencia. [1]

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

3.2.4 IMPEDANCIA DE LA PUESTA A TIERRA

La puesta a tierra 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.

Si los contrapesos son muy extensos, este tiempo es muy largo y aumenta la probabilidad de flameo, ya que la impedancia de los contrapesos tiene valores que oscilan alrededor de 150 ohmios.

Para nuestro país la resistencia de puesta a tierra esta dividida en dos zonas; la zona 1 abarca toda la región costa y la zona 2 abarca toda la región sierra y oriente, a continuación se presenta la tabla con sus respectivos valores:

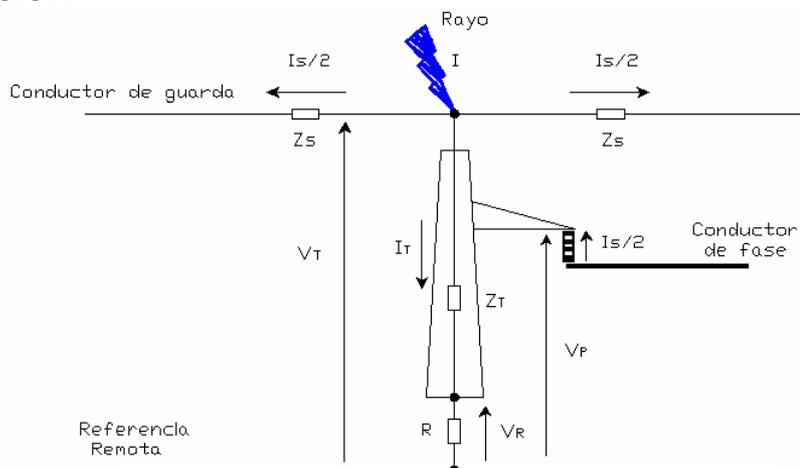
TABLA 4
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA PARA PIE DE TORRE

RESISTENCIA A PIE DE TORRE		
	138 kV	230 kV
Zona 1 (costa)	$R \leq 10 \Omega$	$R \leq 5 \Omega$
Zona 2 (sierra y oriente)	$R \leq 15 \Omega$	$R \leq 10 \Omega$

3.3 MÉTODO SIMPLIFICADO DE “LOS DOS PUNTOS” PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ANTE DESCARGAS RETROACTIVA (BACK-FLASHOVER)

En este método se explicara detalladamente y lo mas simple posible, debido que a que el método ocupado por el CSAFILT, para evaluar las salidas de una línea por causas de flameo inverso, su programación se muestra en el anexo N° 4.

FIGURA 3.2
INCIDENCIA DE UN RAYO SOBRE UNA TORRE EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN



Donde:

- I:** Onda de corriente de descarga del rayo
- Is:** Onda de corriente derivada por los conductores de guarda
- IT:** Onda de corriente inyectada a la torre
- Zs:** Impedancia característica del conductor de guarda
- ZT:** Impedancia característica de la torre
- R:** 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

Cuando un rayo incide en una torre de una línea de transmisión con conductor de guarda descarga una corriente $I(t)$ que genera ondas viajeras de corriente $I_s(t)/2$ en el conductor o conductores de guarda, $I_T(t)$ en la torre, ver figura 3.2. La corriente en la torre sufre múltiples reflexiones en el tiempo en la base y en el tope de la torre debido a la diferencia existente entre la impedancia característica de la torre Z_T y la resistencia a tierra R , la onda de corriente se distribuye de acuerdo con el valor de la impedancia característica entre el cable de guarda y la torre. Esto produce una elevación del potencial en la torre (V_T) el cual es proporcional al valor de la

impedancia combinada (Z_T) del cable de guarda, la torre y la magnitud de la corriente incidente esto es:

$$V_T(t) = Z_T \times I(t) \quad (3.7)$$

V_T es posteriormente modificado por las reflexiones desde la base de la torre y eventualmente desde las torres adyacentes.

Cuando una descarga atmosférica penetra en el cable de guarda, las ondas asociadas de voltaje y corriente inducen en todos los conductores paralelos, una onda de voltaje proporcional y de igual polaridad al voltaje en el cable de guarda. Por lo tanto, la diferencia de potencial a través de la cadena de aisladores es aliviada por el efecto de acoplamiento entre el conductor y el cable de guarda, el cual depende de la separación entre estos.

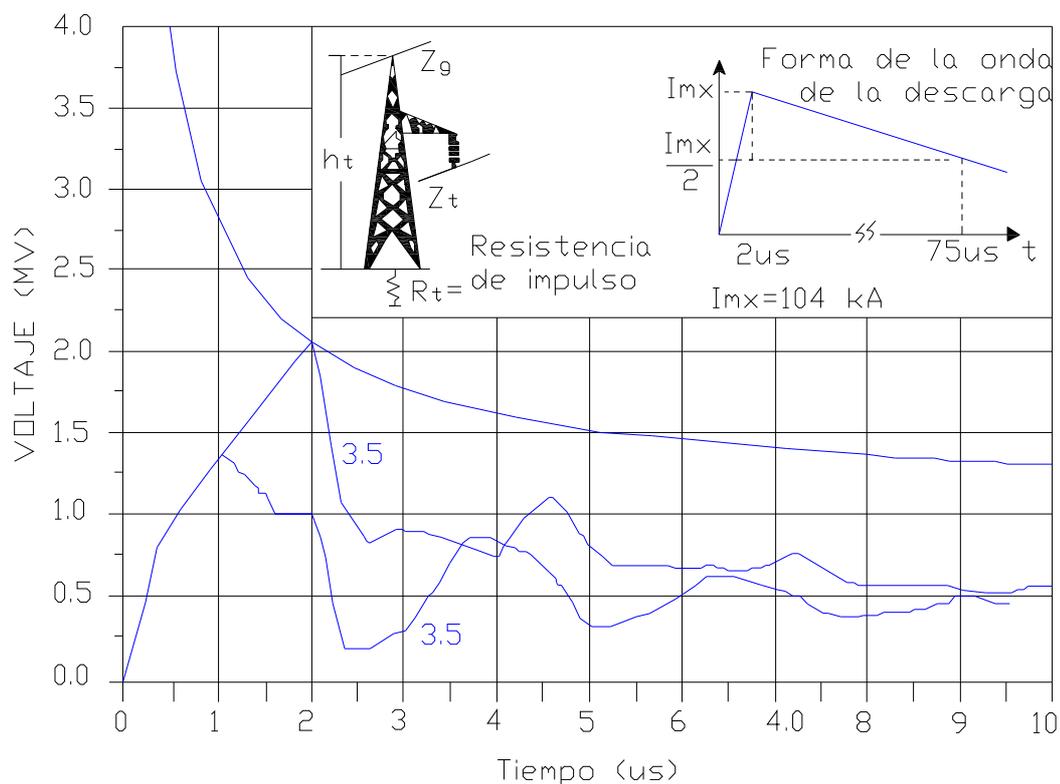
Para una forma de onda la corriente del rayo, la forma de onda del voltaje en la cadena de aisladores, se puede determinar utilizando técnicas de onda viajera, teniendo en cuenta el efecto corona.

Para determinar si se producirá flameos, se compara la onda de voltaje en la cadena con la curva característica, $v-t$ y si estas dos curvas se cortan se dice que ocurre flameo en el aislamiento. En la figura 3.3 se muestra una forma de onda típica del voltaje en la cadena de aisladores obtenida con el EMTP (Electromagnetic Transients Program).

Para una forma de onda la corriente determinada se puede calcular la magnitud de corriente del rayo a partir de la cual la onda de voltaje en la cadena toca la curva característica $v-t$ del aislamiento; es decir, toda descarga con corriente mayor que esta corriente crítica (I_c) no es igual para todas las fases, ya que depende del factor de acoplamiento entre la fase y

el cable de guarda y de la altura de la cruceta. Adicionalmente, la corriente crítica se debe corregir para tener en cuenta el voltaje de 60 Hz de la línea

FIGURA 3.3
SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DESCARGA EN LA TORRE Y EN EL VANO (ANÁLISIS CON EMTP)



PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN:

$$Z_t = 145 \Omega \quad h_t = 38.25 \text{ m}$$

$$Z_o = 236 \Omega \quad \text{Vano} = 300 \text{ m}$$

$$R_t = 20 \Omega \quad \text{Lcadena} = 2.5 \text{ m}$$

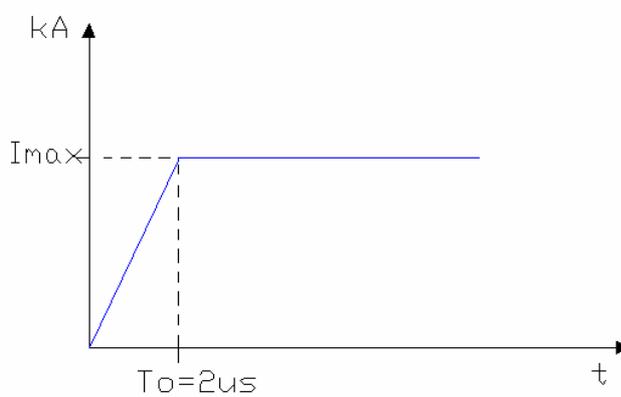
V_{C1} : Voltaje a través de la cadena de aisladores-Descarga en la torre

V_{C2} : Voltaje a través de la cadena de aisladores-Descarga en la mitad del vano

FUENTE: Tomada de Metodología de diseño de líneas de transmisión y guía de aplicación de las estructuras normalizadas. Septiembre – 1989.

Teniendo en cuenta que los flameos inversos ocurren a altas corrientes, una onda de $\frac{2,0}{75} \mu\text{s}$ se considera aceptable para modelar la onda de corriente de la descarga. El método simplificado IEEE – EPRI considera para el caso de flameos inversos, la forma de onda de la corriente mostrada en la figura 3.4.

FIGURA 3.4
FORMA DE ONDA DE CORRIENTE USADA PARA SIMULAR LA DESCARGA



FUENTE: Tomada de Metodología de diseño de líneas de transmisión y guía de aplicación de las estructuras normalizadas. Septiembre – 1989.

3.3.1 ESPECIFICACIÓN DEL MÉTODO

Al fluir la corriente del rayo por la torre, se tienen los siguientes efectos:

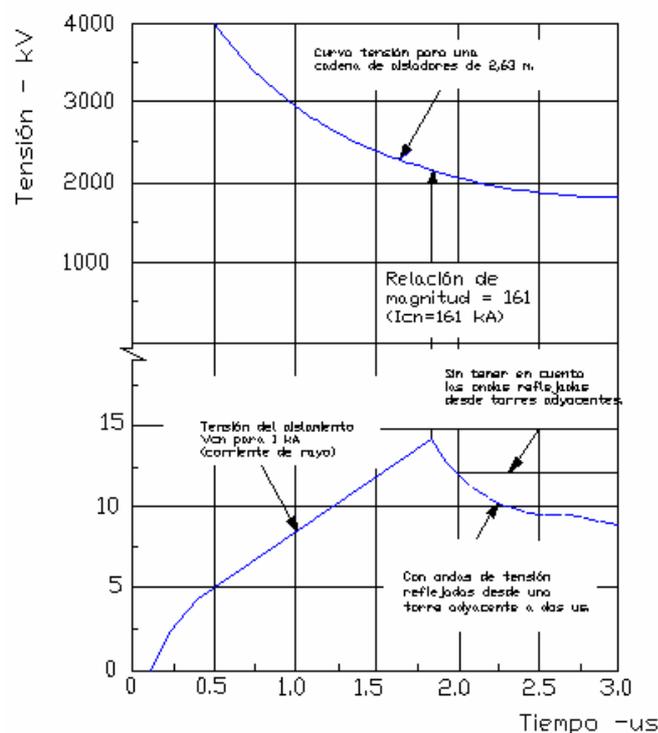
1. Elevación de la tensión con respecto a tierra de la estructura, producida por la descarga de corriente a través de la resistencia de pie de torre.
 1. Configuración de un campo magnético variable con el tiempo entre la torre y las fases, causado por la circulación de corriente a través de la estructura.
2. Los dos efectos mencionados anteriormente, la corriente de descarga por un lado y el campo magnético variable por el otro, y el hecho de que la tensión de las fases permanece igual a la tensión anterior a la descarga atmosférica, hacen que se desarrolle en tensiones netas entre la torre y los

conductores de fase, proporcionales a la tasa de variación de la corriente del rayo incidente y con una forma de onda dependiente de las magnitudes de las dos componentes de tensión.

El método simplificado de los dos puntos tiene en cuenta los siguientes factores:

- ✓ **Las ondas reflejadas.-** desde las torres adyacentes a la estructura sobre la cual (o muy cerca) incidió la descarga atmosférica. Estas ondas reflejadas reducen la tensión en la parte superior y por lo tanto la tasa de flameos. En la figura 3.5 se presenta la tensión (p.u) del aislamiento según la curva v-t considerando o no, las ondas de tensión reflejadas.

FIGURA 3.5
TENSIÓN (p.u) DEL AISLAMIENTO SEGÚN LA CURVA V(Voltaje)-T(Tiempo)
CONSIDERANDO O NO, LAS ONDAS DE TENSIÓN REFLEJADAS



FUENTE: Anderson J. G. Chapter 12 "Lightning performance of transmission lines".
Pag. 564.

- ✓ **La primera descarga del rayo.-** las descargas subsiguientes (en el mismo rayo) no se consideran tan severas como la inicial.
- ✓ **Las ecuaciones de tensión.-** se simplifican por la selección de solo dos puntos de penetración: dos y seis micro segundos.
- ✓ **Factor de acoplamiento (Kn).-** la porción de la corriente del rayo fluyendo a través del cable de guarda induce una tensión sobre cada fase, denominada tensión de acople. La proporción de la tensión total inducida sobre la fase n, a la tensión en la parte superior de la torre se conoce como factor de acoplamiento y se calcula con base en las impedancias de impulso propias de los cables de guarda y de las impedancias mutuas entre cables de guarda y fases. Entre mayor sea Kn (cable de guarda muy cercano a la fase), menor será la tensión impulso a través del aislamiento de la fase n.
- ✓ **Efectos de las tensiones a baja frecuencia.-** puesto que la presencia de estas tensiones puede aumentar el número de salidas observadas, es necesario incluir su efecto en el cálculo de la corriente de rayo crítica necesaria para que ocurra flameo, para posteriormente determinar la probabilidad de ser excedida, que conjuntamente con el número de rayos sobre la línea nos permitan obtener el número de salidas por cien kilómetros por año, por causa del mecanismo de flameo inverso.

3.3.2 SIMBOLOGÍA:

- ✓ r = radio del ancho de las torres de acuerdo a los tipos que existen, mostrados en la figura 3.11.
- ✓ X_{O_A} = Distancia horizontal al conductor A[m]
- ✓ X_{O_B} = Distancia horizontal al conductor B[m]

- ✓ X_{OC} = Distancia horizontal al conductor C[m]
- ✓ ht = Altura de la torre [m]
- ✓ v_{AB} = longitud del vano promedio[m]
- ✓ R_{tierra} = Resistencia de puesta a tierra[ohmios]
- ✓ Vl = Voltaje de Línea (138-230 kV)
- ✓ hg = altura del cable del guarda [m]

3.3.3 DESARROLLO DEL MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DEL SOFTWARE

- a. Cálculo de los voltajes de arco superficial de la cadena de aisladores a los $2 \mu s$ y para $6 \mu s$, por la falta de información mas precisa para la longitud de la cadena de aisladores L_s el voltaje de arco superficial para los tiempos se pueden estimar mediante las siguientes fórmulas:

$$V_{2\mu} = 820 \times L_s \quad (3.8)$$

$$V_{6\mu} = 585 \times L_s \quad (3.9)$$

- b. Cálculo del voltaje en el tope de la torre se lo determina mediante la siguiente expresión:

$$V = 1.8 \times V_{2\mu} \quad (3.10)$$

- c. Cálculo del radio R_c del efecto corona alrededor del conductor de guarda

$$R_c \times \ln\left(\frac{2 \times h_g}{R_c}\right) = \frac{V}{E_o} \quad (3.11)$$

E_o es el valor límite del campo eléctrico para el cual el radio R_c no crece mas, para E_o se asume un valor de 1500 kV/m. V se determino en el paso anterior.

- d. Cálculo de la impedancia característica Z_s del conductor de guarda tomando en cuenta el efecto corona se lo determina con la siguiente expresión:

$$Z_s = 60 \times \sqrt{\ln\left(\frac{2 \times h_g}{r_g}\right) \times \ln\left(\frac{2 \times h_g}{R_c}\right)} \quad (3.12)$$

- e. Cálculo de la impedancia característica Z_s equivalente cuando existen uno y dos conductores de guarda tomando en cuenta el efecto corona para las impedancias propias.

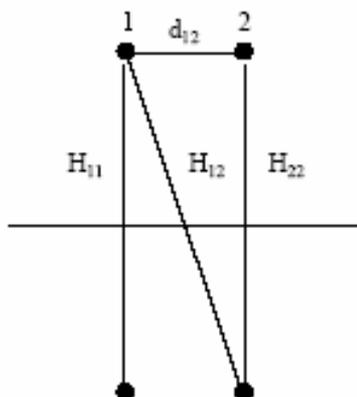
√ **Para un solo hilo de guarda**

$$Z_{11} = Z_s \quad (3.13)$$

$$H_{11} = 2 \times h_g \quad (3.13.1)$$

√ **Para dos hilos de guarda**

FIGURA 3.6
ESTRUCTURA PARA DOS HILOS DE GUARDA



$$Z_s = \sqrt{Z_{11} + Z_{12}} \quad (3.14)$$

$$Z_{12} = 60 \times \ln\left(\frac{H_{12}}{b}\right) \quad (3.14.1)$$

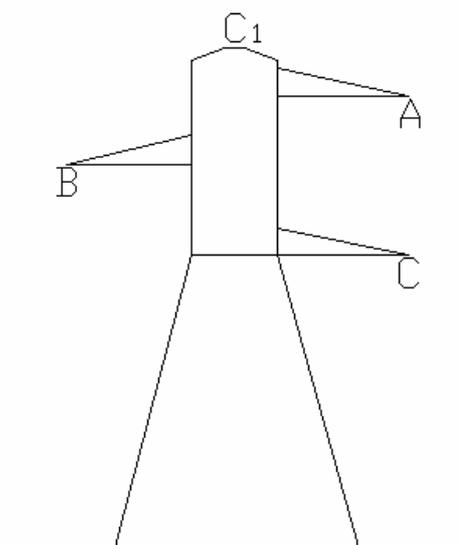
$$H_{12} = \sqrt{H_{11}^2 + b^2} \quad (3.14.2)$$

La expresión 3.14.2 fue derivada bajo la condición $H_{11} = H_{22}$

- f. Cálculo del factor de acoplamiento K_{gf} , y la impedancia Z_{gf} entre el conductor de guarda y el conductor 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 obviamente depende de la geometría de la línea para lo cual se presentan los siguientes:

√ **Para un solo circuito con un solo hilo de guarda**

**FIGURA 3.7
ESTRUCTURA PARA UN SOLO CIRCUITO**



- **Para la fase A**

$$K_A = \frac{Z_{1A}}{Z_{11}} \quad (3.15.1)$$

$$Z_{1A} = 60 * In \left(\frac{H_{1A}}{d_{1A}} \right) \quad (3.15.2)$$

$$d_{1A} = \sqrt{(X_{0A} + X_G)^2 + (hg - hf_A)^2} \quad (3.15.3)$$

$$H_{1A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (X_{0A} - X_G)^2} \quad (3.15.4)$$

○ **Para la fase B**

$$K_B = \frac{Z_{1B}}{Z_{11}} \quad (3.16.1)$$

$$Z_{1B} = 60 * In \left(\frac{H_{1B}}{d_{1B}} \right) \quad (3.16.2)$$

$$d_{1B} = \sqrt{(-X_{0B} + X_G)^2 + (hg - hf_B)^2} \quad (3.16.3)$$

$$H_{1B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (X_{0B} - X_G)^2} \quad (3.16.4)$$

○ **Para la fase C**

$$K_C = \frac{Z_{1C}}{Z_{11}} \quad (3.17.1)$$

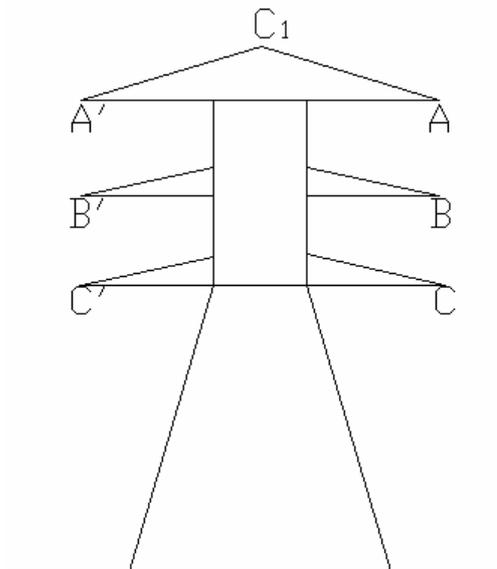
$$Z_{1C} = 60 * In \left(\frac{H_{1C}}{d_{1C}} \right) \quad (3.17.2)$$

$$d_{1C} = \sqrt{(X_{0C} + X_G)^2 + (hg - hf_C)^2} \quad (3.17.3)$$

$$H_{1C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (X_{0C} - X_G)^2} \quad (3.17.4)$$

√ Para dos circuito con un solo hilo de guarda

FIGURA 3.8
ESTRUCTURA PARA DOS CIRCUITOS



○ Para la fase A

$$K_A = \frac{Z_{1A}}{Z_{11}} \quad (3.18.1)$$

$$Z_{1A} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1A}}{d_{1A}}\right) \quad (3.18.2)$$

$$d_{1A} = \sqrt{(X_{0A} + X_G)^2 + (hg - hf_A)^2} \quad (3.18.3)$$

$$H_{1A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (X_{0A} - X_G)^2} \quad (3.18.4)$$

○ **Para la fase B**

$$K_B = \frac{Z_{1B}}{Z_{11}} \quad (3.19.1)$$

$$Z_{1B} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1B}}{d_{1B}}\right) \quad (3.19.2)$$

$$d_{1B} = \sqrt{(X_{0B} + X_G)^2 + (hg - hf_B)^2} \quad (3.19.3)$$

$$H_{1B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (X_{0B} - X_G)^2} \quad (3.19.4)$$

○ **Para la fase C**

$$K_C = \frac{Z_{1C}}{Z_{11}} \quad (3.20.1)$$

$$Z_{1C} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1C}}{d_{1C}}\right) \quad (3.20.2)$$

$$d_{1C} = \sqrt{(X_{0C} + X_G)^2 + (hg - hf_C)^2} \quad (3.20.3)$$

$$H_{1C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (X_{0C} - X_G)^2} \quad (3.20.4)$$

- **Para la fase A'**

$$Z_A = Z'_A \quad (3.21)$$

- **Para la fase B'**

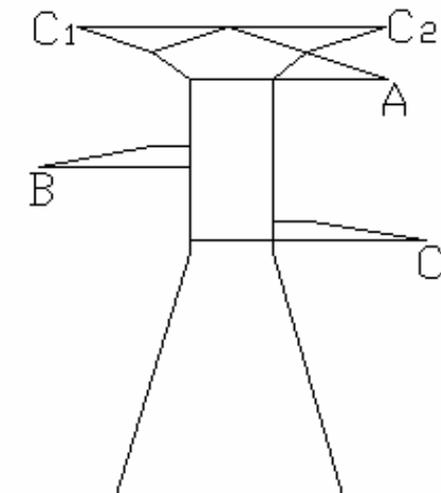
$$Z_B = Z'_B \quad (3.22)$$

- **Para la fase C'**

$$Z_C = Z'_C \quad (3.23)$$

√ **Para un solo circuito con dos hilos de guarda**

FIGURA 3.9
ESTRUCTURA CON UN SOLO CIRCUITO Y CON DOS HILOS DE GUARDA



- **Para la fase A**

$$K_A = \frac{(Z_{1A} + Z_{2A})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.24.1)$$

$$Z_{1A} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1A}}{d_{1A}}\right) \quad (3.24.2)$$

$$Z_{2A} = 60 * \ln\left(\frac{H_{2A}}{d_{2A}}\right) \quad (3.24.3)$$

$$d_{1A} = \sqrt{b + (X_{0A} + X_G)^2 + (hg - hf_A)^2} \quad (3.24.4)$$

$$d_{2A} = F \quad (3.24.5)$$

$$H_{1A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (b + (X_{0A} - X_G))^2} \quad (3.24.6)$$

$$H_{2A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (X_{0A} - X_G)^2} \quad (3.24.7)$$

○ **Para la fase B**

$$K_B = \frac{(Z_{1B} + Z_{2B})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.25.1)$$

$$Z_{1B} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1B}}{d_{1B}}\right) \quad (3.25.2)$$

$$Z_{2B} = 60 * \ln\left(\frac{H_{2B}}{d_{2B}}\right) \quad (3.25.3)$$

$$d_{1B} = \sqrt{b + (-X_{0B} + X_G)^2 + (hg - hf_B)^2} \quad (3.25.4)$$

$$d_{2B} = F \quad (3.25.5)$$

$$H_{1B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (b + (X_{0B} - X_G))^2} \quad (3.25.6)$$

$$H_{2B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (X_{0B} - X_G)^2} \quad (3.25.7)$$

○ **Para la fase C**

$$K_C = \frac{(Z_{1C} + Z_{2C})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.26.1)$$

$$Z_{1C} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1C}}{d_{1C}}\right) \quad (3.26.2)$$

$$Z_{2C} = 60 * \ln\left(\frac{H_{2C}}{d_{2C}}\right) \quad (3.26.3)$$

$$d_{1C} = \sqrt{b + (X_{0C} + X_G)^2 + (hg - hf_C)^2} \quad (3.26.4)$$

$$d_{2C} = F \quad (3.26.5)$$

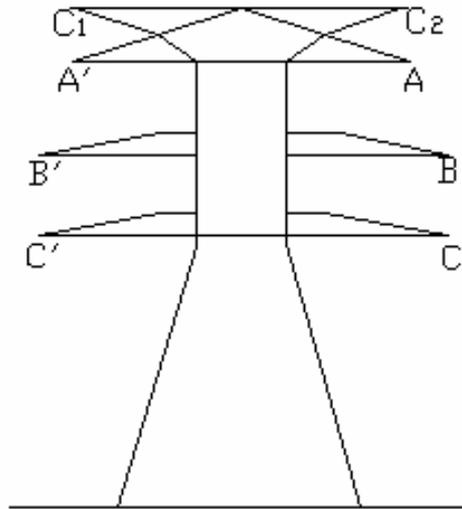
$$H_{1C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (b + (X_{0C} - X_G))^2} \quad (3.26.6)$$

$$H_{2C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (X_{0C} - X_G)^2} \quad (3.26.7)$$

$$H_{1A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (X_{0A} - X_G)^2} \quad (3.26.8)$$

√ **Para dos circuitos con dos hilos de guarda**

FIGURA 3.10
ESTRUCTURA CON DOS CIRCUITOS Y CON DOS HILOS DE
GUARDA



○ **Para la fase A**

$$K_A = \frac{(Z_{1A} + Z_{2A})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.27.1)$$

$$Z_{1A} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1A}}{d_{1A}}\right) \quad (3.27.2)$$

$$Z_{2A} = 60 * \ln\left(\frac{H_{2A}}{d_{2A}}\right) \quad (3.27.3)$$

$$d_{1A} = \sqrt{b + (X_{0A} + X_G)^2 + (hg - hf_A)^2} \quad (3.27.4)$$

$$d_{2A} = F \quad (3.27.5)$$

$$H_{1A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (b + (X_{0A} - X_G))^2} \quad (3.27.6)$$

$$H_{2A} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_A)^2 + (X_{0A} - X_G)^2} \quad (3.27.7)$$

○ **Para la fase B**

$$K_B = \frac{(Z_{1B} + Z_{2B})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.28.1)$$

$$Z_{1B} = 60 * In \left(\frac{H_{1B}}{d_{1B}} \right) \quad (3.28.2)$$

$$Z_{2B} = 60 * In \left(\frac{H_{2B}}{d_{2B}} \right) \quad (3.28.3)$$

$$d_{1B} = \sqrt{b + (X_{0B} + X_G)^2 + (hg - hf_B)^2} \quad (3.28.4)$$

$$d_{2B} = F \quad (3.28.5)$$

$$H_{1B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (b + (X_{0B} - X_G))^2} \quad (3.28.6)$$

$$H_{2B} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_B)^2 + (X_{0B} - X_G)^2} \quad (3.28.7)$$

○ **Para la fase C**

$$K_C = \frac{(Z_{1C} + Z_{2C})}{(Z_{11} + Z_{12})} \quad (3.29.1)$$

$$Z_{1C} = 60 * \ln\left(\frac{H_{1C}}{d_{1C}}\right) \quad (3.29.2)$$

$$Z_{2C} = 60 * \ln\left(\frac{H_{2C}}{d_{2C}}\right) \quad (3.29.3)$$

$$d_{1C} = \sqrt{b + (X_{0C} + X_G)^2 + (hg - hf_C)^2} \quad (3.29.4)$$

$$d_{2C} = F \quad (3.29.5)$$

$$H_{1C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (b + (X_{0C} - X_G))^2} \quad (3.29.6)$$

$$H_{2C} = \sqrt{H_{11} - (hg - hf_C)^2 + (X_{0C} - X_G)^2} \quad (3.29.7)$$

○ **Para la fase A'**

$$Z_{1A} = Z'_{1A} \quad (3.30.1)$$

$$Z_{2A} = Z'_{2A} \quad (3.30.2)$$

○ **Para la fase B'**

$$Z_{1B} = Z'_{1B} \quad (3.30.1)$$

$$Z_{2B} = Z'_{2B} \quad (3.30.2)$$

○ **Para la fase C'**

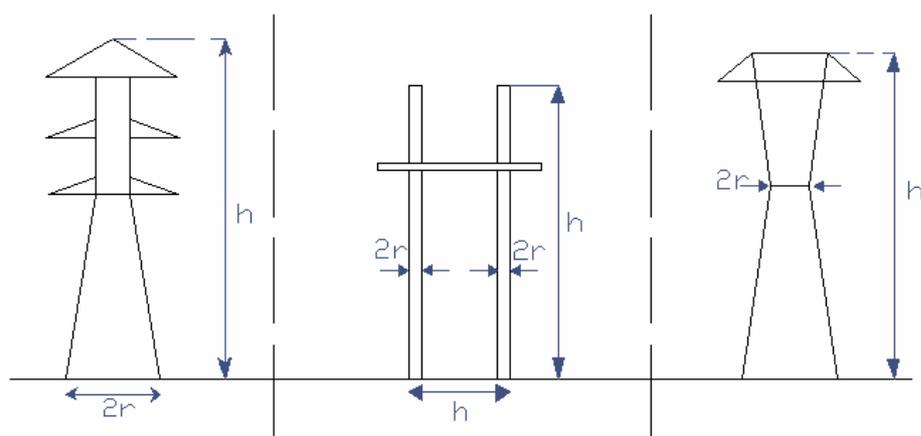
$$Z_{1C} = Z'_{1C} \quad (3.31.1)$$

$$Z_{2C} = Z'_{2C} \quad (3.31.2)$$

1,2: conductores de guarda y C: conductor de fase

- g. Cálculo de la impedancia característica Z_T de la torre, para lo cual se muestra tres tipos de estructuras y las ecuaciones para determinar la Z_T , dependiendo de la geometría de cada torre.

FIGURA 3.11
TIPOS DE ESTRUCTURAS CON SUS RESPECTIVAS IMPEDANCIAS CARACTERÍSTICAS



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

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

(3.32)

$$Z_T = \frac{(Z_p + Z_m)}{2}$$

(3.33)

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

(3.34)

Donde:

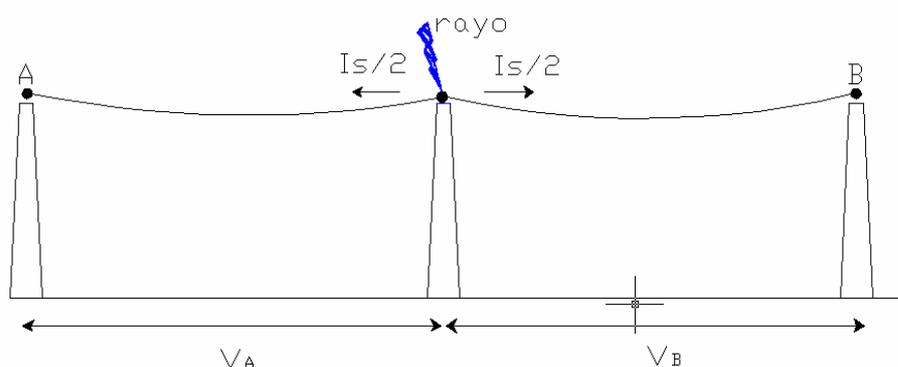
$$Z_p = 60 \times \ln\left(\frac{h}{r}\right) + \frac{90 \times r}{h_g} - 60 \quad (3.33.1)$$

$$Z_m = 60 \times \ln\left(\frac{h_g}{b}\right) + \frac{90 \times r}{b} - 60 \quad (3.33.2)$$

Aproximaciones para las impedancias características de torres.

- h. Cálculo del tiempo de tránsito τ_v entre la torre incidida por el rayo y las torres adyacentes

FIGURA 3.12
TORRES ADYACENTES CONECTADAS AL CONDUCTOR DE GUARDA A UNA DISTANCIA DEL VANO V



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

Las reflexiones de las ondas de voltaje y corriente asociadas a $I_s/2$ que ocurren en los puntos A y B, tienen a reducir el voltaje en la cadena de aisladores de la torre donde incidió el rayo. La mayor o menor reducción depende de la longitud de los vanos v_A y v_B , si estas reflexiones llegan antes o después que el máximo voltaje se desarrolle en la torre. En consecuencia el efecto de estas reflexiones debe ser tomado muy en cuenta porque atenúa la onda del rayo.

Se calcula el tiempo de viaje de la onda reflejada τ_v en μs mediante la expresión:

$$\tau_v = \frac{v_{AB}}{270} \quad (3.35)$$

Donde:

v_{AB} = vano promedio

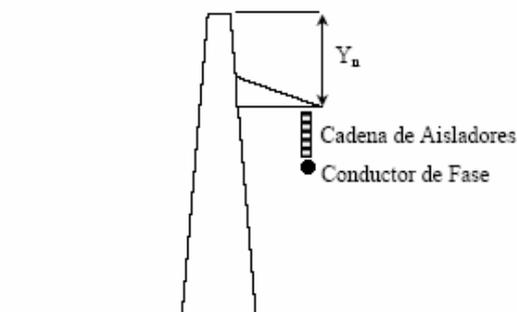
Generalmente se asume $v_A = v_B$

- i. Cálculo del tiempo de tránsito τ_{pn} entre el tope de la torre y el brazo que sostiene el conductor

El tiempo τ_{pn} para la distancia Y_n se determina asumiendo que el fenómeno se desplaza a la velocidad de la luz, en consecuencia τ_{pn} en μs se puede determinar para los siguientes casos:

√ Torre de suspensión

**FIGURA 3.13
ESTRUCTURA DE SUSPENSIÓN**



- Para la fase A

$$\tau_{pA} = \frac{(ht - (hf_A - Wcad))}{300} \quad (3.36)$$

- **Para la fase B**

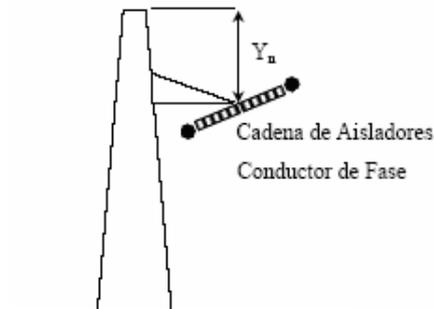
$$\tau_{pB} = \frac{(ht - (hf_B - Wcad))}{300} \quad (3.37)$$

- **Para la fase C**

$$\tau_{pC} = \frac{(ht - (hf_C - Wcad))}{300} \quad (3.38)$$

√ **Torre de retención**

FIGURA 3.14
ESTRUCTURA DE RETENCIÓN



- **Para la fase A**

$$\tau_{pA} = \frac{(ht - hf_A)}{300} \quad (3.39)$$

- **Para la fase B**

$$\tau_{pB} = \frac{(ht - hf_B)}{300} \quad (3.40)$$

o **Para la fase C**

$$\tau_{pC} = \frac{(ht - hf_C)}{300} \quad (3.41)$$

En caso de los $\varphi_{A'}, \varphi_{B'}, \varphi_{C'} = \varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$; respectivamente tanto para la torre de suspensión, como para la de retención.

- j. Selecciones del valor de resistencia a tierra R del sistema de conexión a tierra de la torre de transmisión

Este es el punto de interés para el diseño del Sistema de Conexión a Tierra de la torre. Dependiendo del valor de resistencia de R en donde se construya las torres de transmisión, éste tiene una incidencia sobre la Tasa de Salidas Forzadas esperadas que se asocia al fenómeno de la Descarga Retroactiva.

- k. Cálculo de la impedancia Z_I

$$Z_I = \frac{Z_S \times Z_T}{Z_S + 2 \times Z_T} \quad (3.42)$$

Impedancia intrínseca del circuito en ohmios encontrada por la corriente del rayo en el instante de encontrar el circuito equivalente.

- l. Cálculo de la impedancia Z_W

$$Z_w = \frac{2 \times Z_s^2 \times Z_T}{(Z_s + 2 \times Z_T)^2} \times \frac{Z_T - R_{\text{tierra}}}{Z_T + R_{\text{tierra}}} \quad (3.43)$$

Impedancia de la onda constante de la torre

- m. Cálculo del factor de amortiguamiento ψ (constante de amortiguamiento de la torre que reduce sucesivamente la contribución de la reflexión).

$$\psi = \frac{2 \times Z_T - Z_s}{Z_s + 2 \times Z_T} \times \frac{Z_T - R_{\text{tierra}}}{Z_T + R_{\text{tierra}}} \quad (3.44)$$

- n. Cálculo del factor de refracción α_R de la resistencia a tierra.

$$\alpha_R = \frac{2 \times R_{\text{tierra}}}{Z_T + R_{\text{tierra}}} \quad (3.45)$$

- o. Cálculo del voltaje V_{IT2} en el tope de la torre a los 2 μs debido a 1 kA de corriente inyectada por el rayo.

$$V_{IT2} = \left[Z_I - \frac{Z_w}{1 - \psi} \times \left(1 - \frac{\tau_T}{1 - \psi} \right) \right] \quad (3.46)$$

$$\tau_T = \frac{ht}{300} \quad (3.46.1)$$

τ_T ; tiempo de duración del viaje de la onda, entre la parte superior de la torre y tierra μs .

- p. Cálculo de la componente de voltaje reflejado V_{rT2} en el tope a los 2 μs debido a reflexiones en las torres adyacentes.

$$V_{rT2} = -\frac{4 \times K_s \times V_{1T2}^2}{Z_S} \left[\frac{1 - 2 \times V_{1T2}}{Z_S} \right] (1 - \tau_V) \quad (3.47)$$

Donde el factor K_s se utiliza para tomar en cuenta el efecto amortiguador del conductor de guarda sobre las ondas viajeras que se desplazan por el. Se asume un valor de $K_s = 0,85$.

Si $\tau_V > 1 \mu s$; entonces $V_{rT2} = 0$

- q. Cálculo del voltaje en el tope de la torre a los $2 \mu s$ debido a la corriente de 1 kA y a las reflexiones en las torres adyacentes.

$$V_{T2} = V_{1T2} + V_{rT2} \quad (3.48)$$

- r. Cálculo del voltaje V_{1R2} a los $2 \mu s$ en la R_tierra del SCT (sistema de conexión a tierra) de la torre debido a la corriente de 1 kA de corriente inyectada por el rayo.

$$V_{1R2} = \frac{\alpha_R \times Z_I}{1 - \psi} \left(1 - \frac{\psi \times \tau_T}{1 - \psi} \right) \quad (3.49)$$

- s. Cálculo del voltaje V_{R2} a los $2 \mu s$ en la R_tierra aplicando un factor de reducción para tomar en cuenta el efecto de las reflexiones de torres adyacentes.

$$V_{R2} = \frac{V_{1T2}}{V_{T2}} V_{1R2} \quad (3.50)$$

t. Cálculo del voltaje V_{p2} a los 2 μ s en el brazo que sostiene el conductor de fase.

√ **Primer circuito**

○ **Fase A**

$$V_{p2A} = V_{R2} + \frac{\tau_T - \tau_{pA}}{\tau_T} (V_{T2} - V_{R2}) \quad (3.50.1)$$

○ **Fase B**

$$V_{p2B} = V_{R2} + \frac{\tau_T - \tau_{pB}}{\tau_T} (V_{T2} - V_{R2}) \quad (3.50.2)$$

○ **Fase C**

$$V_{p2C} = V_{R2} + \frac{\tau_T - \tau_{pC}}{\tau_T} (V_{T2} - V_{R2}) \quad (3.50.3)$$

√ **Segundo circuito**

○ **Fase A**

$$V_{p2A'} = V_{p2A} \quad (3.51.1)$$

○ **Fase B**

$$V_{p2B'} = V_{p2B} \quad (3.52.2)$$

○ **Fase C**

$$V_{p2C'} = V_{p2C} \quad (3.53.3)$$

u. Cálculo del voltaje V_{S2} aplicado a la cadena de aisladores a los 2 μ s

√ **Primer circuito**

○ **Fase A**

$$V_{S2A} = V_{P2} - K_A \times V_{T2} \quad (3.54.1)$$

$$K_A = \frac{Z_{1A} + Z_{2A}}{2 \times Z_S} \quad (3.54.2)$$

○ **Fase B**

$$V_{S2B} = V_{P2} - K_B \times V_{T2} \quad (3.55.1)$$

$$K_B = \frac{Z_{1B} + Z_{2B}}{2 \times Z_S} \quad (3.55.2)$$

○ **Fase C**

$$V_{S2C} = V_{P2} - K_C \times V_{T2} \quad (3.56.1)$$

$$K_C = \frac{Z_{1C} + Z_{2C}}{2 \times Z_S} \quad (3.56.2)$$

√ **Segundo circuito**

○ **Fase A**

$$V_{S2A'} = V_{S2A} \quad (3.57)$$

○ **Fase B**

$$V_{S2B'} = V_{S2B} \quad (3.58)$$

○ **Fase C**

$$V_{S2C'} = V_{S2C} \quad (3.59)$$

- v. Cálculo del voltaje V_{T6} a los 6 μ s en el tope de la torre, V_{R6} en la base de la torre y V_{P6} en el brazo que sostiene el conductor de fase, debidos a 1 kA de corriente inyectada por el rayo

$$V_{IT6} = V_{R6} = V_{P6} = \left(\frac{R_{\text{tierra}} \times Z_s}{R_{\text{tierra}} + Z_s} \right) \quad (3.60)$$

- w. Cálculo de la componente de voltaje reflejado V_{rT6} en el tope de la torre a los 6 μ s debido a reflexiones en las torres adyacentes

$$V_{rT6} = - \frac{4 \times K_s \times Z_s \times R_{\text{tierra}}^2}{(Z_s + 2 \times R_{\text{tierra}})^2} \left(1 - \frac{2 \times R_{\text{tierra}}}{Z_s + 2 \times R_{\text{tierra}}} \right) (1 - \tau_v) \quad (3.61)$$

Si $\tau_v > 1$; entonces $V_{rT6} = 0$

- x. Cálculo del en la cadena de aisladores para 6 μ s

√ **Primer circuito**

○ **Fase A**

$$V_{S6A} = [V_{IT6} + V_{rT6}] (1 - K_A) \quad (3.62)$$

○ **Fase B**

$$V_{S6B} = [V_{IT6} + V_{rT6}] (1 - K_B) \quad (3.63)$$

○ **Fase C**

$$V_{S6C} = [V_{IT6} + V_{rT6}] (1 - K_C) \quad (3.64)$$

√ **Segundo circuito**

○ **Fase A**

$$V_{S6A'} = V_{S6A} \quad (3.65)$$

○ **Fase B**

$$V_{S6B'} = V_{S26B} \quad (3.66)$$

○ **Fase C**

$$V_{S6C'} = V_{S6C} \quad (3.67)$$

y. Cálculo de la corriente crítica de descarga del rayo requerida para provocar arco superficial sobre la cadena de aisladores a los 2 μ s

√ **Primer circuito**

○ **Fase A**

$$I_{C2A} = \frac{V_{2\mu}}{V_{S2A}} \quad (3.68)$$

○ **Fase B**

$$I_{C2B} = \frac{V_{2\mu}}{V_{S2B}} \quad (3.69)$$

○ **Fase C**

$$I_{C2C} = \frac{V_{2\mu}}{V_{S2C}} \quad (3.70)$$

√ **Segundo circuito**

- **Fase A**

$$I_{C2A'} = I_{C2A} \quad (3.71)$$

- **Fase B**

$$I_{C2B'} = I_{C2B} \quad (3.72)$$

- **Fase C**

$$I_{C2C'} = I_{C2C} \quad (3.73)$$

z. Cálculo de la corriente crítica de descarga del rayo requerida para provocar arco superficial sobre la cadena de aisladores a los 6 μ s

√ **Primer circuito**

- **Fase A**

$$I_{C6A} = \frac{V_{6\mu}}{V_{S6A}} \quad (3.74)$$

- **Fase B**

$$I_{C6B} = \frac{V_{6\mu}}{V_{S6B}} \quad (3.75)$$

- **Fase C**

$$I_{C6C} = \frac{V_{6\mu}}{V_{S6C}} \quad (3.76)$$

√ **Segundo circuito**

- **Fase A'**

$$I_{C6A'} = I_{C6A} \quad (3.77)$$

- **Fase B'**

$$I_{C6B'} = I_{C26} \quad (3.78)$$

- **Fase C'**

$$I_{C6C'} = I_{C6C} \quad (3.79)$$

- aa. Selección de el menor valor de corriente crítica I_{cm} entre I_{C2} e I_{C6} incluyendo el efecto del voltaje de frecuencia de potencia

$$I_{cm} = \text{menor}(I_{C2}, I_{C6}) \quad (3.80)$$

Con estos valores se debe analizar el efecto del voltaje a frecuencia de potencia. El voltaje de frecuencia de potencia para una fase n $V_o \times \text{Sen}(\theta_n - \alpha_n)$ puede sumarse o restarse aleatoriamente del voltaje aplicado a la cadena de la fase n V_{Sn} . Esto implica que se requiere un valor menor de corriente crítica de descarga del rayo I_c para producir un arco superficial sobre la cadena de aisladores, el valor de esta corriente crítica para cada fase esta determinado por:

$$I_{cn} = \frac{V_m - V_{on} \times \text{Sen}(\theta_n - \alpha_n)}{V_m} \quad (3.81)$$

Donde:

V_m : El voltaje de $V_{2\mu s}$ o $V_{6\mu s}$ correspondiente a I_{cm}

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

Θ_n : ángulo asociado a la frecuencia angular ωt

α_n : ángulo de desfasaje para la fase n: 0, $-2\pi/3$, $2\pi/3$

Para un ciclo completo de cada fase, $0 \leq \theta_n \leq 2\pi$ se puede determinar en cual intervalo $\theta_{1n} \leq \theta_n \leq \theta_{2n}$ cada fase presenta su menor valor de corriente. En este intervalo la fase correspondiente es la más susceptible a desarrollar un arco superficial.

Con la ecuación 3.81 se dibujan las ondas de la corriente crítica para cada fase, y de esta manera se obtienen los intervalos donde cada fase es la más susceptible a desarrollar un arco superficial. Para realizar esto en el CSAFILT se utilizó un método numérico cuyo código fuente está en el anexo N° 4 y para una mejor comprensión se muestra el diagrama de flujo en el anexo N° 2.

bb. Cálculo del valor promedio de la corriente crítica para cada fase I_{pn}

$$I_{pn} = I_{cn} \left\{ 1 + \frac{V_o}{V_m} \frac{\cos(\theta_2 - \alpha_n) - \cos(\theta_1 - \alpha_n)}{\theta_2 - \theta_1} \right\} \quad (3.82)$$

cc. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia P_{in} de rayos para cada fase n con corriente mayor o igual a la corriente promedio obtenidas en el paso anterior.

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

$$P_I = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}\right]} \quad (3.83)$$

Para cada corriente de cada fase se obtiene una probabilidad I_n .

Las curvas típicas para esta probabilidad se explicaron en 1.3

- dd. Cálculo del número de rayos N_T sobre la línea y que inciden sobre la torre

$$N_T = 0,6(N_L - NSF) \quad (3.84)$$

- ee. Cálculo del número total de salidas por fallas de apantallamiento y Por flameos inversos por cada 100 km por año.

$$N_F = \frac{N_T}{100} + NSF \quad (3.85)$$

CAPITULO 4

SALIDAS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

4.1 GENERALIDADES

En redes de tensión nominal inferior a 400 kV las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas son más peligrosas que las debidas a otra causa (por maniobra o temporales), mientras que a más de 400 kV las sobretensiones de maniobra suelen ser las más peligrosas.

En la actualidad todas las líneas de país transmiten energía eléctrica a tensiones menores a 400 kV por lo que las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas son más peligrosas.

Entre las salidas producidas por descargas atmosféricas se deben distinguir dos tipos: las salidas debidas a fallas de apantallamiento y por flameo inverso.

Sumando las salidas por falla de apantallamiento con las debidas al flameo inverso, se obtiene un número total de salidas de la línea debidas a descargas atmosféricas.

Este número debe ser menor o igual que un determinado valor de diseño, que deben determinar las compañías dueñas de la línea, de acuerdo con la mayor o menor repercusión que pueda tener una salida de la línea sobre el resto del sistema y sobre la carga que está alimentando.

Un rayo de con una corriente 30 kA, produce en una línea con impedancia característica de 400 Ω , ondas de voltaje a lado y lado del punto de impacto de

6000 kV, que exceden por amplio margen el BIL (*Basic Insulation Level*) de una línea de 230 kV (aproximadamente de 1050 kV). Por esta razón la probabilidad de que haya flameo entre el conductor y la cruceta o entre dos fases adyacentes y se presente una posterior salida de la línea, es muy cercana al 100% si falla el apantallamiento.

4.2 CAUSAS DE SALIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La aparición de una sobretensión de origen atmosférico en una línea aérea puede ser debida a uno de los mecanismos siguientes:

- ✓ La descarga cae sobre un conductor de fase debido a un apantallamiento insuficiente del cable de tierra o a la inexistencia de éste; se produce una falta si la onda de tensión supera la rigidez dieléctrica del aislamiento. (fallas de apantallamiento)
- ✓ La descarga cae sobre un cable de tierra o un poste, en ambos casos una parte de la corriente del rayo termina propagándose a tierra donde originará sucesivas reflexiones que pueden dar lugar a una tensión superior a la rigidez dieléctrica del aislamiento entre el poste y alguno de los conductores de fase (flameo Inverso).
- ✓ La descarga cae en las cercanías de una línea aérea, pudiendo inducir en ésta tensiones superiores al nivel de aislamiento. [19]

El parámetro que más influye para que salga la línea por causas de flameo inverso es la resistencia de la torre, mientras que el parámetro mas influyente en el apantallamiento, es el nivel cerámico.

Los factores comunes que influyen, en ambos casos es la geometría de los conductores y la cruceta.

1.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LÍNEAS REALES UTILIZANDO EL CSAFILT

El CSAFILT fue probado con tres líneas reales; una línea en construcción, otra ya construida y un ejemplo real dado por la IEEE.

- LT Macas-Méndez-Limón a 138 kV (construida)
- LT Pasto-Quito II a 230kV (en construcción)
- LT 345 kV paper de la IEEE (ejemplo)

En el anexo N° 3 se muestra los reportes del CSAFILT para las tres líneas, también se muestra el reporte dado por Hidroabánico (empresa encargada del apantallamiento de la línea construida), y los papers de la IEEE.

1.4 OBSERVACIONES

En términos generales se puede afirmar que el uso del cable de guarda se hace necesario para zonas con un nivel isocerámico mayor de 20, para otros casos solo se requiere en los primeros 8 km a partir de cada subestación y esto se da mas para la protección de la subestación que para proteger la línea. El BIL (*Basic Insulation Level*) de las líneas de 34,5 kV para abajo es muy pequeño, y por esta causa la efectividad del cable de guarda sea muy baja, porque los rayos que caen sobre la línea la mayoría de las veces producirán contorneos en los aisladores, y es por esta razón es preferible usar pararrayos a lo largo de la línea y/o descargadores en lugar de cable de guarda.

Se recomienda un menor ángulo de apantallamiento (de 30° a 20°) para estructuras más altas de (28 a 35 metros respectivamente).

En caso de estructuras en H se usarán dos cables de guarda unidos entre si y aterrados cada uno independientemente. Un buen aterramiento debe proveerse en cada estructura, especialmente en los primeros 8 km a partir de cada subestación (menos de 30 ohmios).

Los postes de acero o torres de celosía requieren de un aislador mas (en caso de usar aisladores de suspensión respecto al estándar de la REA "Rural

Electrification Administration”) ya que no cuentan con la madera que es de alguna manera un elemento aislante. [17]

CAPÍTULO 5

CSAFILT

5.1 QUE ES EL CSAFILT

El nombre de programa CSAFILT viene de: Cálculo y Simulación del Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión.

Es un software creado para calcular el apantallamiento y flameo inverso en líneas de transmisión, también permite simular cuantos rayos caerán sobre una línea de transmisión y ver mediante un grafico la relación que existe entre la resistencia de puesta a tierra y el numero de salidas por km al año de una línea de transmisión.

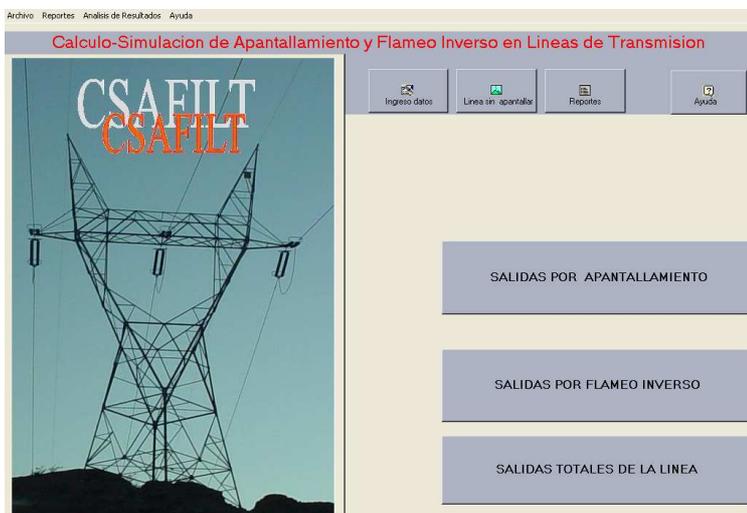
5.2 INSTALACIÓN DEL CSAFILT

El CSAFILT funciona bajo el Matlab 6.5 versión 13, para su instalación se requiere que el Matlab este instalado previamente, la carpeta CSAFILT se copia en la carpeta work del Matlab y luego se escribe CSAFILT en la ventana de comandos.

5.3 UTILIZANDO EL CSAFILT

5.3.1 COMENZANDO A UTILIZAR EL CSAFILT

El siguiente grafico muestra el menú principal del CASFILT



Lo primero que debe hacerse es ingresar los datos, en el botón:



Otra forma es mediante el menú de barra **Archivo** luego **ingreso de Datos** y se desplegara la siguiente ventana:

Archivo

APANTALLAMIENTO		INGRESO DE DATOS	
Longitud de la línea [m] :	<input type="text" value="97.24"/>	Impedancia característica del conductor	
Altura de la estructura [m]:	<input type="text" value="18.95"/>	Numero de conductores por fase :	<input type="text" value="1"/>
Localizacion cable de guarda:		Diametro del haz de conductores [m] :	<input type="text" value="0.01631"/>
Altura punto de amarre [m] :	<input type="text" value="18.85"/>	Diametro del conductor [m] :	<input type="text" value="0.01631"/>
Altura a medio claro [m]:	<input type="text" value="15.09"/>	FLAMEO INVERSO	
Dist. horizontal al cable guarda [m]	<input type="text" value="0.325"/>	Datos de Entrada:	
Localizacion conductor mas expuesto:		Voltaje de Línea [kV] :	<input type="text" value="138"/>
Altura al punto de amarre [m] :	<input type="text" value="17.12"/>	Numero de circuitos :	<input type="text" value="1"/>
Altura a medio claro [m]:	<input type="text" value="12.88"/>	Geometria de la estructura	
Dist. horizontal al conductor [m] :	<input type="text" value="1.764"/>	Tipo de Torre	<input type="text" value="retencion"/>
Nivel ceramico		Radio del cable de guarda [m]:	<input type="text" value="0.00397"/>
Numero dias de tormenta al año :	<input type="text" value="50"/>	Altura punto amarre fase A	<input type="text" value="17.122"/>
Cantidad de rayos a la línea		Altura punto amarre fase B	<input type="text" value="15.322"/>
Separacion entre cables guarda [m]:	<input type="text" value="0"/>	Altura punto amarre fase C	<input type="text" value="13.522"/>
longitud cadena de aisladores [m]:	<input type="text" value="1.3685"/>	Dist. horizontal fase A [m] :	<input type="text" value="1.764"/>
Maxima distancia de choque:		Dist. horizontal fase B [m] :	<input type="text" value="-1.764"/>
factor que relaciona distancia		Dist. horizontal fase C [m] :	<input type="text" value="1.764"/>
de arco a tierra con la	<input type="text" value="1"/>	Impedancia de Impulso de la Torre	
correspondiente a los	1-HV 0.8-EHV 0.64-UHV	Ingreso tipo de estructura:	<input type="text" value="1"/>
y cables de guarda:		Ver el Tipo Estructura	
Voltaje critico de flameo		Ingreso r [m]:	<input type="text" value="0.7715"/>
tiempo interrupcion rayo [micro seg]:	<input type="text" value="6"/>	Longitud vano promedio [km] :	<input type="text" value="250"/>
		Resistencia puesta tierra [ohm]	<input type="text" value="10"/>

En ella se ingresara los datos y la ventana viene con datos por defecto, que dan una idea del rango que tendrá el dato a ingresar.

Si solo se necesita el análisis del apantallamiento solo se debe llenar los datos necesarios para el apantallamiento o solo para el flameo inverso (letras de color azul).

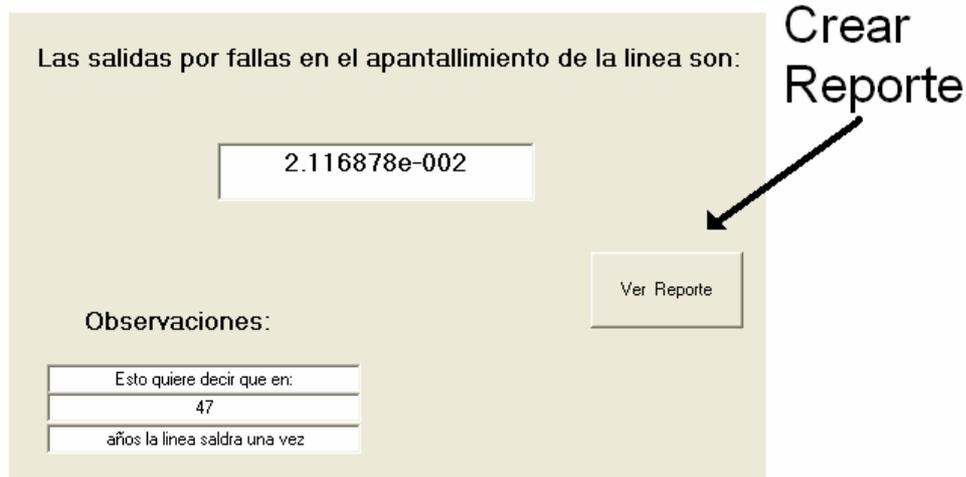
Una vez lleno los datos, se retorna al menú principal:

En donde se puede ver las salidas de la línea presionando en los respectivos botones y poder crear reportes.

Para las salidas por apantallamiento:



Y muestra el siguiente cuadro:



En el ejemplo 0,0211 salidas al año no parece muy claro, y debido a este motivo se colocó la observación, esto es se dividió este valor para uno, y se puede ver que un año la línea no saldrá, pero si existe la probabilidad de que en 47 años salga por lo menos una vez.

5.3.2 CREACIÓN DE REPORTE

En el cuadro de 5.3.2 se ve claramente el botón, para crear un reporte, el cual es mostrado en formato html.

Otra forma de crear reporte es mediante el menú de barra del CSAFILT.



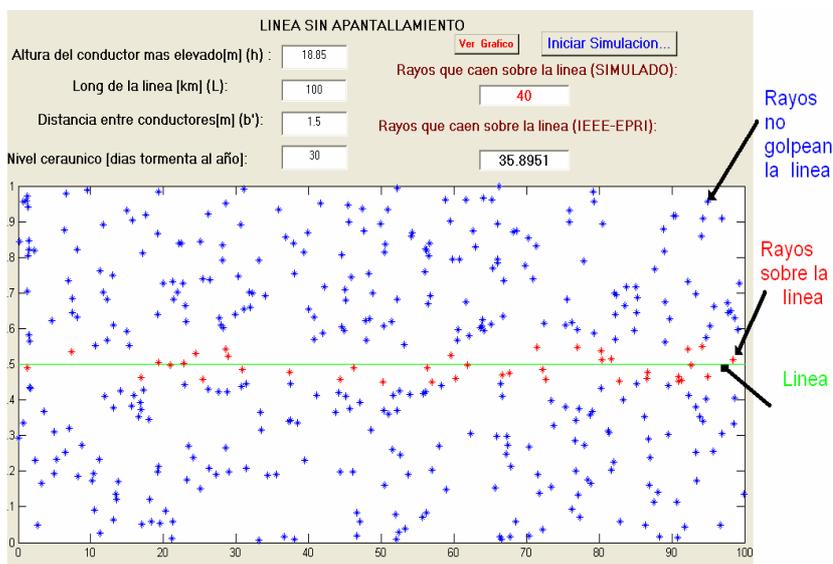
5.3.3 DESCARGAS QUE CAERÁN SOBRE UNA LÍNEA

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

Para ingresar a esta opción se lo puede realizar de dos maneras mediante el menú de barra en análisis de Resultados o con el siguiente icono del menú principal:

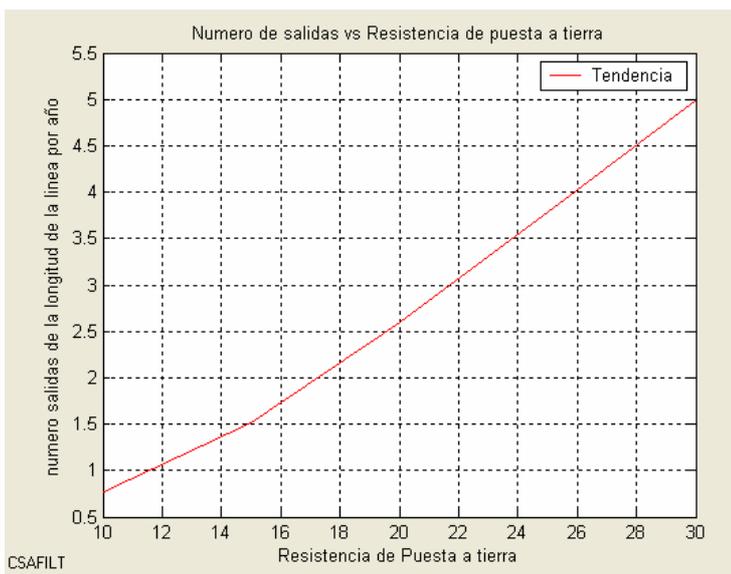


La siguiente figura muestra un ejemplo de una simulación.

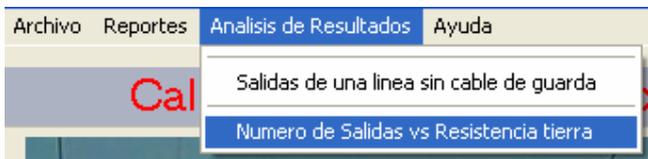


5.3.4 NÚMERO DE SALIDAS VS RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

El CSAFILT 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.



Esta opción se encuentra en la barra de menú como se indica a continuación.



5.4 PREGUNTAS FRECUENTES

5.4.1 ¿COMO CARGAR LOS DATOS ANTERIORES?

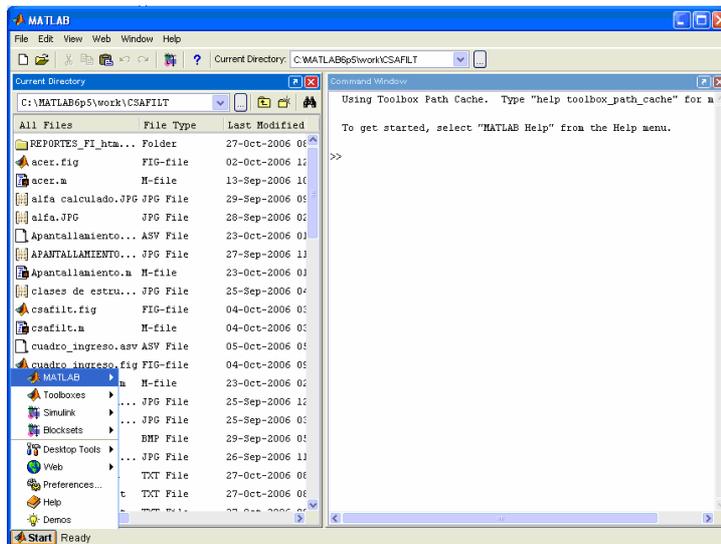
Se ha visto, la necesidad de que se carguen los datos anteriormente ingresados, por que es tedioso y una perdida de tiempo meter los datos para cada corrida, en ves de eso solo se cargan los datos anteriores, y se cambia el o los parámetros necesario, y esto se hace el menú de barra del cuadro de Ingreso de datos como se muestra en la figura:



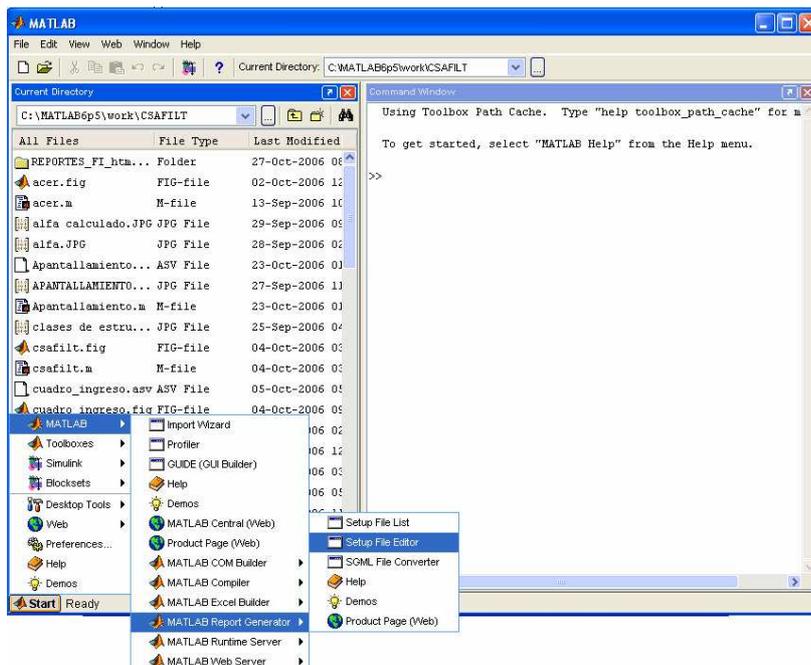
5.4.2 ¿GENERACIÓN DE REPORTE EN OTROS FORMATOS?

Para poder generar reportes en otros formatos como por ejemplo rtf se realiza los siguientes pasos:

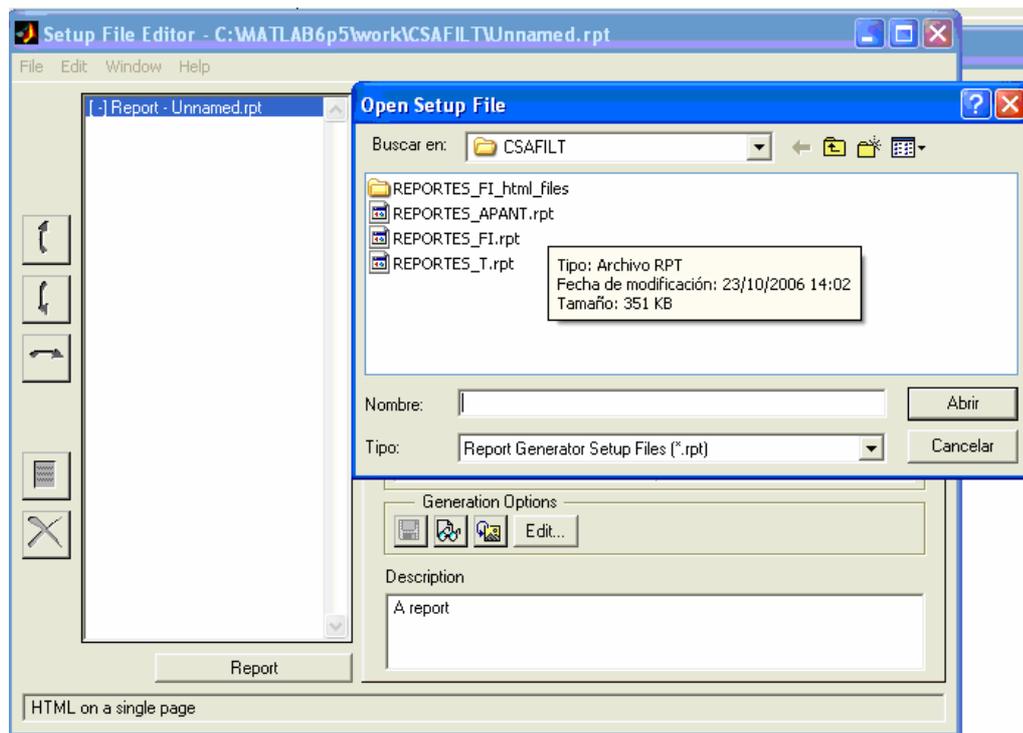
- ✓ Dar clic en Start y dirigirse a la ventana de comandos de MATLAB.



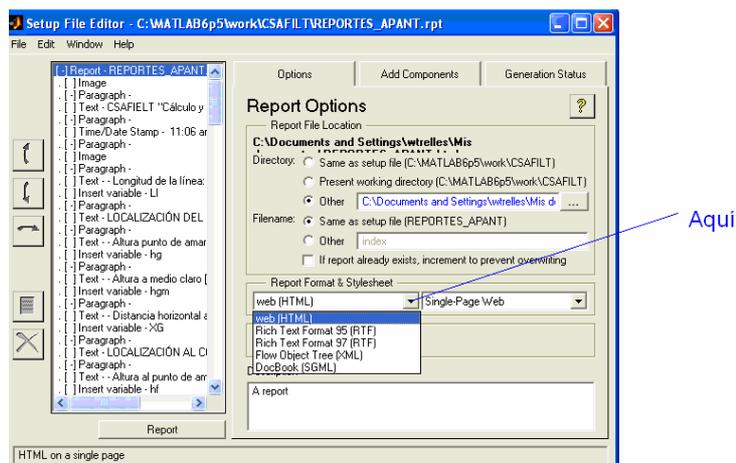
- ✓ Una vez hecho lo anterior, clic en MATLAB seleccionar *Report Generator* y se dirigirse a *Setup File Editor*.



- ✓ Una vez realizado este procedimiento, hacer clic en *File, Open* y abrir la carpeta CSAFILT, REPORTES_APANT.rpt en el caso de apantallamiento y los otros dos siguientes en caso de flameos inversos o los reportes totales.



- ✓ Luego se procede a cambiar de formato dando clic en la pestaña señalada



- ✓ Una vez hecho esto se guarda los cambios dando clic en *File, Save Setup File* y luego de este procedimiento se genera los reportes en el formato que se seleccione.

5.5 CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DEL CSAFILT

El CSAFILT es el resultado de la unión de subprogramas los cuales se muestran en el anexo N° 4, y estos sirven para calcular:

- Salidas por apantallamiento
- Salidas por flameo inverso
- La simulación de los rayos que capta una línea
- Para el cálculo radio corona del conductor, se ha empleado el método de Newton Raphson.
- Calculo de los porcentajes en que una fase domina el semiciclo negativo, para esto se utilizó un método numérico que evalúa punto por punto, y encuentra los porcentajes.

Las líneas de código que inician con % son los comentarios.

Todo el código fuente es mostrado como una larga lista incluyendo los subprogramas y subrutinas, pero en CSAFILT los programas y subrutinas se encuentran en diferentes archivos.

Se ha colocado el código fuente principal, en el anexo N° 4.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

El programa digital es amigable, posee un entorno de simulación y es de código abierto, lo ayudará de una manera didáctica al estudio del apantallamiento y flameo inverso en líneas de transmisión. Ya que su código es abierto, permite 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.

El cable de guarda, en otras palabras es solo un pararrayos horizontal que se extiende sobre y a lo largo de la línea, por lo que al medir la tasa de salidas que tendrá la línea por descargas atmosféricas se está midiendo el grado de confiabilidad que tiene esta.

Al simular 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 dar 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 ceráunicos altos.

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 corono 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 grafico esta relación, para de esta manera decidir cual podría ser un sistema de conexión a tierra de la torre ideal. Hasta el momento en el país no se realiza este análisis, simplemente se lo hace mediante normas de acuerdo a 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 9 y 10 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 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.

Se pudo concluir que mientras mayor sea la longitud de la cada de aisladores menores serán las salidas por flameos inversos, y esto es lógico ya 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. "A method of estimating lightning performance of transmission lines". AIEE

COMITÉ REPORT – Tr. Vol. 69, 1950.

3. "Distribucion – System Protection Manual", Mc Graw Edition Power System Division.
4. "EHV Transmission line reference book". Edison Electric. Inst. New Cork, 1968.
5. "Electrical Transmission and distribution Reference Book", cuarta edición, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pennsylvania.
6. "Transmission lines reference book 345 kV and 115 kV t transmission lines". AIEE, Oct 1962.
7. Anderson J. G.: "Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above", segunda edición, Capítulo 12, Electric Power Research, Palo Alto, California.
8. ARMSTRONG H.R, WHITEHEAD E.R., "Field and Analytical studies of transmission line shielding". IEE-T-PAS, Vol 87, pp. 270-281, 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. BROWN, G.G. y E.R. WHITEHEAD. "Field and analytical studies on transmission line shielding". Electra, March, 1973.
11. Castillo, G. y otros. "Metodología de diseño de aislamiento por descargas atmosféricas de líneas de transmisión". Proyecto de grado U. Nacional,

1981. Director: Ing. Antonio Mejía Umaña.
12. CAYTON, J.M. y E.S. YOUNG. "Estimating lightning performance of lines". IEE-PAS. Nov. 1964.
13. COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD (MÉXICO), Capítulos 6, 7 y 8, "Nature of lightning", "Lightning performance", "Shielding". Documento de consulta, 1975.
14. DIESENDORF W., "Insulation Coordination in High Voltage Electric Power System". London, Butterworths, primera publicación, 1974.
15. Documento NE – 86 – 02: Información Meteorológica Básica para Diseño de líneas de Transmisión – Preliminar, Septiembre de 1986.
16. Documento NE – 86 – 05: Distancias Eléctricas par alas estructuras de líneas de transmisión a 230 kV, Octubre de 1986.
17. DOMMEL, H.W. Y W.SCOTT MEYER. "Computation of electromagnetic transients". IEEE-PAS. Jul 1974.
18. Fernando Chacón OLADE "Guía para el Diseño del sistema Eléctrico Asociado con una pequeña central hidroeléctrica", Volumen I Quito-Ecuador Editorial BID.
19. FEW, ARTHUR A. "Thunder". Scientific American.
20. González Molina Francisco, "Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo" Universidad Politécnica de Cataluña, tesis doctoral, 2001 Barcelona.
21. Instituto Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos especiales

- “Francisco José de Caldas” COLOIENCIAS. Consultaría colombiana S.A (Ingenieros Consultores s.a), “Metodología de Diseño de Líneas de Transmisión y guía de Aplicación de las Estructuras Normalizadas” Interconexión Eléctrica S.A, Septiembre – 1989.
22. LIWIS W.W., “The Protection of transmission systems against lightning”. Dover Publications, Inc. New York, 1965.
23. MENA A., “Introducción al estudio de fenómenos transitorios en líneas de transmisión”, Escuela Politécnica Nacional, 1972.
24. MOELLER F., “Manual del Electrotécnico”. Tomo II, Editorial Labor, S.A., primera edición, Julio 1967, Barcelona.
25. Riofrío Carlos., “Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.- Modelos de análisis“, Escuela Politécnica Nacional, 1977.

ANEXO No 1
CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DE LA SIMULACIÓN DE
LOS RAYOS QUE CAEN EN UNA LÍNEA

```

%Es la Área expuesta a rayos o la Zona de atracción
%La Área expuesta
Area_zona_expuesta=(4*h^1.09+b_prima)/2;
%pasando a kilómetros
delta_x=Area_zona_expuesta/1000;

Línea=0.5

Ng=0.12*T %Método de EPRI es el propuesto en el "libro rojo" de EPRI

%obtengo un número entero

Ng=round(Ng) % Expresión redondeada

Descargas=Ng*L

y1=Línea-delta_x
y2=Línea+delta_x
%Definición del vector que guarda donde cayeron los rayos
k=1;
Yrojo=[];
Xrojo=[];
%Generación de las variables aleatorias en el eje Y
Y=rand(1,Descargas);

X=rand(1,Descargas)*L;

rayos_sobre_linea=0;

% En estas líneas se selecciona los rayos sobre el conductor
for i=1 : Descargas

```

```

if Y(i)<y2
    if Y(i)>y1
        rayos_sobre_linea=rayos_sobre_línea+1;
        Yrojo(k)=Y(i);
        Xrojo(k)=X(i);
        k=k+1;
    end
end
end

% Grafica de la línea
t=0:0.01:L;
    plot(t,Linea,'g:',X,Y,'b*',Xrojo,Yrojo,'r*')

% Grafica los puntos fuera

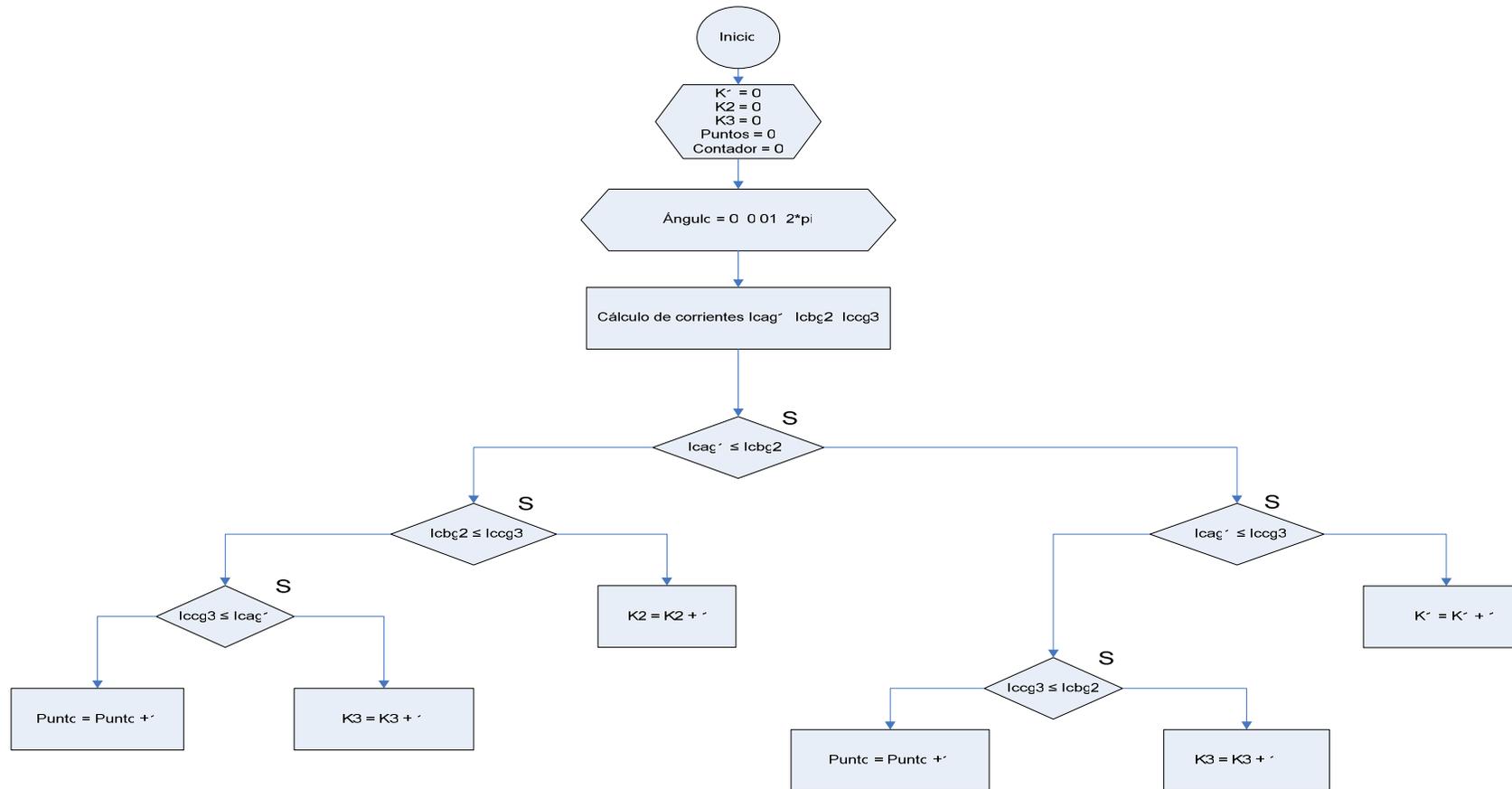
% plot()

% Grafica de los puntos sobre la línea

%Xrojo=rand(1,rayos_sobre_línea) %Se le puso de rojo por que es de color rojo
%plot()
rayos_sobre_línea;
disp('Respuesta por el método EPRI')
NL=0.12*(b_prima+4*h^1.09)*(L*T/1000)

```

ANEXO No 2
MÉTODO NUMÉRICO QUE PERMITE CALCULAR LOS
PORCENTAJES EN QUE CADA FASE ESTA EL NIVEL
MAS BAJO



ANEXO No 3
REPORTES DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS
REALES

**REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT Macas-Méndez-Limón a 138 kV**

FALLAS POR APANTALLAMIENTO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salus"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

10:13 am 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA APANTALLAMIENTO

- Longitud de la línea: 97.24

LOCALIZACIÓN DEL CABLE DE GUARDA

- Altura punto de amarre [m]: 18.85
- Altura a medio claro [m]: 15.09
- Distancia horizontal al cable guarda [m]: 0.325

LOCALIZACIÓN AL CONDUCTOR MÁS EXPUESTO

- Altura al punto de amarre [m]: 17.12
- Altura a medio claro [m]: 12.88
- Distancia horizontal al conductor [m]: 1.764

NIVEL CERÁUNICO

- Número de días de tormenta al año: 47.77

CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA

- Separación entre cables de guarda [m]: 0
- longitud de la cadena de aisladores [m]: 1.3685
- Altura de la estructura [m]: 18.95

MÁXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Factor que relaciona distancia crítica de arqueo a tierra con la correspondiente a los cables de guarda: 1

VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO

- Tiempo de interrupción del rayo [micro segundos]: 6

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR

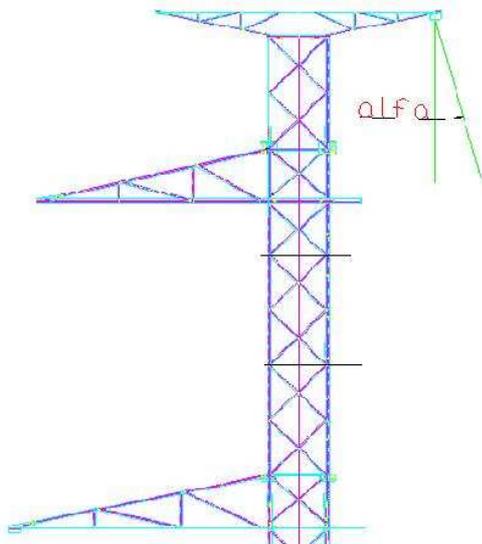
- Número de conductores por fase: 1
- Diámetro del haz de conductores [m]: 0.01631
- Diámetro del conductor [m]: 0.01631

-

RESULTADOS DE APANTALLAMIENTO

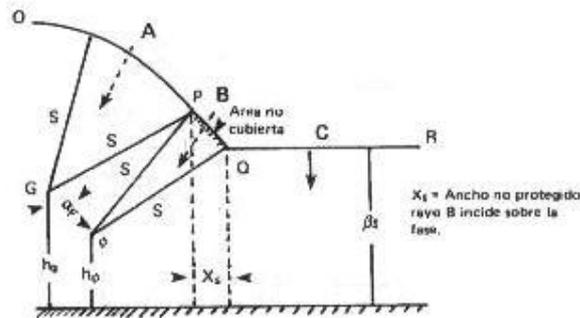
APANTALLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA

- Distancia horizontal c.g. -- conductor [m]: $DX = 1.439$



- Ángulo de apantallamiento [rad]: $\text{alfa} = 0.693828$

- Ángulo de apantallamiento [grados]: $\alpha = 39.7534$
- Distancia entre c.g. y conductor [m]: $F = 2.25025$
- Altura media cable de guarda [m]: $Y'g = 16.3433$
- Altura media conductor [m]: $Y'oi = 14.2933$



MÁXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Altura promedio cables [m]: $Y' = 15.3183$
- Tangente ángulo de apantallamiento [m]: $m = 0.701951$
- Máxima distancia de choque [m]: $S_{max} = 36.0036$

CORRIENTE MÁXIMA PARA FALLAS DE APANTALLAMIENTO

- Corriente máxima [kA]: $I_{max} = 7.23055$

Los valores de los parámetros COEF y EXP más usados son los siguientes:

COEF	EXP
10.0	0.65
6.7	0.80
7.1	0.75
9.4	0.67

El recomendado por IEEE – EPRI es COEF = 10 y EXP = 0.65

VOLTAJE CRITICO

- Voltaje crítico de flameo [kV]: $V_c = 800.848$

RADIO CORONA

- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$
- Radio corona [m]: $R = 0.0931127$

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR [ohm]: $Z_c = 410.003$
CORRIENTE CRÍTICA DE FLAMEO

- Corriente crítica de flameo [kA]: $I_{min} = 3.90655$
- Distancia mínima de choque [m]: $S_{min} = 24.2474$

OBSERVACIÓN

EL APANTALLAMIENTO NO ES PERFECTO

- Ángulo efectivo de apantallamiento [grados]: $\alpha_{E} = 21.6312$
- Ángulo alfa calculado [grados]: ... $\alpha_{calculado} = 35.067$

PROBABILIDAD DE QUE EL PICO DE CORRIENTE EN EL RAYO PUEDE EXCEDER EL VALOR DE I (kA) MÁXIMA Y MÍNIMA

- Probabilidad que suceda la corriente máxima: $PI_{m\acute{a}x} = 0.97779$
- Probabilidad que suceda la corriente mínima: $PI_{min} = 0.995438$

CANTIDAD DE FALLAS DEL APANTALLAMIENTO x 97.24 x km x AÑO

- $N_{sf} = 0.0202232$

Esto quiere decir aproximadamente que en: ... 49 ... años la línea saldrá una vez

**REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT Macas-Méndez-Limón a 138 kV**

FALLAS POR FLAMEO INVERSO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salus"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

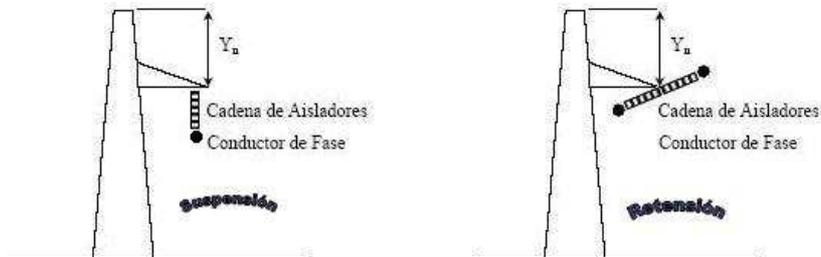
10:16 am 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA FLAMEO INVERSO

- Voltaje de línea [kV]: $V_l = 138$
- Número de circuitos: 1

GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

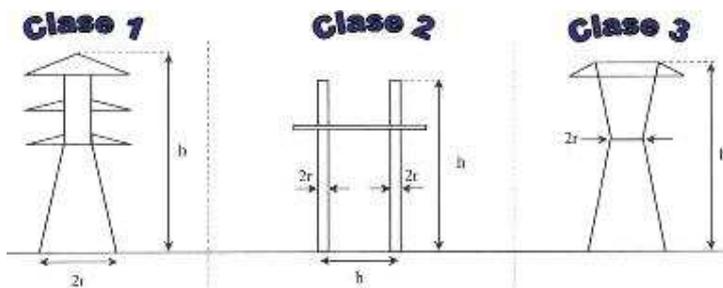
- Tipo de estructura : retención



- Radio del cable de guarda [m]: $r = 0.00397$
- Altura del cable fase A [m]: $hfA = 17.122$
- Altura del cable fase B [m]: $hfB = 15.322$
- Altura del cable fase C [m]: $hfC = 13.522$
- Distancia horizontal fase A [m]: $XoA = 1.764$
- Distancia horizontal fase B [m]: $XoB = -1.764$
- Distancia horizontal fase C [m]: $XoC = 1.764$
- Altura al punto de amarre fase A [m]: $hA = 17.122$
- Altura al punto de amarre fase B [m]: $hB = 15.322$
- Altura al punto de amarre fase C [m]: $hC = 13.522$

IMPEDANCIA DE IMPULSO DE LA TORRE

- Ingrese el tipo de estructura: 1



- Ingrese r [m]: $r = 0.7715$
- Longitud del vano promedio [km]: $vAB = 250$
- Resistencia de puesta a tierra [ohm]: $R_{tierra} = 10$

-

-

RESULTADOS DE FLAMEO INVERSO

TENSIONES DE SOPORTE DEL AISLAMIENTO (RESISTENCIA)

- En dos microsegundos [kV]: $(V_i)_2 = 1122.17$
- En seis microsegundos [kV]: $(V_i)_6 = 800.572$
- Voltaje en la cima de la torre [kV]: 2019.91
- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$
- Radio corona c. de guarda [m]: $R_c = 0.273325$
- Diámetro de corona c. guarda [m]: $D = 0.546649$
- Impedancia propia c. guarda [ohm]: $Z_{11} = 403.037$
- Impedancia mutua c. guarda [ohm]: $Z_{12} = 0$
- Impedancia de impulso c. guarda [ohm]: $Z_s = 403.037$

IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CABLE DE GUARDA Y FASES [ohm]

- C. Guardia - Fase A: $Z_{1A} = 166.391$ $Z_{2A} = 0$
- C. Guardia - Fase B: $Z_{1B} = 127.336$ $Z_{2B} = 0$
- C. Guardia - Fase C: $Z_{1C} = 106.206$ $Z_{2C} = 0$
- C. Guardia - Fase A': $Z_{1A'} = 0$ $Z_{2A'} = 0$
- C. Guardia - Fase B': $Z_{1B'} = 0$ $Z_{2B'} = 0$
- C. Guardia - Fase C': $Z_{1C'} = 0$ $Z_{2C'} = 0$

FACTOR DE ACOPLA PARA CADA FASE

- Fase A: $K_A = 0.412843$
- Fase B: $K_B = 0.315941$
- Fase C: $K_C = 0.263515$
- Fase A': $K_{A'} = 0.412843$
- Fase B': $K_{B'} = 0.315941$
- Fase C': $K_{C'} = 0.263515$

IMPEDANCIA IMPULSO DE LA TORRE

- Ancho de cintura de la estructura [m]: $2.r = 1.543$
- Impedancia impulso de la torre [ohm]: $ZT = 212.917$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE DE LA ONDA

- Tiempo de duración del viaje de la onda [micro segundos]: $Tt = 0.0631667$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE POR EL VANO

- Tiempo de duración del viaje por el vano [micro segundos]: $Ts = 0.925926$

TIEMPO DE VIAJE DESDE LA PARTE SUPERIOR A LA CRUCETA RESPECTIVA

- Fase A [micro segundos]: $TpA = 0.00609333$
- Fase B [micro segundos]: $TpB = 0.0120933$
- Fase C [micro segundos]: $TpC = 0.0180933$
- Fase A' [micro segundos]: $TpA' = 0$
- Fase B' [micro segundos]: $TpB' = 0$
- Fase C' [micro segundos]: $TpC' = 0$

IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL CIRCUITO

- Impedancia intrínseca del circuito [ohm]: $ZI = 103.531$

IMPEDANCIA DE ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

- Impedancia de onda constante de la torre [ohm]: $ZW = 91.6498$

FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

- Factor de amortiguamiento: $\Psi = 0.0250371$

FACTOR DE REFRACCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

- Factor de refracción de la resistencia de puesta a tierra: $\alpha_{\text{R}} = 0.0897193$

TENSIÓN (p.u) EN LA PUNTA DE LA TORRE, A 2 us

- Voltaje en (p.u) en la punta de la torre a 2 [micro segundos]: $(VT)_2 = 15.6176 \dots \text{kV}$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 2 us

- $KS = 0.85$ Valor recomendado por IEEE-EPRI

- Componente de la tensión reflejada en 2 [micro segundos]: $(V'T)_2 = 0.011434 \dots \text{kV}$

- Voltaje real en la cima de la torre en 2 [micro segundos]: $(VT)_2 = 15.629 \dots \text{kV}$

TENSIÓN A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A 2 us

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]:

$(VR)_2 = 9.50482 \dots \text{kV}$

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]:

$(VR)_2 = 9.51177 \dots \text{kV}$

Este último es aplicando un factor de reducción para tomar en cuenta el efecto de las reflexiones de torres adyacentes

TENSIÓN INDUCIDA EN LA CRUCETA EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{pA})^2 = 15.0383$
- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{pB})^2 = 14.4565$
- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{pC})^2 = 13.8748$
- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{pA'})^2 = 0$
- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{pB'})^2 = 0$
- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{pC'})^2 = 0$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{sA})^2 = 8.58592$
- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{sB})^2 = 9.51869$
- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{sC})^2 = 9.75634$
- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{sA'})^2 = 0$
- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{sB'})^2 = 0$
- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{sC'})^2 = 0$

TENSIÓN (p.u) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE, EN 6 us

- Tensión (p.u) en la parte superior de la torre, en 6 [micro segundos]: .. $(V_T)^6 = (V_R)^6 = (V_{pn})^6 = 9.52723 \dots \text{kV}$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 6 us

- $K_S = 0.85 \dots$ Valor recomendado por IEEE-EPRI
- Componente de la tensión reflejada en 6 [micro segundos]: $(V'T)^6 = -0.729514 \dots \text{kV}$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 6 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{sA})^6 = 5.16564$
- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{sB})^6 = 6.01816$
- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{sC})^6 = 6.47939$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{sA'})^6 = 0$
- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{sB'})^6 = 0$
- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{sC'})^6 = 0$

CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 2 us

- Fase A [kA]:..... $(I_{cA})^2 = 130.699$
- Fase B [kA]:..... $(I_{cB})^2 = 117.891$
- Fase C [kA]:..... $(I_{cC})^2 = 115.02$
- Fase A' [kA]:..... $(I_{cA'})^2 = 0$
- Fase B' [kA]:..... $(I_{cB'})^2 = 0$
- Fase C' [kA]:..... $(I_{cC'})^2 = 0$

CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 6 us

- Fase A [kA]:..... $(I_{cA})^6 = 154.98$
- Fase B [kA]:..... $(I_{cB})^6 = 133.026$
- Fase C [kA]:..... $(I_{cC})^6 = 123.557$
- Fase A' [kA]:..... $(I_{cA'})^6 = 0$
- Fase B' [kA]:..... $(I_{cB'})^6 = 0$
- Fase C' [kA]:..... $(I_{cC'})^6 = 0$

TENSIÓN CRESTA FASE-TIERRA PARA LAS FASES

- $V_{on} = 112.677$ [kV]

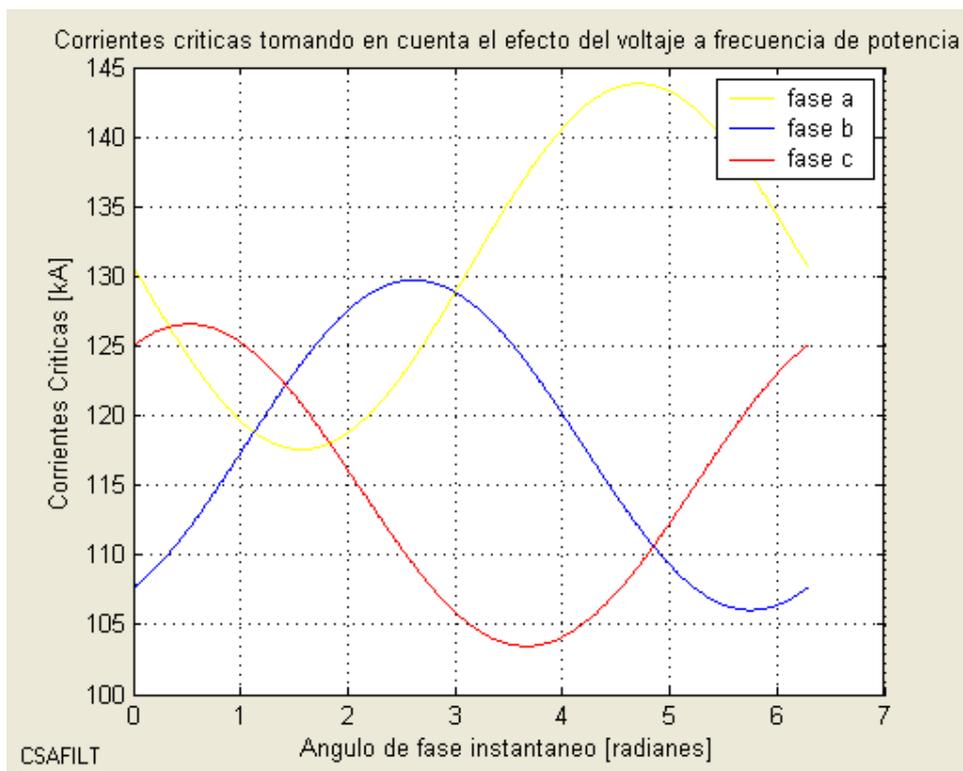
CÁLCULO DE I_{cn}

- Fase A [kA]:..... $I_{cA} = 130.699$
- Fase B [kA]:..... $I_{cB} = 117.891$
- Fase C [kA]:..... $I_{cC} = 115.02$
- Fase A' [kA]:..... $I_{cA'} = 0$
- Fase B' [kA]:..... $I_{cB'} = 0$
- Fase C' [kA]:..... $I_{cC'} = 0$

CÁLCULO DEL V_{cn}

- Fase A [kV]:..... $V_{cA} = 1122.17$
- Fase B [kV]:..... $V_{cB} = 1122.17$
- Fase C [kV]:..... $V_{cC} = 1122.17$
- Fase A' [kV]:..... $V_{cA'} = 0$
- Fase B' [kV]:..... $V_{cB'} = 0$
- Fase C' [kV]:..... $V_{cC'} = 0$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE



.....Teta Equivalente 1 ...Teta Equivalente 2

- Fase A: 0 0.7
- Fase B: 0.7 2.56

- Fase C: 3 6.28319
- Fase A': 0 0
- Fase B': 0 0
- Fase C': 0 0
- % en que la Fase A predomina: 11.2878
- % en que la Fase B predomina: 40.8585
- % en que la Fase C predomina: 47.8537
- % en que la Fase A' predomina: 0
- % en que la Fase B' predomina: 0
- % en que la Fase C' predomina: 0

CÁLCULO DE LA CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO PROMEDIO QUE PRODUCE FLAMEO POR FASE

- Fase A [kA]: $I_{cA'}$ = 126.29
- Fase B [kA]: $I_{cB'}$ = 123.507
- Fase C [kA]: $I_{cC'}$ = 111.09
- Fase A' [kA]: $I_{cA'}$ = 0
- Fase B' [kA]: $I_{cB'}$ = 0
- Fase C' [kA]: $I_{cC'}$ = 0
- Fase A: $P(I_{cA'})$ = 0.0252847
- Fase B: $P(I_{cB'})$ = 0.0267527
- Fase C: $P(I_{cC'})$ = 0.0349416
- Fase A': $P(I_{cA'})$ = 0
- Fase B': $P(I_{cB'})$ = 0
- Fase C': $P(I_{cC'})$ = 0

CALCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE..

- NT = 28.1026

NÚMERO DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE POR 97.24 ..km POR AÑO

- Fase A:NTA = 3.17215
- Fase B:NTB = 11.4823
- Fase C:NTC = 13.4481
- Fase A':NTA' = 0
- Fase B':NTB' = 0
- Fase C':NTC' = 0

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEO INVERSO

- Fase A:NTA' = 0.0802069
- Fase B:NTB' = 0.307183
- Fase C:NTC' = 0.4699
- Fase A':NTA' = 0
- Fase B':NTB' = 0
- Fase C':NTC' = 0

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEOS INVERSOS

- _____NT' = 0.85729 _____

Esto quiere decir aproximadamente que en: ... 1 ... años la línea saldrá una vez por fallas de flameo inverso.

**REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT Macas-Méndez-Limón a 138 kV.**

SALIDAS TOTALES

NÚMERO TOTAL DE SALIDAS POR FALLAS DE APANTALLAMIENTO Y POR
FLAMEOS INVERSOS POR.. 97.24 ..km POR AÑO

- _____NF = 0.877513 _____

INFORME DADO POR HIDROABANICO

ANEXO No. 1A -- REV B
PROGRAMA ID-APANT

2006-02-13

Hoja 1 de 2

Fallas por apantallamiento zona plana (ACACIA 200 F4/31ª)

J.E. JAIMES INGENIEROS S.A.
REPOTENCIACIÓN LT MACAS-MÉNDEZ-LIMÓN A 138 KV

Circuito sencillo con un (1) cable de guarda

1.- GEOMETRÍA DE LA LÍNEA

Localización cable de guarda:

Altura punto de amarre	Yg=	18.85 m
Flecha promedio c.g.	Fg=	3.76 m (para vano promedio de 250 m)
Dist. Horizontal al c.g.	Xg=	0.325 m
Dist. Entre c.g. y conduct.	F=	2.249 m

Localización conductor más expuesto:

Altura punto de amarre	YΦi=	17.12 m
Flecha promedio conduct.	FΦi=	4.24 m
Dist. Horizontal al conduct.	XΦi=	1.764 m

2.- NIVEL CERÁUNICO:

Número de días de tormenta al año	T=	60 días/año
-----------------------------------	----	-------------

3.- DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

Densidad de rayos a tierra	Ng=	7.20 rayos/km ² /año
----------------------------	-----	---------------------------------

4.- CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA

Cantidad de cables de guarda		1
Separación entre cables de guarda	b=	0.00 m
Altura de la estructura,	H=	18.95 m
Cantidad de rayos a la línea	N=	48.27 rayos/100km/año

5.- ALTURA MEDIA CONDUCT. Y C.GUARDA

Altura media cable de guarda	Y'g=	16.34 m
------------------------------	------	---------

Altura media conductor $Y'\Phi = 14.30 \text{ m}$

6.- APANTALLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA

Referirse a la figura No.3A)

Dist. Horizontal c.g. –conductor. $DX = 1.439 \text{ m}$
 Ángulo de apantallamiento $\alpha = 35.09^\circ$

7.- GEOMETRÍA DE LA LÍNEA

De la geometría de la figura No.3b) se tiene:

Const.ajuste dist.choque/tierra $\beta = 1.00$ 1.0 para HV, 0.8 para EHV y 0.64 para UHV lines.

Altura promedio cables $Y' = 15.32 \text{ m}$
 Tangente ángulo apantallam. $m = 0.70 \text{ m}$
 $V = 22.88 \text{ m}$
 $W = -351.32 \text{ m}^2$
 Máxima distancia de choque $S_{max} = 36.01 \text{ m}$

ANEXO No. 1A -- REV B

2006-02-13

Hoja 2 de 2

CORRIENTE MÁXIMA PARA FALLAS DE APANTALLAMIENTO

Coefficiente $K = 10$ Valor recomendado por IEEE-EPRI de los posibles a escoger
 Exponente $n = 0.65$
 Corriente máxima $I_{max} = 7.18 \text{ kA}$

VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO

Longitud del aislador $W = 1.3685 \text{ m}$
 (con el fin de optimizar el diseño, se tomó la máxima distancia entre puntos vivos extremos del aislador y no la distancia de arco en seco según catálogo, que es de 1245 mm)

Tiempo $t = 6.00 \text{ us}$
 Voltaje crítico de flameo $V_c = 800.8 \text{ kV}$ (Curva característica v-t) según CIGRE)

RADIO CORONA

Gradiente límite de corona $E_o = 1500 \text{ kV/m}$
 Solución por Newton Raphson $error = 0.000$
 Radio de corona $R = 0.093 \text{ m}$

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR

Número de subconductores $N = 1$
 Diámetro del haz de conductores $D_b = 0.01631 \text{ m}$
 Diámetro del conductor $D_c = 0.01631 \text{ m}$
 Radio equivalente $r_e = 0.0082 \text{ m}$
 $r_c = 0.0932 \text{ m}$
 $Z_c = 410.2 \ \Omega$

CORRIENTE CRÍTICA DE FLAMEO

Corriente crítica de flameo $I_{min} = 3.90 \text{ kA}$
 Coeficiente $K = 10$ Valor recomendado por IEEE-EPRI de los posibles a escoger
 Exponente $n = 0.65$
 Distancia mínima de choque $S_{min} = 24.24 \text{ m}$

APANTALLAMIENTO PERFECTO

Posic. c.g. para apant. Perfecto $X_{go} = -0.81$ m
 Ángulo efectivo de apantallam. $\alpha_E = 21.62^\circ$

APANTALLAMIENTO NO PERFECTO

ÁNGULO $\omega = 87.34^\circ$
 ÁNGULO $\theta = 17.08^\circ$
 Ancho descubierto $X_s = 4.01$ m

**PROBABILIDAD DE QUE EL PICO DE CORRIENTE EN EL RAYO
 PUEDA EXCEDER EL VALOR DE I (kA) MÁXIMA, MÍNIMA**

PI máxima PI máx= 0.9782
 PI mínima PI mín= 0.9954

CANTIDAD DE FALLAS DEL APANTALLAMIENTO x 100 km x AÑO

Cant.fallas apant.x100kmx año $N_{sf} = 0.0249$

INFORME DADO POR HIDROABANICO

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV 2006-02-13 Hoja 1 de 6
 CALCULO DE FALLAS POR FLAMEO INVERSO ZONA PLANA (ACACIA 200 F4/31^a)

J.E. JAIMES INGENIEROS S.A.
REPOTENCIACIÓN LT MACAS-MÉNDEZ-LIMÓN A 138 KV

CIRCUITO SENCILLO (un -1- cable de guarda)**0.- DATOS DE ENTRADA**

Altura de la estructura $h = 18.95$ m
 Resistencia de puesta a tierra de La torre $R = 10 \Omega$
 Longitud del aislamiento del Aislador 'line-post' $W = 48.27$ descargas/100km/año
 (con el fin de optimizar el diseño, se tomó la máxima distancia entre puntos vivos extremos del aislador y no la distancia de arco en seco según catálogo, que es de 1245 mm)
 Diámetro del conductor $d = 0.01631$ m
 Diámetro del cable de guarda $dg = 0.00794$ m
 Longitud del vano promedio 250 m
 Número total de rayos a la línea
 Por 100 km por año $N = 48.27$ descargas/100km/año
 Valor tomado del cálculo de fallas por apantallamiento
 Fallas de apantallamiento por 100 km por año $N_{sf} = 0.0249$ fallas/100km/año
 Valor tomado del cálculo de fallas por apantallamiento

1.- GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

	Coordenadas		Radio t.	entre subconduc	Volt. Operac	α	
	X	Y				Ángulo de fase	
1 Cable de guardia 1	0.325	18.85	0.00397		0		
2 Cable de guardia 2							
3 Fase A	1.764	17.122	0.008155	0	138	0	0
4 Fase B	-1.764	15.322	0.008155	0	138	-120	-2.0943951

5 Fase C	1.764	13.522	0.008155	0	138	120	2.0943951
6 Fase C'				0			
6 Fase B'				0			
6 Fase A'				0			

2.- TENSIONES DE SOPORTE DEL AISLAMIENTO (RESISTENCIA)

En dos microsegundos	(Vi)2=	1122.17	kV
En seis microsegundos	(Vi)6=	800.5725	kV

Voltaje en la cima de la torre		2019.906	kV			
Gradiente límite de corona	Eo=	1500	kV	F	DF	R'
Solución por Newton Rap.	error=	0.00000		(m)		
Radio de corona c. de guard	R=	0.272957	m	0	3.933392	0.27295702
Diámetro de corona c-guard	D=	0.545914	m			
Impedancia propia c.guarda	Z11=	403.42721	Ω			
Impedancia mutua c.guarda	Z12=	0	Ω			
Impedancia de impulso c.gu	Zs=	403.42721	Ω			

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV

2006-02-13

Hoja 2 de 6

3.- IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CABLE DE GUARDA Y FASES

C.Guardia-Fase A	Z31=	166.39097	Z32=	Ω
C.Guardia-Fase B	Z41=	127.33582	Z42=	Ω
C.Guardia-Fase C	Z51=	106.20609	Z52=	Ω
C.Guardia-Fase C'	Z61=	0	Z62=	Ω
C.Guardia-Fase B'	Z71=	0	Z72=	Ω
C.Guardia-Fase A'	Z81=	0	Z82=	Ω

4.- FACTOR DE ACOPLE PARA CADA FASE

Fase A	K3=	0.41
Fase B	K3=	0.32
Fase C	K3=	0.26
Fase C'	K3=	0.00
Fase B'	K3=	0.00
Fase A'	K3=	0.00

5.- IMPEDANCIA IMPULSO DE LA TORRE

Clase de estructura		1
Ancho de cintura de la estruc	2r=	1.543 m
Separación entre postes	b=	m
Impedancia impulso de la torre	ZT=	212.92 m

6.- TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE DE LA ONDA

Tiempo de duración del viaje de la onda	Tt=	0.063 us
---	-----	----------

7.- TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE POR EL VANO

Tiempo de duración del viaje por el vano	Ts=	0.93 us
--	-----	---------

8.- TIEMPO DE VIAJE DESDE LA PARTE SUPERIOR A LA CRUCETA RESPECTIVA

Tiempo de viaje desde cima torre a cruceta		
Fase A	Tp3=	0.006 us
Fase B	Tp4=	0.012 us

Fase C	Tp5=	0.018	us
Fase C'	TA6=	---	us
Fase B'	Tp7=	---	us
Fase A'	Tp8=	---	us

9.- IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL CIRCUITO

Impedancia intrínseca del circuito	ZI=	103.58	Ω
------------------------------------	-----	--------	----------

10.- IMPEDANCIA DE ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

Impedancia de onda constante de la torre	ZW=	91.74	Ω
--	-----	-------	----------

11.- FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

Factor de amortiguamiento	$\Psi =$	0.025	
---------------------------	----------	-------	--

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV

2006-02-13

Hoja 3 de 6

12.- FACTOR DE REFRACCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Factor de refracción de la resistencia de puesta a tierra	$\alpha_{\text{R}} =$	0.09	
---	-----------------------	------	--

13.- TENSIÓN (PU) EN LA PUNTA DE LA TORRE

A 2 us			
Voltaje en (pu) en la punta de la torre a 2 us	(VT)2=	15.62	kV

14.- COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA

EN 2 us	KS=	0.85	Valor recomendado por IEEE-EPRI
Componente de la tensión reflejada en 2 us	(V'T)2=	0.01	kV
Voltaje real en la cima de la torre en 2 us	(VT)2=	15.63	kV

15.- TENSIÓN A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A 2 us

Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 us	(VR)2=	9.51	kV
resist. de puesta a tierra en 2 us	(VR)2=	9.52	kV

16.- TENSIÓN INDUCIDA EN LA CRUCETA EN 2 us

Tensión inducida en la cruceta en 2 us			
Fase A	(Vp3)2=	15.0	kV (pu)
Fase B	(Vp4)2=	14.5	kV (pu)
Fase C	(Vp5)2=	13.9	kV (pu)
Fase C'	(Vp6)2=		kV (pu)
Fase B'	(Vp7)2=		kV (pu)
Fase A'	(Vp8)2=		kV (pu)

17.- TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 2 us (POR FASE)

Fase A	(Vs3)2=	8.59	kV (pu)
Fase B	(Vs4)2=	9.53	kV (pu)
Fase C	(Vs5)2=	9.77	kV (pu)
Fase C'	(Vs6)2=		kV (pu)
Fase B'	(Vs7)2=		kV (pu)
Fase A'	(Vs8)2=		kV (pu)

18.- TENSIÓN (PU) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE, EN 6 us

Tensión (p.u) en la parte superior de la torre, en 6 us	(VT)6=	9.53	kV (pu)
(VR)6=(Vpn)6=(VT)6			

19.- COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA

EN 6 us $K_s = 0.85$

Componente de la tensión

reflejada en 6 us $(V'T)6 = -0.73$ kV

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV

**Hoja 4 de 6
2006-02-13**

20.- TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 6 us

(POR FASE)

Fase A	(Vs3)6=	5.17	kV (p.u)
Fase B	(Vs4)6=	6.02	kV (p.u)
Fase C	(Vs5)6=	6.48	kV (p.u)
Fase C'	(Vs6)6=		kV (p.u)
Fase B'	(Vs7)6=		kV (p.u)
Fase A'	(Vs8)6=		kV (p.u)

21.- CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 2 us

(POR FASE)

Fase A	(Ic3)2=	130.57	kA
Fase B	(Ic4)2=	117.78	kA
Fase C	(Ic5)2=	114.90	kA
Fase C'	(Ic6)2=		kA
Fase B	(Ic7)2=		kA
Fase A'	(Ic8)2=		kA

22.- CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 6 us

(POR FASE)

Fase A	(Ic3)6=	154.86	kA
Fase B	(Ic4)6=	132.78	kA
Fase C	(Ic5)6=	123.50	kA
Fase C'	(Ic6)6=		kA
Fase B'	(Ic7)6=		kA
Fase A'	(Ic8)6=		kA

Fase A	(Vo3)=	113	kV
Fase B	(Vo4)=	113	kV
Fase C	(Vo5)=	113	kV
Fase C'	(Vo6)=	0	kV
Fase B	(Vo7)=	0	kV
Fase A'	(Vo8)=	0	kV

23.- CALCULO DE Icn

Fase A	Ic3=	130.57 Ka
Fase B	Ic4=	117.78 kA
Fase C	Ic5=	114.90kA
Fase C'	Ic6=	0.00 kA
Fase B'	Ic7=	0.00 kA
Fase A'	Ic8=	0.00 kA

24.- CÁLCULO CURVAS Icn' vs TETA_n (valores para un ángulo determinado) 250.00 TETA_n

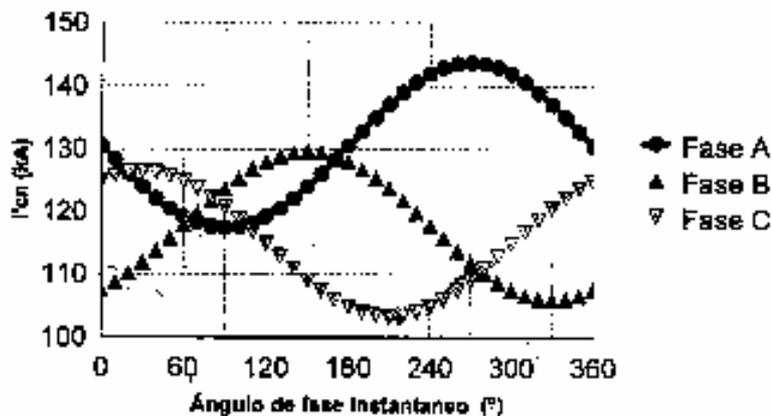
Fase A	Vc3=	1122 kV	4.36	0
Fase B	Vc4=	1122 kV		-2.094395
Fase C	Vc5=	1122 kV		2.0943951
Fase C'	Vc6=	kV		
Fase B	Vc7=	kV		
Fase A'	Vc8=	kV		

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV

Hoja 5 de 6
2006-02-13

25.- CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE

Corriente crítica del rayo que produce flameo



% en que la Fase A predomina:	11.1%	Según figura No.9
% en que la Fase B predomina:	40.7%	Según figura No.9
% en que la Fase C predomina:	47.2%	Según figura No.9
% en que la Fase A' predomina:	0.0%	
% en que la Fase B' predomina:	0.0%	
% en que la Fase C' predomina:	0.0%	

	TETA 1	TETA 2	TETA 1	TETA 2
Fase A:	70	100	1.2217	1.7453
Fase B:	280	60	4.8869	1.0472
Fase C:	110	270	1.9199	4.7124
Fase C':	0	0	0.0000	0.0000
Fase B':	0	0	0.0000	0.0000

Fase A': 0 0 0.0000 0.0000

26.- CÁLCULO DE LA CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO PROMEDIO QUE PRODUCE FLAMEO POR FASE

Fase A	Ic3'=	117.66 kA
Fase B	Ic4'=	123.22 kA
Fase C	Ic5'=	107.26 kA
Fase C'	Ic6'=	----- kA
Fase B'	Ic7'=	----- kA
Fase A'	Ic8'=	----- kA

Fase A	P(IcA')=	0.030
Fase B	P(IcA')=	0.027
Fase C	P(IcA')=	0.038
Fase A'	P(IcA')=	-----
Fase B'	P(IcA')=	-----
Fase C'	P(IcA')=	-----

ANEXO No. 2A -- REV B: PROGRAMA ID-FLINV

**Hoja 6 de 6
2006-02-13**

27.- CALCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE..

NT = 28.95

28.-NÚMERO DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE POR 100 km POR AÑO

Fase A	NT3=	3.22
Fase B	NT4=	12.06
Fase C	NT5=	13.67
Fase C'	NT6=	0.00
Fase B'	NT7=	0.00
Fase A'	NT8=	0.00

29.- CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEO INVERSO

NT3'=	0.10
NT4'=	0.32
NT5'=	0.52
NT6'=	0.00
NT7'=	0.00
NT8'=	0.00

30.- CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEOS

NT'= 0.94

31.- NÚMERO TOTAL DE SALIDAS POR FALLAS DE APANTALLAMIENTO Y POR FLAMEOS INVERSOS POR 100 km POR AÑO

NF= 0.97

REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT Pasto-Quito II a 230Kv

FALLAS POR APANTALLAMIENTO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salus"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

3:49 pm 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA APANTALLAMIENTO

- Longitud de la línea: 137

LOCALIZACIÓN DEL CABLE DE GUARDA

- Altura punto de amarre [m]: 39.5
- Altura a medio claro [m]: 28.6709
- Distancia horizontal al cable guarda [m]: 3.8

LOCALIZACIÓN AL CONDUCTOR MÁS EXPUESTO

- Altura al punto de amarre [m]: 36.5
- Altura a medio claro [m]: 24.4677
- Distancia horizontal al conductor [m]: 5

NIVEL CERÁUNICO

- Número de días de tormenta al año: 50

CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA

- Separación entre cables de guarda [m]: 7.6
- longitud de la cadena de aisladores [m]: 2.875
- Altura de la estructura [m]: 39.5

MÁXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Factor que relaciona distancia crítica de arqueo a tierra con la correspondiente a los cables de guarda: 1

VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO

- Tiempo de interrupción del rayo [micro segundos]: 6

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR

- Número de conductores por fase: 1
- Diámetro del haz de conductores [m]: 0.032
- Diámetro del conductor [m]: 0.032

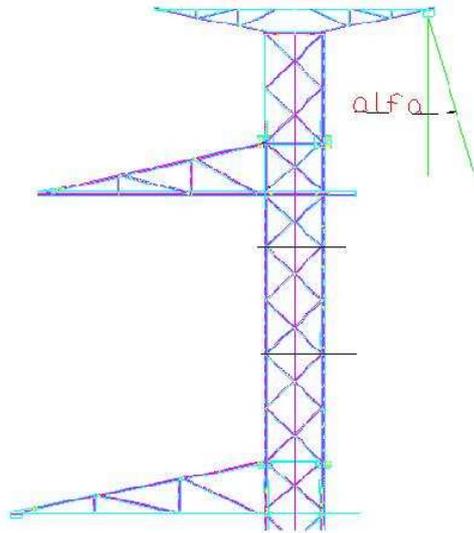
-

RESULTADOS DE APANTALLAMIENTO

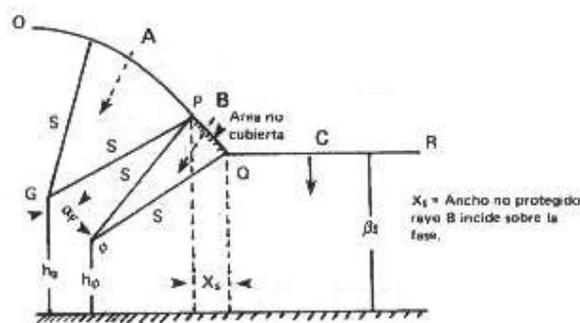
CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA - Cantidad de rayos a la línea: $N_g = 151.351$

APANTALLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA

- Distancia horizontal c.g. -- conductor [m]: $DX = 1.2$



- Ángulo de apantallamiento [rad]: $\alpha = 0.380506$
- Ángulo de apantallamiento [grados]: $\alpha = 21.8014$
- Distancia entre c.g. y conductor [m]: $F = 3.2311$
- Altura media cable de guarda [m]: $Y'g = 32.2806$
- Altura media conductor [m]: $Y'oi = 28.4785$



MAXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Altura promedio cables [m]: $Y' = 30.3795$
- Tangente ángulo de apantallamiento [m]: $m = 0.315612$
- Máxima distancia de choque [m]: $S_{max} = 43.46$

CORRIENTE MÁXIMA PARA FALLAS DE APANTALLAMIENTO

- Corriente máxima [kA]: $I_{max} = 9.66177$

Los valores de los parámetros COEF y EXP más usados son los siguientes:

COEF	EXP
10.0	0.65
6.7	0.80
7.1	0.75
9.4	0.67

El recomendado por IEEE – EPRI es COEF = 10 y EXP = 0.65

VOLTAJE CRÍTICO

- Voltaje crítico de flameo [kV]: $V_c = 1682.45$

RADIO CORONA

- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$

- Radio corona [m]: $R = 0.195034$

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR [ohm]: $Z_c = 412.657$

CORRIENTE CRÍTICA DE FLAMEO

- Corriente crítica de flameo [kA]: $I_{min} = 8.15425$

- Distancia mínima de choque [m]: $S_{min} = 39.1201$

OBSERVACIÓN

EL APANTALLAMIENTO NO ES PERFECTO

- Ángulo efectivo de apantallamiento [grados]: $\alpha_E = 12.9268$

- Ángulo alfa calculado [grados]: ... $\alpha_{calculado} = 17.5163$

PROBABILIDAD DE QUE EL PICO DE CORRIENTE EN EL RAYO PUEDE

EXCEDER EL VALOR DE I (kA) MÁXIMA Y MÍNIMA

- Probabilidad que suceda la corriente máxima: $PI_{m\acute{a}x} = 0.95396$

- Probabilidad que suceda la corriente mínima: $PI_{min} = 0.969885$

CANTIDAD DE FALLAS DEL APANTALLAMIENTO x 137 x km x AÑO

- $N_{sf} = 0.0107219$

Esto quiere decir aproximadamente que en: ... 93 ... años la línea saldrá una vez

REPORTE DADO POR EL CSAFILT

LT Pasto-Quito II a 230Kv

FALLAS POR FLAMEO INVERSO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salius"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

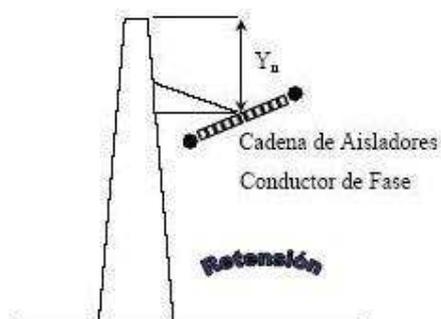
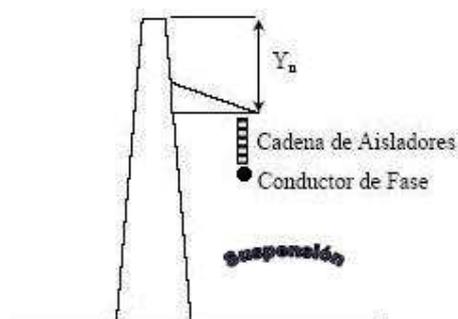
3:52 pm 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA FLAMEO INVERSO

- Voltaje de línea [kV]: $V_l = 230$
- Número de circuitos: 2

GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

- Tipo de estructura : retención

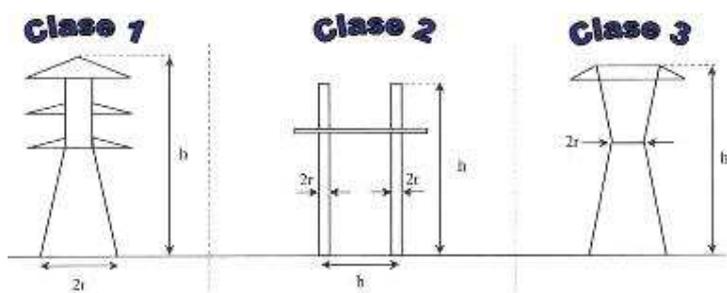


- Radio del cable de guarda [m]: $r = 0.00397$
- Altura del cable fase A [m]: $hfA = 36.5$
- Altura del cable fase B [m]: $hfB = 29.5$
- Altura del cable fase C [m]: $hfC = 22.5$
- Distancia horizontal fase A [m]: $XoA = 5$
- Distancia horizontal fase B [m]: $XoB = 5.5$
- Distancia horizontal fase C [m]: $XoC = 5$

- Altura al punto de amarre fase A [m]: $h_A = 36.5$
- Altura al punto de amarre fase B [m]: $h_B = 29.5$
- Altura al punto de amarre fase C [m]: $h_C = 22.5$

IMPEDANCIA DE IMPULSO DE LA TORRE

- Ingrese el tipo de estructura: 1



- Ingrese r [m]: $r = 3.3795$
- Longitud del vano promedio [km]: $v_{AB} = 400$
- Resistencia de puesta a tierra [ohm]: $R_{\text{tierra}} = 10$

-

-

RESULTADOS DE FLAMEO INVERSO

TENSIONES DE SOPORTE DEL AISLAMIENTO (RESISTENCIA)

- En dos microsegundos [kV]: $(V_i)_2 = 2357.5$
- En seis microsegundos [kV]: $(V_i)_6 = 1681.88$
- Voltaje en la cima de la torre [kV]: 4243.5
- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$
- Radio corona c. de guarda [m]: $R_c = 0.574585$
- Diámetro de corona c. guarda [m]: $D = 1.14917$
- Impedancia propia c. guarda [ohm]: $Z_{11} = 418.86$
- Impedancia mutua c. guarda [ohm]: $Z_{12} = 140.754$
- Impedancia de impulso c. guarda [ohm]: $Z_s = 279.807$

IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CABLE DE GUARDA Y FASES [ohm]

- C. Guardia - Fase A: $Z1A = 126.46$ $Z2A = 189.482$
- C. Guardia - Fase B: $Z1B = 97.7352$ $Z2B = 183.695$
- C. Guardia - Fase C: $Z1C = 68.741$ $Z2C = 171.361$
- C. Guardia - Fase A': $Z1A' = 126.46$ $Z2A' = 189.482$
- C. Guardia - Fase B': $Z1B' = 97.7352$ $Z2B' = 183.695$
- C. Guardia - Fase C': $Z1C' = 68.741$ $Z2C' = 171.361$

FACTOR DE ACOPLA PARA CADA FASE

- Fase A: $KA = 0.564571$
- Fase B: $KB = 0.502901$
- Fase C: $KC = 0.429049$
- Fase A': $KA' = 0.564571$
- Fase B': $KB' = 0.502901$
- Fase C': $KC' = 0.429049$

IMPEDANCIA IMPULSO DE LA TORRE

- Ancho de cintura de la estructura [m]: $2.r = 6.759$
- Impedancia impulso de la torre [ohm]: $ZT = 168.528$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE DE LA ONDA

- Tiempo de duración del viaje de la onda [micro segundos]: $Tt = 0.131667$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE POR EL VANO

- Tiempo de duración del viaje por el vano [micro segundos]: $Ts = 1.48148$

TIEMPO DE VIAJE DESDE LA PARTE SUPERIOR A LA CRUCETA RESPECTIVA

- Fase A [micro segundos]: $TpA = 0.01$
- Fase B [micro segundos]: $TpB = 0.0333333$
- Fase C [micro segundos]: $TpC = 0.0566667$
- Fase A' [micro segundos]: $TpA' = 0.01$
- Fase B' [micro segundos]: $TpB' = 0.0333333$
- Fase C' [micro segundos]: $TpC' = 0.0566667$

IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL CIRCUITO

- Impedancia intrínseca del circuito [ohm]: $ZI = 76.4437$

IMPEDANCIA DE ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

- Impedancia de onda constante de la torre [ohm]: $ZW = 61.5803$

FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

- Factor de amortiguamiento: $\Psi = 0.0824085$

FACTOR DE REFRACCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

- Factor de refracción de la resistencia de puesta a tierra: $\alpha_{\text{R}} = 0.112028$

TENSIÓN (p.u) EN LA PUNTA DE LA TORRE, A 2 us

- Voltaje en (p.u) en la punta de la torre a 2 [micro segundos]: $(V_T)_2 = 18.9627 \dots \text{kV}$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 2 us

- $K_S = 0.85$ Valor recomendado por IEEE-EPRI

- Componente de la tensión reflejada en 2 [micro segundos]: $(V'T)_2 = -0.277632 \dots \text{kV}$

- Voltaje real en la cima de la torre en 2 [micro segundos]: $(V_T)_2 = 18.6851 \dots \text{kV}$

TENSIÓN A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A 2 us

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]: .. $(V_R)_2 = 9.35958 \dots \text{kV}$

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]: .. $(V_R)_2 = 9.22254 \dots \text{kV}$

Este último es aplicando un factor de reducción para tomar en cuenta el efecto de las reflexiones de torres adyacentes

TENSIÓN INDUCIDA EN LA CRUCETA EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{pA})_2 = 17.9768$

- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{pB})_2 = 16.3242$

- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{pC})_2 = 14.6716$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{pA'})_2 = 17.9768$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{pB'})_2 = 16.3242$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{pC'})_2 = 14.6716$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{sA})_2 = 7.42776$

- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{sB})_2 = 6.92746$

- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{sC})_2 = 6.65476$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{sA'})_2 = 7.42776$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{sB'})_2 = 6.92746$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{sC'})_2 = 6.65476$

TENSIÓN (p.u) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE, EN 6 us

- Tensión (p.u) en la parte superior de la torre, en 6 [micro segundos]: $..(VT)_6 = (VR)_6 = (Vpn)_6 = 9.3329 \dots kV$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 6 us

- $KS = 0.85 \dots$ Valor recomendado por IEEE-EPRI

- Componente de la tensión reflejada en 6 [micro segundos]: $.....(V'T)_6 = -0.987804 \dots kV$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 6 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(VsA)_6 = 3.6337$

- Fase B [kV](p.u):..... $(VsB)_6 = 4.14834$

- Fase C [kV](p.u):..... $(VsC)_6 = 4.76464$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(VsA')_6 = 3.6337$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(VsB')_6 = 4.14834$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(VsC')_6 = 4.76464$

CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 2 us

- Fase A [kA]:..... $(IcA)_2 = 317.39$

- Fase B [kA]:..... $(IcB)_2 = 340.312$

- Fase C [kA]:..... $(IcC)_2 = 354.258$

- Fase A' [kA]:..... $(IcA')_2 = 317.39$

- Fase B' [kA]:..... $(IcB')_2 = 340.312$

- Fase C' [kA]:..... $(IcC')_2 = 354.258$

CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 6 us

- Fase A [kA]:..... $(IcA)_6 = 462.855$

- Fase B [kA]:..... $(IcB)_6 = 405.433$

- Fase C [kA]:..... $(IcC)_6 = 352.991$

- Fase A' [kA]:..... $(IcA')_6 = 462.855$

- Fase B' [kA]:..... $(IcB')_6 = 405.433$

- Fase C' [kA]:..... $(IcC')_6 = 352.991$

TENSIÓN CRESTA FASE-TIERRA PARA LAS FASES

- $V_{on} = 187.794 [kV]$

CÁLCULO DE I_{cn}

- Fase A [kA]:..... $IcA = 317.39$

- Fase B [kA]:..... $IcB = 340.312$

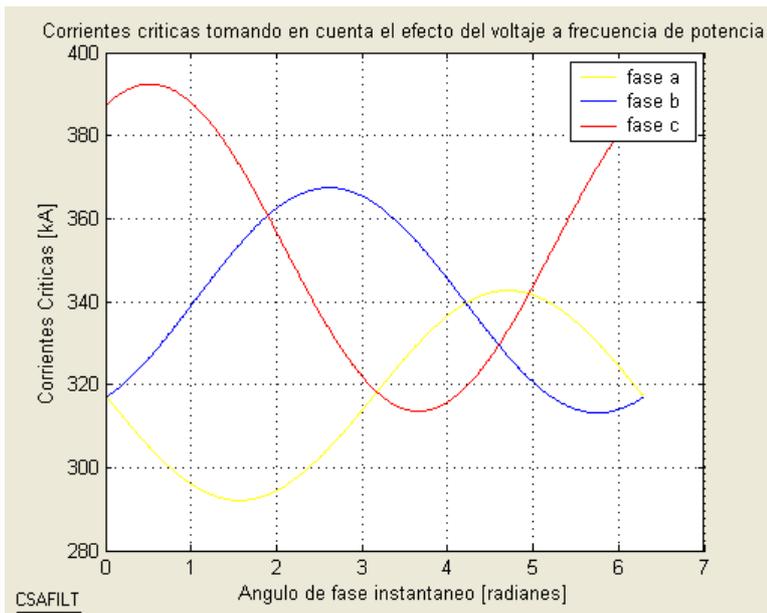
- Fase C [kA]:..... $IcC = 352.991$

- Fase A' [kA]:..... IcA' = 317.39
- Fase B' [kA]:..... IcB' = 340.312
- Fase C' [kA]:..... IcC' = 352.991

CÁLCULO DEL Vcn

- Fase A [kV]:..... VcA = 2357.5
- Fase B [kV]:..... VcB = 2357.5
- Fase C [kV]:..... VcC = 1681.88
- Fase A' [kV]:..... VcA' = 2357.5
- Fase B' [kV]:..... VcB' = 2357.5
- Fase C' [kV]:..... VcC' = 1681.88

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE



.....Teta Equivalente 1 ...Teta Equivalente 2

- Fase A: 0 3.15
- Fase B: 3.15 1.7
- Fase C: 1.41 6.28319
- Fase A': 0 3.15
- Fase B': 3.15 1.7
- Fase C': 1.41 6.28319
- % en que la Fase A predomina: 50.2385

- % en que la Fase B predomina: 27.186
- % en que la Fase C predomina: 22.5755
- % en que la Fase A' predomina: 50.2385
- % en que la Fase B' predomina: 27.186
- % en que la Fase C' predomina: 22.5755

CÁLCULO DE LA CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO PROMEDIO QUE PRODUCE FLAMEO POR FASE

- Fase A [kA]: $I_{cA'} = 301.338$
- Fase B [kA]: $I_{cB'} = 364.647$
- Fase C [kA]: $I_{cC'} = 342.68$
- Fase A' [kA]: $I_{cA'} = 301.338$
- Fase B' [kA]: $I_{cB'} = 364.647$
- Fase C' [kA]: $I_{cC'} = 342.68$
- Fase A: $P(I_{cA'}) = 0.00269667$
- Fase B: $P(I_{cB'}) = 0.0016442$
- Fase C: $P(I_{cC'}) = 0.00193192$
- Fase A': $P(I_{cA'}) = 0.00269667$
- Fase B': $P(I_{cB'}) = 0.0016442$
- Fase C': $P(I_{cC'}) = 0.00193192$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE..

- $NT = 75.67$

NÚMERO DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE POR 137 ..km POR AÑO

- Fase A: $NTA = 38.0155$
- Fase B: $NTB = 20.5717$
- Fase C: $NTC = 17.0829$
- Fase A': $NTA' = 38.0155$
- Fase B': $NTB' = 20.5717$
- Fase C': $NTC' = 17.0829$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEO INVERSO

- Fase A: $NTA' = 0.102515$
- Fase B: $NTB' = 0.033824$

- Fase C:NTC' = 0.0330028

- Fase A':NTA' = 0.102515

- Fase B':NTB' = 0.033824

- Fase C':NTC' = 0.0330028

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE QUE PRODUCIRÍAN
FLAMEOS INVERSOS

- _____NT' = 0.338684 _____

Esto quiere decir aproximadamente que en: ... 3 ... años la línea saldrá una vez por fallas de
flameo inverso.

LT Pasto-Quito II a 230Kv**SALIDAS TOTALES**

NÚMERO TOTAL DE SALIDAS POR FALLAS DE APANTALLAMIENTO Y POR
FLAMEOS INVERSOS POR.. 137 ..km POR AÑO

- _____NF = 0.349406 _____

REPORTE DADO POR EL CSAFILT

LT 345 kV paper de la IEEE

FALLAS POR APANTALLAMIENTO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salus"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

2:03 pm 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA APANTALLAMIENTO

- Longitud de la línea: 100

LOCALIZACIÓN DEL CABLE DE GUARDA

- Altura punto de amarre [m]: 39.3

- Altura a medio claro [m]: 32.3

- Distancia horizontal al cable guarda [m]: 5.5

LOCALIZACIÓN AL CONDUCTOR MÁS EXPUESTO

- Altura al punto de amarre [m]: 27.4

- Altura a medio claro [m]: 20.4

- Distancia horizontal al conductor [m]: 8.6

NIVEL CERÁUNICO

- Número de días de tormenta al año: 30

CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA

- Separación entre cables de guarda [m]: 11

- longitud de la cadena de aisladores [m]: 2.63

- Altura de la estructura [m]: 39.3

MÁXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Factor que relaciona distancia crítica de arqueo a tierra con la correspondiente a los cables de guarda: 0.8

VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO

- Tiempo de interrupción del rayo [micro segundos]: 6

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR

- Número de conductores por fase: 2

- Diámetro del haz de conductores [m]: 0.0825

- Diámetro del conductor [m]: 0.0296

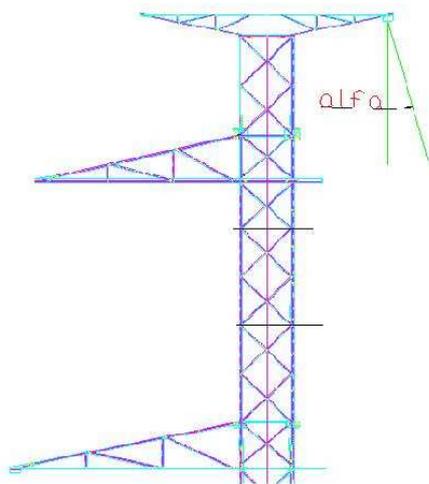
-

RESULTADOS DE APANTALLAMIENTO

CANTIDAD DE RAYOS A LA LÍNEA - Cantidad de rayos a la línea: $N_g = 72.5738$

APANTALLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA

- Distancia horizontal c.g. -- conductor [m]: $DX = 3.1$



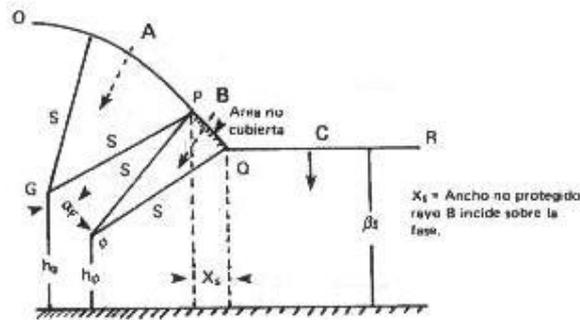
- Ángulo de apantallamiento [rad]: $\alpha = 0.25484$

- Ángulo de apantallamiento [grados]: $\alpha = 14.6013$

- Distancia entre c.g. y conductor [m]: $F = 12.2972$

- Altura media cable de guarda [m]: $Y'g = 34.6333$

- Altura media conductor [m]: $Y'_{oi} = 22.7333$



MÁXIMA DISTANCIA DE CHOQUE

- Altura promedio cables [m]: $Y' = 28.6833$
- Tangente ángulo de apantallamiento [m]: $m = 0.260504$
- Máxima distancia de choque [m]: $S_{max} = 50.4141$

CORRIENTE MÁXIMA PARA FALLAS DE APANTALLAMIENTO

- Corriente máxima [kA]: $I_{max} = 12.143$

Los valores de los parámetros COEF y EXP más usados son los siguientes:

COEF	EXP
10.0	0.65
6.7	0.80
7.1	0.75
9.4	0.67

El recomendado por IEEE – EPRI es COEF = 10 y EXP = 0.65

VOLTAJE CRÍTICO

- Voltaje crítico de flameo [kV]: $V_c = 1539.08$

RADIO CORONA

- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$
- Radio corona [m]: $R = 0.220794$

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR [ohm]: $Z_c = 342.012$

CORRIENTE CRÍTICA DE FLAMEO

- Corriente crítica de flameo [kA]: $I_{min} = 8.27437$
- Distancia mínima de choque [m]: $S_{min} = 39.4937$

OBSERVACIÓN

EL APANTALLAMIENTO NO ES PERFECTO

- Ángulo efectivo de apantallamiento [grados]: $\alpha_E = 4.27706$
- Ángulo alfa calculado [grados]: ... $\alpha_{calculado} = 14.6013$

PROBABILIDAD DE QUE EL PICO DE CORRIENTE EN EL RAYO PUEDE EXCEDER EL VALOR DE I (kA) MÁXIMA Y MÍNIMA

- Probabilidad que suceda la corriente máxima: $PI_{m\acute{a}x} = 0.919591$
- Probabilidad que suceda la corriente mínima: $PI_{min} = 0.968755$

CANTIDAD DE FALLAS DEL APANTALLAMIENTO x 100 x km x AÑO

- $N_{sf} = 0.0271511$

Esto quiere decir aproximadamente que en: ... 37 ... años la línea saldrá una vez

**REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT 345 kV paper de la IEEE**

FALLAS POR FLAMEO INVERSO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



"E Scientia Hominis Salus"
La Ciencia para el Bienestar de los Hombres

INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

CSAFILT "Cálculo y Simulación de Apantallamiento y Flameo Inverso en Líneas de Transmisión"

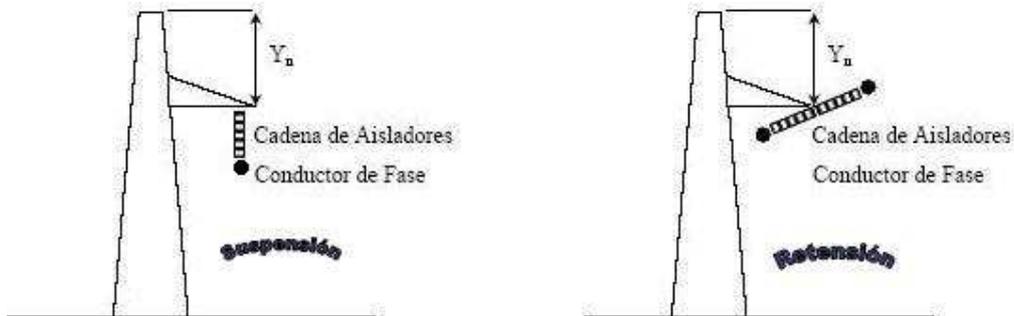
3:34 pm 23 October 2006

DATOS DE ENTRADA PARA FLAMEO INVERSO

- Voltaje de línea [kV]: $V_l = 345$
- Número de circuitos: 2

GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

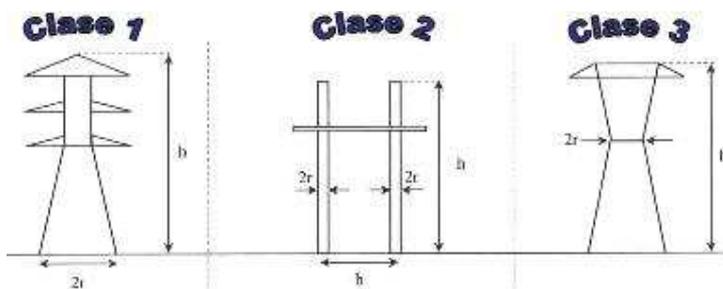
- Tipo de estructura : suspensión



- Radio del cable de guarda [m]: $r = 0.0045$
- Altura del cable fase A [m]: $hfA = 33.8$
- Altura del cable fase B [m]: $hfB = 27.4$
- Altura del cable fase C [m]: $hfC = 21.3$
- Distancia horizontal fase A [m]: $XoA = 5.5$
- Distancia horizontal fase B [m]: $XoB = 8.6$
- Distancia horizontal fase C [m]: $XoC = 5.8$
- Altura al punto de amarre fase A [m]: $hA = 33.8$
- Altura al punto de amarre fase B [m]: $hB = 27.4$
- Altura al punto de amarre fase C [m]: $hC = 21.3$

IMPEDANCIA DE IMPULSO DE LA TORRE

- Ingrese el tipo de estructura: 1



- Ingrese r [m]: $r = 5$
- Longitud del vano promedio [km]: $vAB = 335$
- Resistencia de puesta a tierra [ohm]: $R_{tierra} = 20$

-

RESULTADOS DE FLAMEO INVERSO

TENSIONES DE SOPORTE DEL AISLAMIENTO (RESISTENCIA)

- En dos microsegundos [kV]: $(V_i)_2 = 2156.6$
- En seis microsegundos [kV]: $(V_i)_6 = 1538.55$
- Voltaje en la cima de la torre [kV]: 3881.88
- Gradiente límite de corona [kV/m]: $E_o = 1500$
- Radio corona c. de guarda [m]: $R_c = 0.514633$
- Diámetro de corona c. guarda [m]: $D = 1.02927$
- Impedancia propia c. guarda [ohm]: $Z_{11} = 420.506$
- Impedancia mutua c. guarda [ohm]: $Z_{12} = 118.57$
- Impedancia de impulso c. guarda [ohm]: $Z_s = 269.538$

IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CABLE DE GUARDA Y FASES [ohm]

- C. Guardia - Fase A: $Z_{1A} = 107.613$ $Z_{2A} = 106.948$
- C. Guardia - Fase B: $Z_{1B} = 78.4184$ $Z_{2B} = 101.515$
- C. Guardia - Fase C: $Z_{1C} = 57.523$ $Z_{2C} = 92.5065$
- C. Guardia - Fase A': $Z_{1A'} = 107.613$ $Z_{2A'} = 106.948$
- C. Guardia - Fase B': $Z_{1B'} = 78.4184$ $Z_{2B'} = 101.515$
- C. Guardia - Fase C': $Z_{1C'} = 57.523$ $Z_{2C'} = 92.5065$

FACTOR DE ACOUPLE PARA CADA FASE

- Fase A: $K_A = 0.398016$
- Fase B: $K_B = 0.333781$
- Fase C: $K_C = 0.278308$
- Fase A': $K_{A'} = 0.398016$
- Fase B': $K_{B'} = 0.333781$
- Fase C': $K_{C'} = 0.278308$

IMPEDANCIA IMPULSO DE LA TORRE

- Ancho de cintura de la estructura [m]: $2.r = 10$
- Impedancia impulso de la torre [ohm]: $Z_T = 144.983$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE DE LA ONDA

- Tiempo de duración del viaje de la onda [micro segundos]: $T_t = 0.131$

TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE POR EL VANO

- Tiempo de duración del viaje por el vano [micro segundos]: $T_s = 1.24074$

TIEMPO DE VIAJE DESDE LA PARTE SUPERIOR A LA CRUCETA RESPECTIVA

- Fase A [micro segundos]: $T_{pA} = 0.00956667$

- Fase B [micro segundos]: $T_{pB} = 0.0309$

- Fase C [micro segundos]: $T_{pC} = 0.0512333$

- Fase A' [micro segundos]: $T_{pA'} = 0.00956667$

- Fase B' [micro segundos]: $T_{pB'} = 0.0309$

- Fase C' [micro segundos]: $T_{pC'} = 0.0512333$

IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL CIRCUITO

- Impedancia intrínseca del circuito [ohm]: $Z_I = 69.8449$

IMPEDANCIA DE ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

- Impedancia de onda constante de la torre [ohm]: $Z_W = 50.9792$

FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

- Factor de amortiguamiento: $\Psi = 0.0276595$

FACTOR DE REFRACCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

- Factor de refracción de la resistencia de puesta a tierra: $\alpha_{\text{ref}} = 0.242449$

TENSIÓN (p.u) EN LA PUNTA DE LA TORRE, A 2 us

- Voltaje en (p.u) en la punta de la torre a 2 [micro segundos]: $(V_T)_2 = 24.4791 \dots \text{kV}$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 2 us

- $K_S = 0.85$ Valor recomendado por IEEE-EPRI

- Componente de la tensión reflejada en 2 [micro segundos]: $(V'T)_2 = -0.323775 \dots \text{kV}$

- Voltaje real en la cima de la torre en 2 [micro segundos]: $(V_T)_2 = 24.1554 \dots \text{kV}$

TENSIÓN A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A 2 us

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]: .. $(V_R)_2 = 17.5832 \dots \text{kV}$

- Tensión a través de la resistencia de puesta a tierra en 2 [micro segundos]: .. $(V_R)_2 = 17.3506 \dots \text{kV}$

Este último es aplicando un factor de reducción para tomar en cuenta el efecto de las reflexiones de torres adyacentes

TENSIÓN INDUCIDA EN LA CRUCETA EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{pA})^2 = 23.6754$

- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{pB})^2 = 22.6051$

- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{pC})^2 = 21.585$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{pA'})^2 = 23.6754$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{pB'})^2 = 22.6051$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{pC'})^2 = 21.585$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 2 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{sA})^2 = 14.0612$

- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{sB})^2 = 14.5425$

- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{sC})^2 = 14.8624$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{sA'})^2 = 14.0612$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{sB'})^2 = 14.5425$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{sC'})^2 = 14.8624$

TENSIÓN (p.u) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE, EN 6 us

- Tensión (p.u) en la parte superior de la torre, en 6 [micro segundos]: .. $(V_T)^6 = (V_R)^6 = (V_{pn})^6 = 17.4155 \dots kV$

COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA, EN 6 us

- $K_S = 0.85 \dots$ Valor recomendado por IEEE-EPRI

- Componente de la tensión reflejada en 6 [micro segundos]: $(V'T)^6 = -3.33148 \dots kV$

TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 6 us

- Fase A [kV](p.u):..... $(V_{sA})^6 = 8.47836$

- Fase B [kV](p.u):..... $(V_{sB})^6 = 9.38305$

- Fase C [kV](p.u):..... $(V_{sC})^6 = 10.1643$

- Fase A' [kV](p.u):..... $(V_{sA'})^6 = 8.47836$

- Fase B' [kV](p.u):..... $(V_{sB'})^6 = 9.38305$

- Fase C' [kV](p.u):..... $(V_{sC'})^6 = 10.1643$

CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 2 us

- Fase A [kA]:..... $(I_{cA})^2 = 153.373$

- Fase B [kA]:..... $(I_{cB})^2 = 148.296$

- Fase C [kA]:..... $(I_{cC})^2 = 145.105$

- Fase A' [kA]:..... $(I_{cA'})^2 = 153.373$

- Fase B' [kA]:..... $(I_{cB'})^2 = 148.296$

- Fase C' [kA]:..... $(I_{cC'})^2 = 145.105$
 CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ EN 6 us

- Fase A [kA]:..... $(I_{cA})_6 = 181.468$

- Fase B [kA]:..... $(I_{cB})_6 = 163.971$

- Fase C [kA]:..... $(I_{cC})_6 = 151.368$

- Fase A' [kA]:..... $(I_{cA'})_6 = 181.468$

- Fase B' [kA]:..... $(I_{cB'})_6 = 163.971$

- Fase C' [kA]:..... $(I_{cC'})_6 = 151.368$

TENSIÓN CRESTA FASE-TIERRA PARA LAS FASES

- Von = 281.691 [kV]

CÁLCULO DE I_{cn}

- Fase A [kA]:..... $I_{cA} = 153.373$

- Fase B [kA]:..... $I_{cB} = 148.296$

- Fase C [kA]:..... $I_{cC} = 145.105$

- Fase A' [kA]:..... $I_{cA'} = 153.373$

- Fase B' [kA]:..... $I_{cB'} = 148.296$

- Fase C' [kA]:..... $I_{cC'} = 145.105$

CÁLCULO DEL V_{cn}

- Fase A [kV]:..... $V_{cA} = 2156.6$

- Fase B [kV]:..... $V_{cB} = 2156.6$

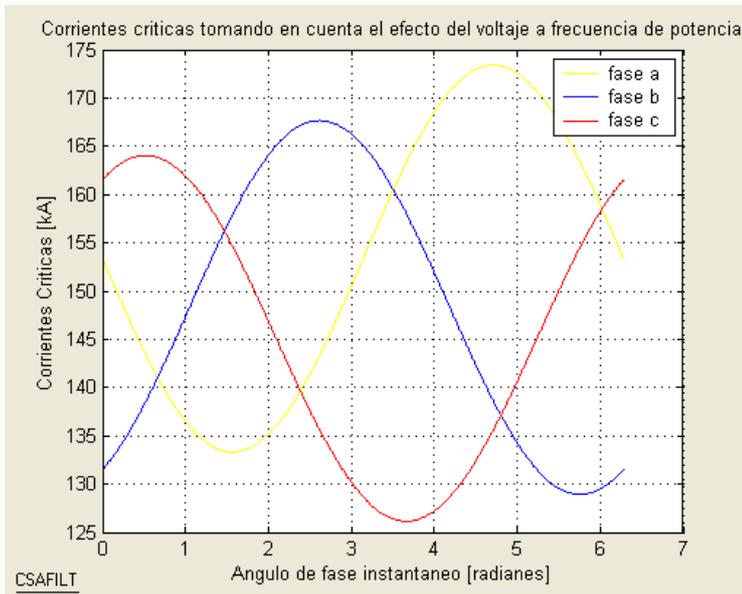
- Fase C [kV]:..... $V_{cC} = 2156.6$

- Fase A' [kV]:..... $V_{cA'} = 2156.6$

- Fase B' [kV]:..... $V_{cB'} = 2156.6$

- Fase C' [kV]:..... $V_{cC'} = 2156.6$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE



.....Teta Equivalente 1 ...Teta Equivalente 2

- Fase A: 0 1.71
- Fase B: 1.71 2.14
- Fase C: 2.41 6.28319
- Fase A': 0 1.71
- Fase B': 1.71 2.14
- Fase C': 2.41 6.28319
- % en que la Fase A predomina: 27.345
- % en que la Fase B predomina: 34.1812
- % en que la Fase C predomina: 38.4738
- % en que la Fase A' predomina: 27.345
- % en que la Fase B' predomina: 34.1812
- % en que la Fase C' predomina: 38.4738

CÁLCULO DE LA CORRIENTE CRÍTICA DEL RAYO PROMEDIO QUE PRODUCE FLAMEO POR FASE

- Fase A [kA]:IcA' = 140.032
- Fase B [kA]:IcB' = 163.084
- Fase C [kA]:IcC' = 138.006
- Fase A' [kA]:IcA' = 140.032
- Fase B' [kA]:IcB' = 163.084

- Fase C' [kA]: $I_{cC'} = 138.006$
- Fase A: $P(I_{cA'}) = 0.0194457$
- Fase B: $P(I_{cB'}) = 0.0131679$
- Fase C: $P(I_{cC'}) = 0.0201813$
- Fase A': $P(I_{cA'}) = 0.0194457$
- Fase B': $P(I_{cB'}) = 0.0131679$
- Fase C': $P(I_{cC'}) = 0.0201813$

CALCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE..

- $NT = 36.2733$

NÚMERO DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE POR 100 ..km POR AÑO

- Fase A: $NTA = 9.91893$
- Fase B: $NTB = 12.3987$
- Fase C: $NTC = 13.9557$
- Fase A': $NTA' = 9.91893$
- Fase B': $NTB' = 12.3987$
- Fase C': $NTC' = 13.9557$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE POR FASE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEO INVERSO

- Fase A: $NTA' = 0.192881$
- Fase B: $NTB' = 0.163264$
- Fase C: $NTC' = 0.281645$
- Fase A': $NTA' = 0.192881$
- Fase B': $NTB' = 0.163264$
- Fase C': $NTC' = 0.281645$

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE QUE PRODUCIRÍAN FLAMEOS INVERSOS

- _____ $NT' = 1.27558$ _____

Esto quiere decir aproximadamente que en: 1.5 años la línea saldrá una vez por fallas de
flameo inverso.

**REPORTE DADO POR EL CSAFILT
LT 345 kV paper de la IEEE**

SALIDAS TOTALES

NÚMERO TOTAL DE SALIDAS POR FALLAS DE APANTALLAMIENTO Y POR
FLAMEOS INVERSOS POR.. 100 ..km POR AÑO

- _____NF = 1.302 _____

LT 345 kV paper de la IEEE
WORK SHEET 1-A, 345 kV, VERTICAL DOUBLE-CIRCUIT, TWO
GROUND WIRES

1	Shield	-5,5	39,3	0,45	—	0	—
2	Shield	5,5	39,3	0,45	—	0	—
3	A	-5,5	33,8	1,48	45,7	345	0
4	B	-8,6	27,4	1,48	45,7	345	-120
5	C	-5,8	21,3	1,48	45,7	345	120
6	C'	5,5	33,8	1,48	45,7	345	120
7	B'	8,6	27,4	1,48	45,7	345	-120
8	A'	5,8	21,3	1,48	45,7	345	0

W = Insulator length (m) 2,63
h = Tower height (m) 39,3
b = Spacing between shield wires (m) 11
S = span distance (m) 335

Shield height at midspan (m)
Conductor sag (m) 7,0
Tower width at base (m)
Distance from tower top to phase conductor (m) --
Upper: 5,5; Middle: 11,9; Lower: 18,0.

**TWO POINT METHOD:
STROKE INCIDENCE AND SHIELDING FAILURES**

**SCHEDULE 1-PAGE 1
(Example calculation)**

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:		
			All	Left Side	Right Side
1	Draw tower to scale. Determine coordinates of all conductors and crossarm. Establish average X and Y coordinates of conductors.	Work sheet 1-A			
2	Establish keraunic level (T) in thunder-days per year.	Figure 12.4.1	30		
3	Compute stroke incidence (N) to earth per square kilometer per year.	Eq. 12.4.1	3.6		
4	Compute mean shield wire height, $h(m) = Y_G$.	Eq. 12.4.3	34.6		
5	Compute total flashes to the line (N_L) per 100 km per year.	Eq. 12.4.6	72		
6	From work sheet 1-A find the phase conductor most exposed to lightning on each side of the tower and look up the flashover voltage (kV) of the corresponding insulator strings at $6 \mu s$, V_c . Check both top and middle phases. .	Figure 12.6.3		1540 (B Phase)	1540 (B` Phase)
7	Compute mean heighth, Y_ϕ , for the phase conductors selected in Step 6.	Eq. 12.4.3		22.7	22.7
8	Using Step 6 values, compute a single-conductor corona radius for shielding failure calculations (m). Let $E_o = 1500$ kV/m.	Figure 12.5.3 Eq. 12.5.2 Appendix 12.2		0.19	0.19
9	Determine equivalent single-conductor radius of the phase conductor bundles without corona (m).	Figure 12.5.2 or Eq. 12.5.1		0.08	0.08

**SCHEDULE 1-PAGE 2
(Example calculation)**

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:		
			All	Left Side	Right Side

10	Using radii found in Steps 8 and 9, add them to approximate corona radius, R_c , of the bundle (m).	None		0.27	0.27
11	Using the radii from Step 10 and 9 and heights from Step 7, compute effective self-surge impedance, Z_ϕ , of the phase conductors (Ω).	Eq. 12.5.3		342	342
12	Using values in Steps 6 and 11, compute the minimum stroke currents, I_{min} , for shielding failure flashover (kA).	Eq. 12.7.6		9.0	9.0
13	From I_{min} in Step 12, compute minimum strike distance S (m).	Eq. 12.7.1		42	42
14	Select a β factor for the line. Use 1.0 for HV lines, 0.8 for EHV lines, 0.64 for UHV lines.	See Section 12.7	0.8		
15	Using result of Steps 4, 7, 13, 14, and work sheet 1-A, compute X_G coordinate of shield wire for good shielding.	Figure 12.7.4		7,1 (1.43 m right of B)	7,1 (1.43 m left of B')
16	Compute effective shield angle, α_E (degrees). If $\alpha < \alpha_E$, then line is effectively shielded.	Eq. 12.7.5		6.9	6.9
At this point, if effective shielding exists, then the shielding failure rate, N_s , is zero, and one may go directly to Step 24. If effective shielding does not exist and the shield wire positions are to be kept as shown on work sheet 1-A, then go to Step 17 to start computation of actual shielding failure rates.					
17	Using S from Step 12, compute uncovered width, X_s , on each side (m).	Figure 12.7.4 Eqs. 12.7.2 or 12.7.3		1.8	1.8

SCHEDULE 1-PAGE 3
(Example calculation)

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:		
			All	Left Side	Right Side

18	Find maximum strike distance, S_{max} , that can occur (m).	Eq. 12.7.7 Figure 12.7.2		50.0	50.0
19	From Step 12, enter I_{min} (kA).	None		9.0	9.0
20	From Step 18, compute I_{max} (kA).	Eq. 12.7.1A		12.0	12.0
21	Using I_{min} (Step 19), find probability P_{max} that I_{min} will be exceeded.	Figure 12.4.3 Eq. 12.4.8		0.96	0.96
22	Using I_{max} (Step 20), find probability P_{max} that I_{max} will be exceeded.	Figure 12.4.3 Eq. 12.4.8		0.92	0.92
23	Using I_{max} from Steps 2, 19, 21 and 22, compute number of shielding failures per 100 km per year, NSF.	Eq. 12.7.8		0.013	0.013
24	Sum the values on each side in step 23 to find total line shielding failures per 100 km per year, NSF. If Step 15 had shown good shielding, insert zero here.	None			
25	Subtract Step 24 result from Step 5 to establish total flashes to the line per 100 km per year to be used in back-flashover calculations.	None	145		

**TWO POINT METHOD
BACK-FLASHOVER**

**SCHEDULE 2-PAGE 1
(Example calculation)**

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:						
			All	A	B	C	A'	B'	C'
1	Determine insulator flashover voltage, $(VI)_2$ at 2 μ s (kV).	Eq. 12.10.10		2156	2156	2156	2156	2156	2156
2	Repeat Step 1 at 6 (μ s).	Eq. 12.10.11		1540	1540	1540	1540	1540	1540
3	Multiply Step 1 values by 1.8 for estimate of tower top voltage and average for all phases (kv).	Step 1	3880						
4	Using Step 3 voltage and $E_o = 1500$ kV/m, compute shield wire corona diameter (m). Use height at tower.	Eq. 12.6.1B	1.05						
5	Using Step 4 result, compute self-surge impedance of each shield wire at tower	Eq. 12.6.1A	420						
6	Using Step 5 results, compute self-surge impedance of each shield wire at tower (Ω).	Eq. 12.6.1C	269						
7	Compute coupling factors to each phase conductor, K_n .	Eq. 12.10.1							
8	Determine tower surge impedance Z_T (Ω).	Eq. 12.10.3	145	0.49	0.33	0.25	0.25	0.33	0.49
9	Determine tower travel time, ζ_T (μ s).	Eq. 12.10.4	0.131						
10	Determine span travel time, ζ_S (μ s).	Eq. 12.10.2	1.24						

SCHEDULE 2-PAGE 2
(Example calculation)

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:						
			All	A	B	C	A'	B'	C'

11	Compute travel time, ζ_{pn} , from tower top to each crossarm (μs).	Define below Eq. 12.6.7		0.009	0.031	0.051	0.051	0.031	0.009
12	Select footing resistance $R(\Omega)$. Reduce as shown in Figure 12.5.12.	section 12.5	20						
13	Compute intrinsic circuit impedance, $ZI(\Omega)$.	Eq. 12.6.1A	69.78						
14	Compute tower wave impedance, $ZW(\Omega)$.	Eq. 12.6.1B	50.87						
15	Compute tower damping factor, Ψ .	Eq. 12.6.1A	0.028						
16	Complete footing resistance refraction factor, α_R	Eq. 12.6.1C	0.242						
17	Compute per unit tower top voltage, $(V_T)_2$, at 2 μs .	Eq. 12.10.1	24.5						
18	Compute the reflected component at voltage $(V'_T)_2$ at the tower top from adjacent towers.	Eq. 12.10.3	0						
19	Add Steps 17 and 18 to find actual tower top voltage, $(V_T)_2$ (kV)	Eq. 12.10.4	24.5						
20	Compute voltage $(V_R)_2$ across footing resistance at 2 μs .	Eq. 12.10.2	17.3						
21	Reduce $(V_R)_2$ by same proportion that Step 19 was reduced from Step 17 to find actual footing resistance voltage, $(V_R)_2$, at 2 μs (kV).	None	17.3						

SCHEDULE 2-PAGE 3
(Example calculation)

Step	Procedure	Figure or	Computed Value for Phase:
------	-----------	-----------	---------------------------

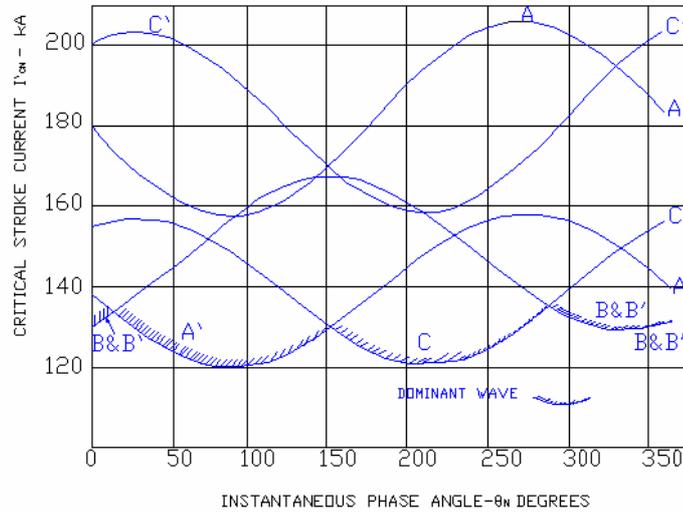
		Equation	All	A	B	C	A'	B'	C'
22	For each phase, compute the crossarm voltage $(V_{pn})_2$ at 2 μ s (kV).	Eq. 12.10.5		24.0	22.8	21.7	21.7	22.8	24.0
23	Using result from Steps 7, 19, and 22, compute each per unit insulator voltage at 2 μ s, $(V_{SN})_2$ (kV).	Eq. 12.10.6		12.0	14.7	15.6	15.6	14.7	12.0
24	Compute tower top voltage, $(V_T)_6$ at 6 μ s without adjacent tower reflections.	Eq. 12.10.7	17.4						
25	Compute the reflected voltage component, $(V'T)_6$, from adjacent towers at 6 μ s.	Eq. 12.10.8	-3,3						
26	Using the voltages in Steps 24 and 25 and coefficients of coupling in Step 7, compute total per unit insulator voltages for each phase, $(V_{SN})_6$ at 6 μ s.	Eq. 12.10.9		7.2	9.4	10.6	10.6	9.4	7.2
27	Compute ratios of voltages between Steps 1 and 23 for each phase. This will be $(I_{CN})_2$, the critical stroke current required for flashover at 2 μ s.	Eq. 12.10.12		180	147	138	138	147	180

SCHEDULE 2-PAGE 4
(Example calculation)

Step	Procedure	Figure or	Computed Value for Phase:
------	-----------	-----------	---------------------------

		Equation	All	A	B	C	A'	B'	C'
28	Compute ratios of voltage between Steps 2 and 26 for each phase. This will be $(I_{cn})_6$, the critical stroke current required for flashover at 6 μ s	Eq. 12.10.13		214	164	146	146	164	214
29	For each phase, select the lowest of the currents in Step 27 and 28 as (I_{cn})	None		180	147	138	138	147	180
30	For each value of I_{cn} in Step 29, select the voltage, V_{cn} that goes with it from Steps 1 and 2 (kV)	None		2156	2156	2156	2156	2156	2156
31	Using Steps 29 and 30, plot I'_{cn} for each phase for a full 360°	Eq. 12.6.14 Work Sheet 2-A							
32	From work sheet 2-A, determine percent of time each phase dominated.	Work Sheet 2-A		0	12.5	37.5	37.5	12.5	0
33	Compute average value of I'_{cn} for each phase during the time it is dominated.	Eq. 12.6.15 Work Sheet 2-A		–	130	124	124	130	–
34	Find probability that stroke current in Step 33 will be exceeded in any flash to the line.	Eq. 12.4.8		–	0.024	0.026	0.026	0.024	–
35	Multiply line flashes in Schedule 1, Step 25 by 0,60 to establish effective tower flashes per 100 km per year.	None	43						

WORK SHEET 2-A, PLOTTING I'_{cn} IN STEP 31 FOR EXAMPLE CASE



SCHEDULE 2-PAGE 5
(Example calculation)

Step	Procedure	Figure or Equation	Computed Value for Phase:						
			All	A	B	C	A'	B'	C'
36	Multiply Step 35 by values in Step 32 and divide by 100 to find tower flashes per phase per 100 km per year.	None		0	5,4	16,1	16,1	5,4	0
37	Multiply each value in Step 36 by the corresponding probability in Step 34 to find expected number of strokes causing flashover of a given phase.	None		0	0,13	0,42	0,42	0,13	0
38	Sum all values in Step 37 for total back-flashover per 100 km per year.		1,1						
39	Add to Step 38, total shielding failures from Schedule 1. Step 23 for total failures per 100 km per year.		1,1						

ANEXO No 4
CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL DEL CSAFILT

% Variables a utilizarse

```

% Ll=input("\n Longitud de la línea [km]:");

% N=input("\n número de conductores por fase:");

% DB=input("\n diámetro del as [m]:");

% DC=input("\n diámetro del conductor[m]:");

% T=input("\n nivel cerámico [días de tormenta por año]:");

% Wcad=input("\n longitud de la cadena de aisladores [m]:");

% hgm=input("\n Altura del hilo de guarda a medio claro [m]:");

% hfm=input("\n Altura del conductor a medio claro [m]:");

% t=input("\n tiempo de interrupción del rayo(2-6 us) [micro segundos]:");

% hg=input("\n altura del cable del guarda al punto de amarre [m]:");

% hf=input("\n altura del conductor mas expuesto [m]:");

% hfa=input("\n altura del conductor A al punto de amarre [m]:");

% hfb=input("\n altura del conductor B al punto de amarre [m]:");

% hfc=input("\n altura del conductor C al punto de amarre [m]:");

% Xo=input("\n Distancia horizontal al conductor mas expuesto [m]:");

% XG=input("\n Distancia horizontal al cable de guarda [m]:");

% b=input("\n distancia de separación de cables de guarda [m]:");

% beta=input("\n factor que relaciona la distancia crítica de arqueo \n a tierra
con la correspondiente a los conductores y cables de guarda: ');

% rg=input("\n Radio del conductor de guarda [m]:");

```

```

% tipo_clase=input('\n Tipo de Estructura (clase 1-2-3):');
% r=input('\n Ingrese r :');
% XoA=input('\n Distancia horizontal al conductor A[m]:');
% XoB=input('\n Distancia horizontal al conductor B[m]:');
% XoC=input('\n Distancia horizontal al conductor C[m]:');
% ht=input('\n Altura de la torre [m]:');
% vAB=input('\n longitud del vano promedio[m]:');
% R_tierra=input('\n Resistencia de puesta a tierra[ohmios]:');
% n_circuito=input('\n Ingrese el numero de circuitos (1-2):');
% Vl=input('\n Voltaje de Línea (138-230):');

```

CÓDIGO FUENTE PRINCIPAL APANTALLAMIENTO

1. CÁLCULOS.

$$\text{deltaX}=\text{Xo}-\text{XG}$$

$$F=(\text{deltaX}^2+(\text{hg}-\text{hf})^2)^{0.5}$$

2. DISTANCIAS MEDIAS.

$$\text{YG}=\text{hg}-(2/3)*(\text{hg}-\text{hgm})$$

$$\text{Yo}=\text{hf}-(2/3)*(\text{hf}-\text{hfm})$$

3. CALCULO DE LA DENSIDAD DE RAYOS.

disp('calculo de la densidad de rayos')

$N_g = 0.12 * T$ %Método de EPRI es el propuesto en el "libro rojo" de EPRI

4. NUMERO DE RAYOS A LA LÍNEA POR 100 km POR AÑO.

$$N_L = 0.12 * (b + 4 * Y_G^{1.09}) * (L * T / 1000)$$

ANGULO DE APANTALLAMIENTO

$$m = \Delta X / (Y_G - Y_o)$$

disp('radianes')

$$\alpha = \text{atan}(\Delta X / (h_g - h_f))$$

disp('grados')

$$\text{angulo_grados_apan} = \alpha * 180 / \pi$$

5. DISTANCIA MAXIMA DE CHOQUE

$$Y_{\text{medio}} = (Y_G + Y_o) / 2$$

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

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

$$C = (m^2 + 1)$$

$$S_{\text{max}} = Y_{\text{medio}} * (-B - (B^2 + A * C)^{0.5}) / A$$

6. CORRIENTE MÁXIMA PARA LAS FALLAS DE APANTALLAMIENTO

$$I_{max}=(S_{max}/10)^{(1/0.65)}$$

disp('Corriente máxima en kA')

$$I_{max}=0.029*S_{max}^{1.54} \text{ \% esta dada en Ka}$$

7. VOLTAJE CRITICO DE FLAMEO PARA UN CIERTO TIEMPO EN [μs]
EL USUARIO ESCOGERÁ EL TIEMPO DE DURACIÓN DE RAYO

$$V_c=((0.4*W_{cad})+(0.71*W_{cad})/(t^{0.75}))*1e3 \text{ \% el voltaje se da en kV}$$

8. RADIO CORONA PARA EL CALCULO DE FALLAS DE
APANTALLAMIENTO

$$E_o=1500; \text{ \%kV/m}$$

- Encuentra el Radio con métodos numéricos (Método de Newton Raphson)

Método de Newton Raphson

$$R_o = 0.1; \text{ \% valor inicial}$$

$$n = 100; \text{ \% numero de iteraciones}$$

for i=1:n

$$\text{Función} = R_o * \log(hf/R_o) - V_c/E_o;$$

Derivada función = $\log(hf/Ro)-1$; % derivada

Rnew=(Ro-Función/Derivada Función); %una nueva aproximación

Ro=Rnew;

end

rapson1;

Ro=Ro

9. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR

$re=0.5*DB*(N*DC/DB)^{(1/N)}$

if N == 1

rc=Ro

else

rc=Ro+re

end

$Zc=60*(\log(2*hf/re)*\log(2*hf/rc))^{0.5}$

10. LA CORRIENTE CRITICA

$Imin=2*Vc/Zc$ % En kA

$Smin=10*Imin^{0.65}$

11. PARA DETERMINAR SI EL APANTALLAMIENTO ES EFECTIVO O NO

- La coordenada XG0 del cable de guarda para apantallamiento perfecto

$$X_{go} = (\text{Smin}^2 - (\text{beta} * \text{Smin} - Y_o)^2)^{0.5} - (\text{Smin}^2 - (\text{beta} * \text{Smin} - Y_G)^2)^{0.5}$$

- Ángulo efectivo de apantallamiento

$$\text{alfaE} = \text{atan}(X_{go} / (Y_o - Y_G))$$

$$\text{alfaE_grados} = \text{alfaE} * 180 / \pi$$

$$\text{alfa_calc} = \text{atan}(m)$$

$$\text{alfa_calc_grados} = \text{alfa_calc} * 180 / \pi$$

12. CÁLCULO DE DISTANCIAS CRITICAS

$$\text{constante} = \text{beta} * \text{Smin}$$

$$\text{teta} = \text{asin}((\text{beta} * \text{Smin} - hf) / \text{Smin})$$

$$\text{disp('en grados')}$$

$$\text{teta} * 180 / \pi$$

$$w = \text{acos}(F / (2 * \text{Smin}))$$

$$\text{disp('en grados')}$$

$$w_grados = w * 180 / \pi$$

$$\text{if constante} \geq Y_o$$

```
Xs= Smin*(cos(teta)+sin(alfa_calc-w))
```

```
else
```

```
Xs= Smin*(1+sin(alfa_calc-w))
```

Este Xs esta asociado con la corriente mínima por definición del modelo electrogeométrico

```
end
```

```
if alfa_calc<alfaE
```

```
disp('EL APANTALLAMIENTO ES PERFECTO');
```

```
perfect = 'EL APANTALLAMIENTO ES PERFECTO';
```

```
else
```

```
disp('EL APANTALLAMIENTO NO ES PERFECTO');
```

```
perfect = 'EL APANTALLAMIENTO NO ES PERFECTO';
```

```
end
```

```
Pmax=1/(1+(Imax/31)^2.6)
```

```
Pmin=1/(1+(Imin/31)^2.6)
```

13. SALIDAS

```
disp('Numero de fallas de apantallamiento 100 km/año')
```

```
NSF=0.012*T*Xs/2*(Pmin-Pmax)
```

RESULTADOS FLAMEO INVERSO

1. $V_{on} = V_I \cdot 2^{0.5} / 3^{0.5}$

%El análisis por el método de los dos puntos esto es 2 y 6 us

%Los siguientes voltajes son del fabricante o experimentalmente

% Se calculara después por las formulas de las curvas es mas preciso

$$V_c = ((0.4 \cdot W_{cad}) + (0.71 \cdot W_{cad}) / (t^{0.75})) \cdot 1e3$$

disp(' \n\n\n RESULTADOS DE INVERSO')

$$V_{2u} = 820 \cdot W_{cad}$$

$$V_{6u} = 585 \cdot W_{cad}$$

2. DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE EN EL TOPE DE LA TORRE

$$V = 1.8 \cdot V_{2u}$$

3. CALCULO DEL RADIO CORONA ALREDEDOR DEL CONDUCTOR DE GUARDA

$E_0=1500$;

Raphson2;

- Método de Newton Raphson 2

$R_0 = 0.1$; % valor inicial

$n = 100$; % numero de iteraciones

for $i=1:n$

Función = $R_0 \cdot \log(2 \cdot h_g / R_0) - V / E_0$;

derivada función = $\log(2 \cdot h_g / R_0) - 1$; % derivada

$R_{new} = (R_0 - \text{Función} / \text{derivada función})$; %una nueva aproximación

$R_0 = R_{new}$;

end

$R_c = R_{new}$

%Diámetro corona

$D = 2 \cdot R_c$

4. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR DE GUARDA TOMANDO EN CUENTA EL

%efecto corona

%Impedancia de cables de guarda

$$Z_s = 60 \cdot (\log(2 \cdot h_g / r_g) \cdot \log(2 \cdot h_g / R_c - r_e))^{0.5}$$

5. DETERMINACIÓN LA IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA Z_s EQUIVALENTE CUANDO EXISTEN DOS CONDUCTORES DE GUARDA TOMANDO EN CUENTA EL EFECTO CORONA PARA LAS IMPEDANCIAS PROPIAS

if $b == 0$

$$Z_{12} = 0$$

$$Z_{11} = Z_s$$

$$H_{11} = 2 \cdot h_g;$$

$$\%H_{22} = H_{11};$$

Else

$$H_{11} = 2 \cdot h_g;$$

$$Z_{11} = Z_s$$

$$H_{12} = (H_{11}^2 + b^2)^{0.5}$$

$$Z_{12}=60*\log(H_{12}/b)$$

$$Z_s=(Z_{11}+Z_{12})/2$$

end

6. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE ACOPLAMIENTO K_c ENTRE EL CONDUCTOR DE GUARDA Y EL CONDUCTOR DE FASE

%PARA LA FASE A

if b==0

$$d_{1A}=\left((b+(X_{oA}-X_G))^2+(h_g-h_{fa})^2\right)^{0.5}$$

$$H_{1A}=\left((H_{11}-(h_g-h_{fa}))^2+(b+(X_{oA}-X_G))^2\right)^{0.5}$$

$$Z_{1A}=60*\log(H_{1A}/d_{1A})$$

$$K_A=Z_{1A}/Z_{11}$$

Z2A=0; %%corrección por debug

KA_prima=KA;

else

$$d_{1A}=\left((b+(X_{oA}-X_G))^2+(h_g-h_{fa})^2\right)^{0.5}$$

d2A=F

$$H1A = ((H11 - (hg - hfa))^2 + (b + (XoA - XG))^2)^{0.5}$$

$$H2A = ((H11 - (hg - hfa))^2 + (XoA - XG)^2)^{0.5}$$

Z1A = 60 * log(H1A/d1A) %la impedancia mutua con entre la fase A y el cable

%guarda 1

Z2A = 60 * log(H2A/d2A) %la impedancia mutua con entre la fase A y el cable

%guarda 2

KA = (Z1A + Z2A) / (Z11 + Z12) %Factor de acoplamiento para la fase A

KA_prima = KA;

End

%PARA LA FASE B

if b == 0

$$d1B = ((b + (XoB - XG))^2 + (hg - hfb)^2)^{0.5}$$

$$H1B = ((H11 - (hg - hfb))^2 + (b + (XoB - XG))^2)^{0.5}$$

Z1B = 60 * log(H1B/d1B)

KB = Z1B / Z11

Z2B = 0; %% corrección por debug

KB_prima = KB;

```

%KB_prima=0;

else

d1B=((b+(XoB-XG))^2+(hg-hfb)^2)^0.5

d2B=F

H1B=((H11-(hg-hfb))^2+(b+(XoB-XG))^2)^0.5

H2B=((H11-(hg-hfb))^2+(XoB-XG)^2)^0.5

Z1B=60*log(H1B/d1B) %la impedancia mutua con entre la fase B y el cable
guarda 1

Z2B=60*log(H2B/d2B) %la impedancia mutua con entre la fase B y el cable
guarda 2

KB=(Z1B+Z2B)/(Z11+Z12) %Factor de acoplamiento para la fase B

KB_prima=KB;

End

%PARA LA FASE C

if b==0

d1C=((b+(XoC-XG))^2+(hg-hfc)^2)^0.5

```

$$H1C = ((H11 - (hg - hfc))^2 + (b + (XoC - XG))^2)^{0.5}$$

$$Z1C = 60 * \log(H1C / d1C)$$

$$KC = Z1C / Z11$$

Z2C=0; %% corrección por debug

% KC_prima=0;

KC_prima=KC;

Else

$$d1C = ((b + (Xo - XG))^2 + (hg - hfc)^2)^{0.5}$$

d2C=F

$$H1C = ((H11 - (hg - hfc))^2 + (b + (XoC - XG))^2)^{0.5}$$

$$H2C = ((H11 - (hg - hfc))^2 + (XoC - XG)^2)^{0.5}$$

Z1C=60*log(H1C/d1C) %la impedancia mutua con entre la fase A y el cable

guarda 1

Z2C=60*log(H2C/d2C) %la impedancia mutua con entre la fase A y el cable

guarda 2

KC=(Z1C+Z2C)/(Z11+Z12) %Factor de acoplamiento para la fase A

```
KC_prima=KC;

end

%THIS LINES IS FOR DEBUG

Z1A_prima=0; %FOR DEBUG

Z2A_prima=0;

Z1B_prima=0; %FOR DEBUG

Z2B_prima=0;

Z1C_prima=0;

Z2C_prima=0;

%Segundo circuito

if n_circuito==2

%PARA LA FASE A'
Z1A_prima=Z1A

if b==0

Z2A=0;

Else
```

```
Z2A_prima=Z2A
```

```
end
```

```
%PARA LA FASE B'
```

```
if n_circuito==2
```

```
Z1B_prima=Z1B
```

```
if b==0
```

```
Z2B=0;
```

```
Else
```

```
Z2B_prima=Z2B
```

```
End
```

```
End
```

```
%PARA LA FASE C'
```

```
if n_circuito==2
```

```
Z1C_prima=Z1C
```

```
if b==0
```

```
Z2C=0;
```

Else

Z2C_prima=Z2C;

End

End

End

7. DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA Z_t DE LA TORRE Y EL TIEMPO DE TRANSITO DESDE EL TOPE HASTA LA BASE DE LA TORRE

ancho_torre=2*r

if tipo_clase==1

$Z_t=30*\log(2*(ht^2+r^2)/r^2)$ %DEPENDE EL GRAFICO

else if tipo_clase==2

$Z_p=60*\log(ht/r)+((90*r)/ht)-60$

if b ~= 0

$Z_m=60*\log(ht/b)+((90*r)/b)-60$

Else

$Z_m=0;$

End

$$Z_t = (Z_p + Z_m) / 2$$

else if tipo_clase==3

$$Z_t = 60 * \log((2 * h_t * 2^{0.5}) / r) - 60$$

Else

disp('Este tipo de estructura no esta definido')

exit

end

end

end

%aproximaciones para las impedancias de las torres $h_t/300$ en us

8. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRANSITO ENTRE LA TORRE INCIDIDA POR EL RAYO Y LAS TORRES ADYACENTES TIEMPO DE DURACIÓN DEL VIAJE POR EL VANO

$$t_{aov} = (2 * v_{AB} / (270 * 2))$$

9. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRANSITO ENTRE EL TOPE Y EL BRAZO QUE SOSTIENE EL CONDUCTOR

%Primer circuito

%fase A

%fase B

%fase C

%Segundo circuito

%fase A'

%fase B'

%fase C'

if texpuc==1

%Primer circuito

%fase A

$taopa=(ht-(hfa))/300$

%fase B

$taopb=(ht-(hfb))/300$

%fase C

$taopc=(ht-(hfc))/300$

%fase A'

```
taopa_prima=0
```

```
%fase B'
```

```
taopb_prima=0
```

```
%fase C'
```

```
taopc_prima=0
```

```
if n_circuito==2
```

```
%Segundo circuito
```

```
%fase A'
```

```
taopa_prima=taopa
```

```
%fase B'
```

```
taopb_prima=taopb
```

```
%fase C'
```

```
taopc_prima=taopc
```

```
end
```

```
%PARA ESTRUCTURA DE SUSPENSIÓN
```

```
else
```

%Primer circuito

%fase A

$taopa=(ht-(hfa+Wcad))/300$

%fase B

$taopb=(ht-(hfb+Wcad))/300$

%fase C

$taopc=(ht-(hfc+Wcad))/300$

%fase A'

$taopa_prima=0$

%fase B'

$taopb_prima=0$

%fase C'

$taopc_prima=0$

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

$taopa_prima=taopa$

%fase B'

taopb_prima=taopb

%fase C'

taopc_prima=taopc

end

end

10. DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA ZI IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL CIRCUITO EN ohm ENCONTRADA POR LA CORRIENTE DEL RAYO EN EL INSTANTE DE ENCONTRAR EL CIRCUITO EQUIVALENTE IMPEDANCIA INTRINCESA DEL CIRCUITO

$$Z_I = (Z_s * Z_t) / (Z_s + 2 * Z_t)$$

11. DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA ZW IMPEDANCIA DE LA ONDA CONSTANTE DE LA TORRE

$$Z_W = ((2 * Z_s^2 * Z_t) * (Z_t - R_{tierra})) / ((Z_s + 2 * Z_t)^2 * (Z_t + R_{tierra}))$$

12. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO SI (CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO DE LA TORRE QUE REDUCE SUCESIVAMENTE LA CONTRIBUCIÓN DE LA REFLEXIÓN)

$$S_I = ((2 * Z_t - Z_s) / (Z_s + 2 * Z_t)) * ((Z_t - R_{tierra}) / (Z_t + R_{tierra}))$$

13. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE REFRACCIÓN ALFA R DE LA RESISTENCIA FACTOR DE REFRACCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

$$\text{alfa}_R = 2 * R_{\text{tierra}} / (Z_t + R_{\text{tierra}})$$

14. DETERMINACIÓN EL VOLTAJE V1T2 EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS 2us DEBIDO A 1kA DE CORRIENTE INYECTADA POR EL RAYO

taoT tiempo de duración del viaje de la onda, entre la parte superior de

la torre y tierra, us

$$\text{taoT} = ht / 300$$

%Tensión (p.u) en la punta de la torre

$$V1T2 = (Z_I - (Z_W / (1 - S_I))) * (1 - (\text{taoT} / (1 - S_I)))$$

15. DETERMINACIÓN DEL COMPONENTE DE VOLTAJE REFLEJADO VrT2 EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS 2 us DEBIDO A REFLEXIONES EN LAS TORRES COMPONENTE REFLEJADA EN 2 us

Ks=0.85 %Valor recomendado por la IEEE-EPRI

%Componente de la tensión reflejada en 2 us

if taov > 1

$$VrT2 = 0$$

Else

$$VrT2 = -(4 * Ks * V1T2^2) / Zs * ((1 - 2 * V1T2) / Zs) * (1 - taov)$$

end

% Se puede ver que si taov > 1 entonces VrT2 = 0

16. DETERMINACIÓN EL VOLTAJE EN LA TOPE DE LA TORRE A LOS 2 us
DEBIDO A LA CORRIENTE DE 1 kA Y A LAS REFLEXIONES EN LAS
TORRES

% Valor real en la cima de la torre a 2 us

$$VT2 = V1T2 + VrT2$$

17. TENSIÓN A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA A 2
us DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE V1R2 A LOS 2 us EN LA R DEL
SCT DE LA TORRE DEBIDO A LA CORRIENTE DE 1 kA DE
CORRIENTE INYECTADA POR EL RAYO

$$\%V1R2 = (\alpha_R * ZI) / (1 - SI) * (1 - (SI * taoT) / (1 - SI))$$

18. DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE VR2 A LOS 2 us EN LA R APLICANDO
UN FACTOR DE REDUCCIÓN PARA TOMAR EN CUENTA EL EFECTO
DE LAS REFLEXIONES DE TORRES ADYACENTES

$$VR2 = (V1T2 / VT2) * V1R2$$

19. DETERMINE EL VOLTAJE Vp2 A LOS 2 us EN EL BRAZO QUE
SOSTIENE EL CONDUCTOR DE FASE

% TENSIÓN INDUCIDA EN LA CRUCETA EN 2 us

%Primer circuito

%fase A

$$Vp2a=VR2+(taoT-taopa)/taoT*(VT2-VR2)$$

%fase B

$$Vp2b=VR2+(taoT-taopb)/taoT*(VT2-VR2)$$

%fase C

$$Vp2c=VR2+(taoT-taopc)/taoT*(VT2-VR2)$$

%fase A'

$$Vp2a_prima=0$$

%fase B'

$$Vp2b_prima=0$$

%fase C'

$$Vp2c_prima=0$$

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

$$Vp2a_prima=Vp2a$$

```
%fase B'
```

```
Vp2b_prima=Vp2b
```

```
%fase C'
```

```
Vp2c_prima=Vp2c
```

```
end
```

20. DETERMINE EL VOLTAJE V_{s2} APLICANDO A LA CADENA DE AISLADORES A LOS 2 μ s

```
%Cálculo de K
```

```
%Ka=(Z1A+Z2A)/(2*Zs)
```

```
%Kb=(Z1B+Z2B)/(2*Zs)
```

```
%Kc=(Z1C+Z2C)/(2*Zs)
```

```
%Primer circuito
```

```
%fase A
```

```
Vs2a=Vp2a-KA*VT2
```

```
%fase B
```

```
Vs2b=Vp2b-KB*VT2
```

%fase C

$$Vs2c=Vp2c-KC*VT2$$

%fase A'

$$Vs2a_prima=0$$

%fase B'

$$Vs2b_prima=0$$

%fase C'

$$Vs2c_prima=0$$

if n_circuito==2

%Segundo circuito

$$KA_prima=KA;$$

$$KB_prima=KB;$$

$$KC_prima=KC;$$

%fase A'

$$Vs2a_prima=Vs2a;%Vp2a-KA_prima*VT2$$

%fase B'

$$Vs2b_prima=Vs2b;%Vp2b-KB_prima*VT2$$

```
%fase C'
```

```
Vs2c_prima=Vs2c;%Vp2c-KC_prima*VT2
```

```
End
```

21. DETERMINACIÓN EL VOLTAJE VT6 A LOS 6 us EN EL TOPE DE LA TORRE, VR6 EN LA BASE DE LA TORRE Y Vp6 EN EL BRAZO QUE SOSTIENE EL CONDUCTOR DE FASE, DEBIDOS A 1 kA DE CORRIENTE INYECTADA POR EL RAYO TENSIÓN p.u EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE EN 6 us

```
V1T6=((R_tierra*Zs)/(2*R_tierra+Zs))
```

```
VR6=V1T6
```

```
Vp6=VR6
```

22. DETERMINACIÓN DEL COMPONENTE DE VOLTAJE REFLEJADO VrT6 EN EL TOPE DE LA TORRE A LOS 6 us DEBIDO A REFLEXIONES EN LAS TORRES ADYACENTES COMPONENTE DE LA TENSIÓN REFLEJADA

```
if taov >1
```

```
    VrT6=0
```

```
Else
```

```
VrT6=-((4*Ks*Zs*R_tierra^2)/(Zs+2*R_tierra)^2*(1-
```

```
(2*R_tierra)/(Zs+2*R_tierra))%*(1-taov)
```

```
end
```

23. DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE EN LA CADENA DE AISLADORES PARA 6 us (TENSIÓN DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO (PARA CADA FASE) kV EN 6 us)

%TENSION DE IMPULSO A TRAVÉS DEL AISLAMIENTO EN 6us

%Primer circuito

%fase A

$Vs6a=(V1T6+VrT6)*(1-KA)$

%fase B

$Vs6b=(V1T6+VrT6)*(1-KB)$

%fase C

$Vs6c=(V1T6+VrT6)*(1-KC)$

%fase A'

$Vs6a_prima=0$

%fase B'

$Vs6b_prima=0$

%fase C'

$Vs6c_prima=0$

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

$Vs6a_prima=Vs6a;%(V1T6+VrT6)*(1-KA_prima)$

%fase B'

$Vs6b_prima = Vs6b; \%(V1T6 + VrT6) * (1 - KB_prima)$

%fase C'

$Vs6c_prima = Vs6c; \%(V1T6 + VrT6) * (1 - KC_prima)$

end

24. DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE CRITICA DE DESCARGA DEL RAYO REQUERIDA PARA PROVOCAR ARCO SUPERFICIAL SOBRE LA CADENA DE AISLADORES A LOS 2us CORRIENTE CRITICA DEL RAYO QUE PRODUCIRÁ FLAMEO EN 2 us (POR FASE)

%Primer circuito

%fase A

$Ic2a = (V2u / Vs2a)$ %Ese 820 se lo puede calcular con la formula

%fase B

$Ic2b = (V2u / Vs2b)$

%fase C

$Ic2c = (V2u / Vs2c)$

%fase A'

```
lc2a_prima=0

%fase B'

lc2b_prima=0

%fase C'

lc2c_prima=0

if n_circuito==2

V2u_prima=V2u;

%Segundo circuito

%fase A'

lc2a_prima=lc2a;%(V2u_prima/Vs2a_prima)

%fase B'

lc2b_prima=lc2b;%(V2u_prima/Vs2b_prima)

%fase C'

lc2c_prima=lc2c;%(V2u_prima/Vs2c_prima)

End
```

25. DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE CRÍTICA DE DESCARGA DEL RAYO REQUERIDA PARA PROVOCAR ARCO SUPERFICIAL SOBRE LA CADENA DE AISLADORES A LOS 6 μ s

%Primer circuito

%fase A

$I_{c6a} = (V_{6u} / V_{s6a})$

%fase B

$I_{c6b} = (V_{6u} / V_{s6b})$

%fase C

$I_{c6c} = (V_{6u} / V_{s6c})$

%fase A'

$I_{c6a_prima} = 0$

%fase B'

$I_{c6b_prima} = 0$

%fase C'

$I_{c6c_prima} = 0$

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

```
lc6a_prima=lc6a;%(V6u/Vs6a_prima)
```

```
%fase B'
```

```
lc6b_prima=lc6b;%(V6u/Vs6b_prima)
```

```
%fase C'
```

```
lc6c_prima=lc6c;%(V6u/Vs6c_prima)
```

```
end
```

26. SELECCIONE EL MENOR VALOR DE CORRIENTE CRITICA I_{cm} ENTRE I_{c2} E I_{c6} INCLUYE EL EFECTO DEL VOLTAJE

```
%Icn=(Vm-Von*sin(tetan-alfan))/Vm
```

```
angulo=0:0.01:2*pi;
```

```
lcagx=[];
```

```
lcbgx=[];
```

```
lccgx=[];
```

```
%Primer circuito
```

```
%fase A
```

```
[Vma,Ica]=menor_valor(Ic2a,Ic6a,Wcad)
```

```
% Icacg= $I_{ca} * ((V_{ma} - V_{on} * \sin(\text{angulo})) / V_{ma})$ ;  
  
%fase B  
  
[Vmb,Icb]=menor_valor(Ic2b,Ic6b,Wcad)  
  
% Icbgx= $I_{cb} * ((V_{mb} - V_{on} * \sin(\text{angulo} + 2 * \pi / 3)) / V_{mb})$ ;  
  
%fase C  
  
[Vmc,Icc]=menor_valor(Ic2c,Ic6c,Wcad)  
% Iccgx= $I_{cc} * ((V_{mc} - V_{on} * \sin(\text{ángulo} - 2 * \pi / 3)) / V_{mc})$ ;  
  
% save Grafico ángulos Icacg Icbgx Iccgx;  
  
%fase A'  
  
Ica_prima=0  
  
%fase B'  
  
Icb_prima=0  
  
%fase C'  
  
Icc_prima=0  
  
%voltajes  
  
Vma_prima=0;  
  
Vmb_prima=0;
```

```

Vmc_prima=0;

if n_circuito==2

%segundo circuito
%fase A

%[Vma_prima,lca_prima]=menor_valor(lc2a_prima,lc6a_prima,Wcad)

%lcag_prima=lcag;%lca_prima*((Vma_prima-
Von*sin(angulo))/Vma_prima);

%fase B

%[Vmb_prima,lcb_prima]=menor_valor(lc2b_prima,lc6b_prima,Wcad)
%lcbg_prima=lcbg;%lcb_prima*((Vmb_prima-
Von*sin(angulo+2*pi/3))/Vmb_prima);

%fase C

%[Vmc_prima,lcc_prima]=menor_valor(lc2c_prima,lc6c_prima,Wcad)
%lccg_prima=lccg;%lcc_prima*((Vmc_prima-Von*sin(ángulo-
2*pi/3))/Vmc_prima);

lca_prima=lca;

lcb_prima=lcb;

lcc_prima=lcc;

Vma_prima=Vma;

```

```
Vmb_prima=Vmb;
```

```
Vmc_prima=Vmc;
```

```
end
```

27.DETERMINE EL VALOR PROMEDIO DE LA CORRIENTE CRITICA PARA CADA FASE Ipn

```
%Ipn=Icn*(1+(Vo*cos(teta2-alfan)-cos(teta1-alfan))/(Vm*(teta2-teta1)))
```

```
%Calculo de puntos de corte
```

porcentajes;

% este subprograma calcula los porcentajes en que una fase domina el semiciclo negativo, para esto se utilizó un método numérico que evalúa punto por punto las ondas y encuentra en que porcentaje cada una de estas esta nivel mas bajo, y de esta manera se obtiene los intervalos donde cada fase es la mas susceptible a desarrollar un arco superficial, para entender mejor el método se mostrara el diagrama de flujo en el ANEXO N°2.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Incializando
```

```
k1=0;
```

```
k2=0;
```

```
k3=0;
```

```
puntos=0;
```

```
angulos=[];
```

```
contador=0;
```

```
%EL LAZO
```

```
for angulo=0:0.01:2*pi % sensibilidad 0.01
```

```
contador=contador+1;
```

```
angulos(contador)=angulo;
```

```

%fase A
Icag1=Ica*((Vma-Von*sin(angulo))/Vma);
%fase B
Icbg2=Icb*((Vmb-Von*sin(angulo+2*pi/3))/Vmb);

%fase C
Iccg3=Icc*((Vmc-Von*sin(angulo-2*pi/3))/Vmc);
%los lazos

if Icag1<=Icbg2

    if Icag1<=Iccg3
        k1=k1+1;
    else
        if Iccg3<=Icbg2
            k3=k3+1;
        else
            puntos=puntos+1;
        end % fin del terciario

    end % fin del secundario

else

    if Icbg2<=Iccg3
        k2=k2+1;
    else
        if Iccg3<=Icag1
            k3=k3+1;
        else
            puntos=puntos+1;
        end % fin del terciario
    end
end

```

```

end % fin del secundario

end % fin del si primario

end %fin del bucle
% plot(angulos,lca*((Vma-Von*sin(angulos))/Vma),'y',angulos,lcb*((Vmb-
Von*sin(angulos+2*pi/3))/Vmb),'b',angulos,lcc*((Vmc-Von*sin(angulos-
2*pi/3))/Vmc),'r')
% grid;
% k1
% k2
% k3
porcen_a=k1*100/length(angulos)
porcen_b=k2*100/length(angulos)
porcen_c=k3*100/length(ángulos)

% Si no existe intersección entonces no existe
% la corriente critica del rayo que produce flameo
%en cualquier instante superponiendo el
%efecto de TENSION A BAJA FRECUENCIA

%Fase A
teta1a=0
if k1==0
teta2a=teta1a;
else
teta2a=ángulos(k1)
end

%Fase B
if k1==0

```

```

    teta1b=0;
else
teta1b=ángulos(k1)
end

```

```

if k2==0
    teta2b=teta1b;
else
teta2b=ángulos(k2)
end

```

```

%Fase C

```

```

if k3==0
    teta1c=2*pi;
else
teta1c=ángulos(k3)
end
teta2c=2*pi

```

```

%hasta aquí el subprograma porcentajes

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%Primer circuito

```

```

%fase A

```

```

if k1==0

```

```

lpa='infinita'

```

Else

$$I_{pa} = I_{ca} * (1 + (V_{on} * (\cos(\theta_{2a}) - \cos(\theta_{1a}))) / (V_{ma} * (\theta_{2a} - \theta_{1a})))$$

End

%fase B

if k2==0

I_{pb}='infinita'

Else

$$I_{pb} = I_{cb} * (1 + (V_{on} * (\cos(\theta_{2b} + 2 * \pi / 3) - \cos(\theta_{1b} + 2 * \pi / 3))) / (V_{mb} * (\theta_{2b} - \theta_{1b})))$$

End

%fase C

if k3==0

I_{pc}='infinita'

Else

$$I_{pc} = I_{cc} * (1 + (V_{on} * (\cos(\theta_{2c} - 2 * \pi / 3) - \cos(\theta_{1c} - 2 * \pi / 3))) / (V_{mc} * (\theta_{2c} - \theta_{1c})))$$

End

```
%lines for debug

teta1a_prima=0;

teta2a_prima=0;

teta1b_prima=0;

teta2b_prima=0;

teta1c_prima=0;

teta2c_prima=0;

lpa_prima=0;

%fase B'

lpb_prima=0;

%fase C'

lpc_prima=0;

%Segundo circuito

if n_circuito==2

% zeros_mio_dos;

%for location points
```

```
teta1a_prima=teta1a;%teta1_prima
```

```
teta2a_prima=teta2a;%teta2_prima
```

```
teta1b_prima=teta1b;%teta1_prima
```

```
teta2b_prima=teta2b;%teta3_prima
```

```
teta1c_prima=teta1c;%teta2_prima
```

```
teta2c_prima=teta2c;%teta3_prima
```

```
%fase A'
```

```
lpa_prima=lpa;%lca_prima*(1+(Von*(cos(teta2a_prima)-
cos(teta1a_prima)))/(Vma_prima*(teta2a_prima-teta1a_prima)))
```

```
%fase B'
```

```
lpb_prima=lpb;%lcb_prima*(1+(Von*(cos(teta2b_prima+2*pi/3)-
cos(teta1b_prima+2*pi/3)))/(Vmb_prima*(teta2b_prima-teta1b_prima)))
```

```
%fase C'
```

```
lpc_prima=lpc;%lcc_prima*(1+(Von*(cos(teta2c_prima-2*pi/3)-
cos(teta1c_prima-2*pi/3)))/(Vmc_prima*(teta2c_prima-teta1c_prima)))
```

```
end
```

28. DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA P1N DE RAYOS PARA CADA FASE N CON CORRIENTE MAYOR O IGUAL A LA CORRIENTES PROMEDIO OBTENIDAS EN EL PASO ANTERIOR LA

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN RAYO CON CORRIENTE MAYOR O IGUAL AUN VALOR CADA VALOR PICO I SE DETERMINA MEDIANTE:

```
%PI=1/(1+(Ip/31)^2.6)
```

```
%Para cada corriente de fase se obtiene una probabilidad In
```

```
%Primer circuito
```

```
%fase A
```

```
if k1==0
```

```
    Pla=0;
```

```
Else
```

```
Pla=1/(1+(Ipa/31)^2.6)
```

```
End
```

```
%fase B
```

```
if k2==0
```

```
    Plb=0;
```

```
Else
```

```
Plb=1/(1+(Ipb/31)^2.6)
```

```
End
```

```
%fase C

if k3==0

    Plc=0;

Else

Plc=1/(1+(Ipc/31)^2.6)

end

%fase A'

Pla_prima=0;

%fase B'

Plb_prima=0;

%fase C'

Plc_prima=0;

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

Pla_prima=Pla;%1/(1+(Ipa_prima/31)^2.6)
```

```
%fase B'
```

```
Plb_prima=Plb;%1/(1+(lpb_prima/31)^2.6)
```

```
%fase C'
```

```
Plc_prima=Plc;%1/(1+(lpc_prima/31)^2.6)
```

```
end
```

29. EL NUMERO DE RAYOS QUE INCIDEN SOBRE LA TORRE SE PUEDEN ESTIMAR MEDIANTE:

$$N_t = 0.6 \cdot (NL - NSF)$$

% Donde NSF es el numero de rayos que el conductor de guarda no pueden

(fallas por apantallamiento calculadas atrás)

% interceptar, y representan la fallas del a apuntalamiento

$$N_{ta} = N_t \cdot \text{porcen_a} / 100$$

$$N_{tb} = N_t \cdot \text{porcen_b} / 100$$

$$N_{tc} = N_t \cdot \text{porcen_c} / 100$$

% for debug

$$N_{ta_prima} = 0;$$

```
Ntb_prima=0;
```

```
Ntc_prima=0;
```

```
if n_circuito==2
```

```
%fase A
```

```
Nta_prima=Nta;%Nt*porcen_a_prima/100
```

```
%fase B
```

```
Ntb_prima=Ntb;%Nt*porcen_b_prima/100
```

```
%fase C
```

```
Ntc_prima=Ntc;%Nt*porcen_c_prima/100
```

```
end
```

30. EL NUMERO DE RAYOS QUE PUEDEN CAUSAR ARCO EN UNA FASE

```
%Primer circuito
```

```
%fase A
```

```
Nta_apostrofe=Nta*PIa
```

```
%fase B
```

```
Ntb_apostrofe=Ntb*PIb
```

```
%fase C
```

Ntc_apostrofe=Ntc*Plc

%for debug

%fase A'

Nta_prima_apostrofe=0;

%fase B'

Ntb_prima_apostrofe=0;

%fase C'

Ntc_prima_apostrofe=0;

if n_circuito==2

%Segundo circuito

%fase A'

Nta_prima_apostrofe=Nta_apostrofe;%Nta_prima*Pla_prima

%fase B'

Ntb_prima_apostrofe=Ntb_apostrofe;%Ntb_prima*Plb_prima

%fase C'

Ntc_prima_apostrofe=Ntc_apostrofe;%Ntc_prima*Plc_prima

End

31. CALCULO DE LA CANTIDAD DE RAYOS SOBRE LA TORRE QUE
PRODUCEN SALIDA POR FLAMEO INVERSO

$NT_prima = Nta_apostrofe + Ntb_apostrofe + Ntc_apostrofe$

if $n_circuito == 2$

$NT_prima = Nta_apostrofe + Ntb_apostrofe + Ntc_apostrofe + Nta_prima_apostrof$
 $ofe + Ntb_prima_apostrofe + Ntc_prima_apostrofe$

End

32. NUMERO TOTAL DE SALIDAS POR FALLAS DE APANTALLAMIENTO Y
POR FLAMEOS

%INVERSOS POR km por año

$NF = NT_prima + NSF$